

Université
de Liège



RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE ET ARCHITECTURALE DE LA MAISON STREBELLE

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master en
Ingénieur Civil Architecte par **Sébastien LARUELLE**

UNIVERSITÉ DE LIÈGE – FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

ANNÉE ACADÉMIQUE 2015-2016

Promoteur : prof. Shady ATTIA

Co-promotrice : Anne-Françoise MARIQUE

« L'architecture d'un solitaire échappe à cette élaboration merveilleuse qui passe par un monde de dialogue, ce n'est jamais aussi net que l'idée d'un homme seul, mais c'est susceptible de vous surprendre, de vous ravir. Si l'exécution d'une œuvre réclame des moments de travail solitaire, l'échange reste indispensable »

Claude STREBELLE

Remerciements

Je remercie vivement mes professeurs pour leurs bons conseils et plus spécialement mes promoteurs, Shady Attia et Anne-Françoise Marique, pour leur soutien, leur aide, leur disponibilité et l'intérêt qu'ils ont porté à l'égard de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à toute l'équipe de l'Administration des Ressources Immobilières de l'Université de Liège pour leur accueil au sein de la Maison Strebelle.

Enfin, je tiens à témoigner ma gratitude envers l'ensemble des personnes de mon entourage, pour leur soutien et leur aide dans l'accomplissement de ce travail de fin d'études. Je remercie particulièrement Véronique Houet, Elsa Grégoire, Anne-Sophie Laruelle, Madeleine Duré et Jacques Laruelle pour leurs encouragements, leur patience et leur compréhension.

Résumé

La recherche d'efficacité énergétique est au centre des préoccupations de la société actuelle. Les bâtiments d'intérêt architectural de la seconde moitié du XX^e siècle constituent une part importante de notre patrimoine immobilier et la question suivante émerge : **comment rénover ce patrimoine bâti pour atteindre les performances énergétiques actuelles ?** Les enjeux de ce travail consistent donc à proposer des solutions de rénovation pour un bâtiment d'intérêt patrimonial de l'Université de Liège : la Maison Strebelle. Pour développer ces propositions, la méthodologie utilisée se base sur deux approches complémentaires. Une section **descriptive** souligne l'évolution architecturale du site et de la construction. Une section **analytique** se base sur la réalisation d'un audit énergétique et thermographique pour créer une modélisation thermique dynamique du bâtiment. Deux scénarios de rénovation sont implémentés et comparés. Des détails constructifs, une analyse sur le confort, un dimensionnement de l'éclairage et du système de chauffage sont dressés et permettent d'estimer les coûts de rénovation des configurations retenues. Les résultats indiquent que les performances de la construction peuvent être largement améliorées et respecter les critères qui définissent un bâtiment passif aujourd'hui. La consommation en énergie primaire peut être réduite de plus de 60 [%], les performances de l'enveloppe peuvent être améliorées de près de 80 [%], pour des coûts relativement faibles. Ce travail ne fournit pas une solution univoque mais bien une méthodologie pouvant amener à une rénovation cohérente. Il est dédié aux architectes et constructeurs, recherchant des solutions pour des bâtiments semblables, construits à la même époque.

Abstract

The search for energy efficiency has become a central concern in our society. A large number of buildings with architectural value, which were constructed during the second half of the 20th century, account for a significant proportion of our building stock. The next problem arises: how can we retrofit this architectural heritage and improve energy efficiency? The objective of this work is to develop some renovation options for a historic building located on the campus of the University of Liège: the old house of Claude Strebelle. To achieve this goal, the methodology combines two complementary approaches. A descriptive approach showing the architectural evolution of the site and construction. An analytical approach using an infrared thermography and energy audit for creating a dynamic thermal model of the building. Two scenarios for building renovation are implemented and compared. Some constructive details, analysis of comfort, lighting and heating design are made and provide estimated renovation costs. The simulated and measured results show that construction performances can be greatly improved. It is possible to meet the different criteria which define a passive house today. Primary energy consumption can be decreased by more than 60 [%], the envelope performance can be reduced by nearly 80 [%], at relatively low costs. This work does not provide a perfect configuration of renovation solutions, but a methodology which can lead to a consistent renovation scenario. It is mainly dedicated to help architects and builders who are looking to renovate similar buildings that were built at the same period.

Sommaire

Ce travail se concentre sur la problématique qui émerge de la dualité entre recherche d'efficacité énergétique et respect des caractéristiques architecturales et patrimoniales des bâtiments. Il s'intéresse à la rénovation d'un bâtiment particulier du domaine universitaire du Sart Tilman : la Maison Strebelle. L'objectif est de fournir des solutions adéquates pour sa rénovation énergétique et architecturale. Le premier chapitre de cette étude précise le contexte et définit plus en détail les objectifs, la portée du travail ainsi que l'état de l'art sur la problématique abordée.

Le deuxième chapitre aborde la méthodologie utilisée. Celle-ci se subdivise en deux niveaux de détail. Une méthodologie générale décrit les grandes étapes de l'analyse tandis qu'une méthodologie opérationnelle indique les étapes qui seront suivies pratiquement. La question de la reproductibilité du travail et les limitations de l'étude sont aussi abordées dans ce chapitre.

Le troisième chapitre est dédié à la description du site et du bâtiment étudié. Une analyse générale du Sart Tilman et de son évolution architecturale est établie. Après cette description globale, la Maison Strebelle est décrite en détail.

Le quatrième chapitre est quant à lui consacré à la réalisation d'un audit énergétique et thermographique du bâtiment. Il permet de préciser l'occupation du bâtiment, l'énergie disponible sur site, la composition de l'enveloppe, le fonctionnement du chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage en place ou encore les consommations énergétiques. Une évaluation du confort intérieur précède l'analyse thermographique des différentes parois et équipements de l'ancienne habitation.

Une modélisation thermique dynamique est créée dans le chapitre 5. Le logiciel DesignBuilder est employé à cette fin et l'ensemble des données récoltées dans le chapitre 4 est utilisé pour créer le modèle. Celui-ci est calibré avec les consommations énergétiques réelles de manière à pouvoir implémenter des solutions de rénovations pertinentes, qui correspondent à la réalité physique. Les résultats de la simulation sont décrits avant de préciser les limitations du modèle.

Le chapitre 6 concerne le développement des scénarios de rénovations pour le bâtiment. Deux scénarios sont créés et contiennent les différents postes de rénovation. Un dimensionnement de l'éclairage est réalisé avec l'aide du logiciel DIALux, un

dimensionnement des équipements de chauffage et de ventilation est vérifié tandis que les parois de l'enveloppe sont définies dans les détails. Ces scénarios sont aussi modélisés dans DesignBuilder afin de s'assurer qu'ils permettent bien d'atteindre les critères qui définissent un bâtiment passif aujourd'hui. Une analyse des coûts de rénovation et une comparaison des deux configurations envisagées clôturent ce chapitre.

Le septième et dernier chapitre est dédié aux conclusions. Elles contiennent une discussion sur les résultats obtenus, sur la méthode utilisée et sur les limitations de l'étude. Pour terminer, les perspectives relatives à de futurs travaux en lien avec cette étude sont envisagées.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	4
Sommaire	5
Chapitre 1 : Introduction	11
1.1. Contexte et définition de la problématique.....	11
1.2. Objectifs et portée du travail	14
1.3. Etat de l’art	17
Chapitre 2 : Méthodologie.....	23
2.1. Méthodologie générale	23
2.2. Méthodologie opérationnelle	24
2.3. Limitations et reproductibilité du travail	26
Chapitre 3 : Description du site et du bâtiment étudié	27
3.1. Description architecturale globale du Sart Tilman	27
3.2. Description de la Maison Strebelle.....	33
Chapitre 4 : Audit énergétique	41
4.1. Présentation générale de l’établissement	41
4.1.1. Affectation et occupation actuelle.....	41
4.1.2. Energie disponible.....	43
4.1.3. Analyse et compréhension de la structure portante.....	43
4.2. Analyse de la situation existante	44
4.2.1. Enveloppe.....	44
4.2.1.1. Murs extérieurs	44
4.2.1.2. Toitures	45
4.2.1.3. Dalles de sol.....	47

4.2.1.4. Châssis et vitrages	48
4.2.2. Chauffage	49
4.2.3. Eau chaude sanitaire	50
4.2.4. Ventilation et refroidissement	50
4.2.5. Eclairage	50
4.3. Consommations énergétiques	51
4.4. Evaluation du confort	53
4.4.1. Confort visuel	54
4.4.2. Confort hygrothermique	55
4.4.3. Qualité de l'air	57
4.4.4. Indices de confort : Fanger	58
4.5. Audit thermographique du bâtiment	61
4.5.1. Description du matériel utilisé	61
4.5.2. Vues depuis l'extérieur du bâtiment	61
4.5.3. Vues depuis l'intérieur du bâtiment	67
Chapitre 5 - Modélisation et simulation thermique dynamique	71
5.1. Choix et description du logiciel	71
5.2. Mesures préalables	72
5.2.1. Création d'un fichier météorologique	72
5.2.2. Volumétrie	72
5.3. Modélisation	73
5.3.1. Définition de l'activité	75
5.3.2. Définition de la construction	77
5.3.3. Définition des ouvertures	77
5.3.4. Définition de l'éclairage	77
5.3.5. Définition des installations HVAC	78
5.4. Calibration du modèle	79

5.5.	Résultats de la simulation thermique dynamique	81
5.5.1.	Confort	81
5.5.2.	Consommations énergétiques.....	82
5.5.3.	Surfaces déperditives.....	84
5.5.4.	Apports internes et solaires	85
5.6.	Limitations du modèle DesignBuilder	86
Chapitre 6 : Stratégies de rénovation		87
6.1.	Définition des scénarios de rénovation.....	87
6.2.	Scénario 1 : Isolation des murs par l'extérieur	88
6.2.1.	Charges internes	88
6.2.2.	Eclairage.....	88
6.2.3.	Ventilation.....	93
6.2.4.	L'enveloppe.....	95
6.2.4.1.	Murs extérieurs	95
6.2.4.2.	Toitures	99
6.2.4.3.	Châssis et vitrages.....	100
6.2.4.4.	Dalles de sol.....	102
6.2.5.	Eau chaude sanitaire.....	103
6.2.6.	Système de chauffage.....	103
6.2.6.1.	Systèmes envisagés	104
6.2.6.2.	Calcul des déperditions	106
6.2.7.	Vérifications des critères du « passif » dans DesignBuilder	112
6.2.8.	Gestion des nœuds constructifs	114
6.3.	Scénario 2 : Isolation des murs par l'intérieur	117
6.3.1.	Enveloppe.....	117
6.3.2.	Vérifications des critères du « passif » dans DesignBuilder	119
6.3.3.	Gestion des nœuds constructifs	119

6.4. Comparaison des deux scénarios avec la situation initiale.....	123
6.4.1. Résultats DesignBuilder	123
6.4.2. Calcul des coûts globaux de la rénovation	126
Chapitre 7 : Conclusions	128
Bibliographie	131
Table des figures	136
Liste des tableaux	140
Annexes	141
Annexe 1 : Plans d'exécution (avril 1962)	141
Annexe 2 : Reportage photographique	144
Annexe 3 : Analyse sur le confort	147
Annexe 4 : Audit thermographique	151
Annexe 5 : Résultats Meteonorm.....	153
Annexe 6 : Résultats de la simulation d'éclairage DIALux	154
Annexe 7 : Estimation des coûts de rénovation.....	156
Annexe 8 : Poster.....	160

Chapitre 1 : Introduction

Ce premier chapitre introductif a pour but de définir l'origine de ce travail de fin d'études, portant sur un cas de rénovation énergétique particulier situé sur le domaine universitaire du Sart Tilman. Nous commencerons par caractériser le contexte économique et politique actuel, source de la problématique abordée dans ce travail. Les objectifs généraux, les ambitions et l'étendue de ce dernier seront fixés avant de dresser un état de l'art sur ce sujet de recherche.

1.1. Contexte et définition de la problématique

La société actuelle tend à positionner la recherche d'efficacité énergétique au centre des préoccupations. La thématique globale de l'énergie dicte l'évolution des différents secteurs d'activité (Rojey, 2008, p. 15) composés de l'habitat, des transports, de l'industrie ou encore de l'agriculture. Dans ce sens, le domaine de la construction évolue vers une amélioration accrue des performances énergétiques des bâtiments neufs ou rénovés. Cette volonté d'efficacité énergétique se remarque à travers les textes émis par les différents niveaux d'autorités politiques. Au niveau européen, c'est la directive PEB (2002/91/CE) qui fixe les exigences minimales à respecter en termes d'isolation thermique, de ventilation, de consommation en énergie primaire et de risque de surchauffe. Après un renforcement de ces critères dans la Directive PEB-recast (2010/31/UE), une nouvelle révision est prévue pour la fin de l'année 2016. Celle-ci visera à renforcer la politique de réduction de consommation d'énergie des bâtiments. Plus localement, en région wallonne, la déclaration de politique régionale 2014-2019 précise ses ambitions en terme d'énergie au chapitre XXIII. On y trouve notamment : « *Le Gouvernement veillera à mettre en œuvre des normes ambitieuses pour réduire la consommation d'énergie des bâtiments, dans le respect des directives européennes, tout en évitant les conséquences socio-économiques négatives, en privilégiant les mesures qui ont le meilleur rapport coût-bénéfice, en envisageant une application progressive des normes pour que le secteur puisse s'adapter sans créer de surcoûts et en distinguant les exigences pour les bâtiments neufs, pour les rénovations et pour les bâtiments patrimoniaux* » (Gouvernement wallon, 2014, p. 62). Dans ce cadre, on voit donc clairement une volonté politique de réduire drastiquement la consommation énergétique des bâtiments.

Un autre élément important réside dans l'ancienneté du parc immobilier belge. Effectivement, les bâtiments anciens ne sont remplacés que très lentement et constituent une part majeure du patrimoine immobilier global (Vrijders & Loncour, 2016, p. 3). La Figure 1 suivante, construite à partir des statistiques cadastrales du nombre de bâtiments (Direction générale Statistique - Statistics Belgium, 2015), précise la répartition des constructions belges selon leur année de construction.

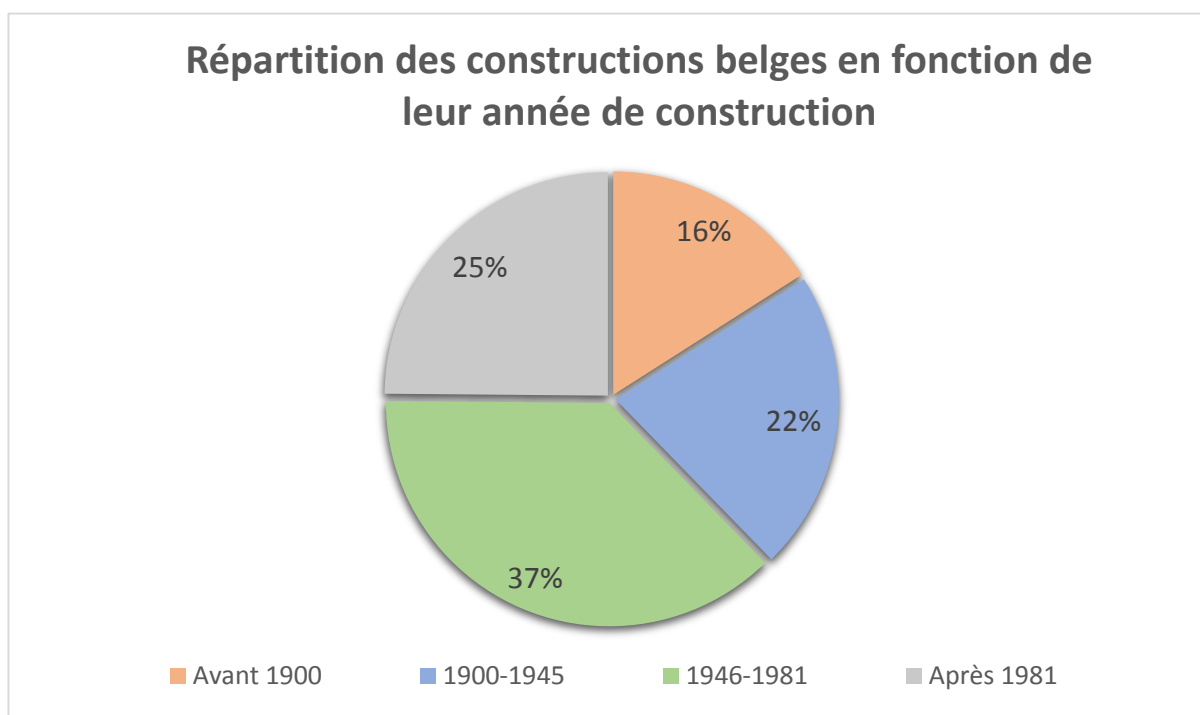


Figure 1 - Répartition des constructions belges en fonction de leur date de construction (source : Direction générale Statistique - Statistics Belgium, 2015)

Il apparaît ainsi qu'une grande majorité de bâtiments de notre patrimoine immobilier est antérieur à 1981, c'est-à-dire bien avant la mise en place des exigences en matière d'isolation ou de consommation énergétique. C'est donc dans le domaine de la rénovation énergétique des bâtiments anciens que réside un potentiel d'économie d'énergie très important.

Une nouvelle question se pose alors : **comment combiner la rénovation énergétique et le respect des caractéristiques architecturales et patrimoniales des bâtiments** ? En d'autres termes, comment continuer à améliorer les performances énergétiques des bâtiments tout en garantissant le respect de l'héritage patrimonial et architectural ? On voit, dans le contexte actuel, qu'il existe bel et bien une distinction entre bâtiments neufs, opération de rénovation et restauration de bâtiments patrimoniaux (classés), mais qu'en est-il de l'architecture populaire du siècle dernier ? Qu'en est-il de l'architecture de qualité non classée ou non inscrite sur une liste de sauvegarde ? Des exemples de rénovation montrent qu'une

recherche d'efficacité énergétique extrême peut avoir tendance à négliger les caractéristiques architecturales et patrimoniales du bâtiment. Une solution souvent utilisée est par exemple « d'enrober » le bâtiment d'un complexe isolant performant, sans opérer de distinction entre matériaux originels ou décrochements de façade éventuels. A l'inverse, un respect très voire trop restrictif des caractéristiques patrimoniales peut figer les options de rénovation possibles, ou conserver des aménagements et des agencements spatiaux qui ne pourraient plus s'adapter à la fonction du bâtiment. L'aspect économique est évidemment un facteur qui justifie couramment l'importance d'une intervention sur un bâtiment donné. Cet aspect ne doit pas être le seul critère. L'intégration des caractéristiques architecturales et patrimoniales peut engendrer des coûts supplémentaires qu'il s'agit alors d'étudier dans l'optique d'une optimisation investissement/résultats¹.

Ce travail s'intéresse donc à une problématique générale alliant deux aspects : les qualités **architecturales** et **patrimoniales** ainsi que la recherche d'**efficacité énergétique**.

Il s'inscrit également dans un cadre plus local. En effet, les bâtiments de l'Université de Liège, implantés sur le domaine du Sart Tilman, font l'objet d'une rénovation profonde. Un programme de rénovation énergétique cible actuellement 15 bâtiments du campus universitaire (Université de Liège, 2014) et est soutenu par le Fonds d'investissement européen EEEF (European Energy Efficiency Fund). Ce programme servira de projet pilote pour les 85 autres bâtiments du campus. Un montant de 1,5 million d'euros a pu être obtenu pour réaliser différentes analyses techniques préalables aux travaux de rénovation. L'Université de Liège s'engage quant à elle à investir un budget de 30 millions d'euros dans l'objectif de générer au moins 20% d'économies d'énergie (Janssens, 2014). Dans son rapport annuel de 2014, EEEF précise le contenu et les résultats attendus par rapport au projet financé. Les fonds accordés servent notamment à établir des audits énergétiques pour chacun des bâtiments concernés. Ceux-ci permettent d'identifier les actions qui pourront mener à des économies potentielles d'énergie, en termes de consommation pour le chauffage et d'émissions de CO₂ (European Energy Efficiency Fund, 2014). Les résultats estimés pour le campus universitaire du Sart Tilman sont de 33,556 [MWh] d'économie d'énergie pour le chauffage ainsi qu'une réduction des émissions de CO₂ de 3,201,000 [kg CO₂e/an]. La conférence de presse, organisée le 18 juin 2014, a permis de mettre en lumière les quatre objectifs majeurs poursuivis dans le cadre

¹ Qu'il s'agisse de coûts directs liés à l'opération de rénovation en tant que telle, ou encore de coûts de fonctionnement plus important (consommation d'énergie plus conséquente à la suite de l'impossibilité d'augmenter l'épaisseur d'isolation, etc.).

de ce programme de rénovation énergétique (European Energy Efficiency Fund (EEEF), 2014) :

- 1- L'isolation thermique des enveloppes doit être renforcée ;
- 2- L'éclairage dans les bâtiments doit être repensé ;
- 3- L'éclairage extérieur du domaine doit être entièrement revu ;
- 4- La ventilation et la distribution de la chaleur devront être adaptées à des bâtiments isolés et étanches.

1.2. Objectifs et portée du travail

Vu le contexte énergétique dans lequel se positionne le domaine universitaire du Sart Tilman, ce travail a pour volonté d'enrichir les connaissances à acquérir en vue de rénover durablement l'entièreté du site. Il s'inscrit dans la stratégie générale de rénovation du campus menée actuellement par l'administration des ressources immobilières (ARI) de l'Université de Liège. L'objectif est de fournir un document qui puisse participer à orienter l'ARI dans le développement de solutions techniques pertinentes à mettre en place pour la rénovation d'un bâtiment du domaine universitaire, à savoir la Maison Strebelle (voir Figure 2).



Figure 2 - B3c : Maison Strebelle

Cette étude est aussi dédiée à l'ensemble des architectes et constructeurs qui recherchent des solutions de rénovation pour des bâtiments au contexte semblable, ou construits à la même époque. Elle précise une méthodologie pour aborder un bâtiment de ce type tout en comparant différentes solutions techniques envisageables.

Le bâtiment traité sera plus amplement décrit dans la suite de ce travail mais nous pouvons déjà insister sur son importance patrimoniale. Cette construction fut occupée par l'architecte-urbaniste Claude Strebelle et sa famille. Ce dernier avait pour mission d'établir une vision urbanistique et architecturale globale du site du Sart Tilman, ainsi que de coordonner l'ensemble des architectes qui prenaient part à l'édification du domaine, à partir des années 1950² (Henrion, 2009). D'un point de vue historique, cette construction apparaît donc comme essentielle pour le Sart Tilman puisqu'elle traduit les intentions initiales développées par Claude Strebelle. Cette ancienne habitation est le témoin d'une époque passée, ayant marqué l'histoire de l'architecture, et dans laquelle beaucoup de bâtiments de notre patrimoine immobilier appartiennent. Cette construction ne répond toutefois pas aux exigences énergétiques décrites dans le point précédent, et fixées par les autorités politiques. Nous nous trouvons face à une construction pour laquelle la problématique définie plus haut apparaît : comment atteindre les performances énergétiques actuelles sans dénaturer l'architecture mise en œuvre au début de la période d'édification de l'Université de Liège au Sart Tilman ?

Ce travail tentera donc d'apporter une réponse à cette question. Pour ce faire, la méthodologie globale suivante sera utilisée. Les différentes caractéristiques du bâtiment seront étudiées dans les détails. Une première phase de description de l'architecture de la Maison Strebelle ainsi que du site du Sart Tilman sera réalisée de manière à pouvoir en tenir compte dans le développement d'un projet de rénovation optimal. Une seconde phase détaillera une analyse fine du bâtiment notamment par la réalisation d'un audit énergétique et thermographique, de même que par la création d'une modélisation thermique dynamique. Cette modélisation permettra de simuler les modifications à apporter à la Maison Strebelle pour obtenir un bâtiment qui satisfait aux critères définissant un bâtiment passif aujourd'hui. Finalement, deux scénarios de rénovation plausibles d'un point de vue technique et économique seront proposés, en accord avec les analyses architecturales et énergétiques précitées.

La particularité de ce travail par rapport à une procédure classique de rénovation énergétique est la prise en compte des caractéristiques architecturales et patrimoniales du bâtiment. Le but n'est pas de fournir une proposition de rénovation ayant pour seul objectif une diminution des consommations du bâtiment mais bien de proposer une solution adéquate et réalisable.

² Période durant laquelle l'Université de Liège engage le déplacement des infrastructures du centre-ville vers le plateau du Sart Tilman.

La formalisation des résultats de ce travail varie en fonction du sujet abordé. L'audit énergétique et thermographique listera simplement les différentes caractéristiques du bâtiment. La modélisation thermique dynamique fournira une quantification graphique de ces caractéristiques. Les scénarios de rénovation apparaitront comme des lignes directrices, des recommandations pour la rénovation, qui prennent en compte l'ensemble des autres paramètres. Ceux-ci incluent une étude sur le confort intérieur ainsi que le dimensionnement de certains équipements, tels que l'éclairage ou le système de chauffage, afin de vérifier la faisabilité des propositions.

Les résultats de cette étude pourront être utilisés par l'Administration des Ressources Immobilières de l'Université de Liège, en charge de la rénovation des bâtiments du site. Ils doivent permettre de guider l'administration dans la mise en œuvre de la rénovation de la Maison Strebelle. Les scénarios de rénovation n'auront pas la prétention d'être les seuls réalisables. Ils permettront simplement d'illustrer une démarche de rénovation adéquate. Par ailleurs, la réflexion de cette recherche et la méthodologie se portent également vers l'ensemble de la communauté scientifique et vers les professionnels du secteur, qui peuvent être confrontés à une problématique semblable.

Le contenu du travail suivra donc la structure suivante. Premièrement, un état de l'art de la problématique étudiée sera dressé et clôturera ce chapitre introductif. Ce dernier permettra de rassembler une partie des études existantes sur le sujet, tant au niveau international que local. Le chapitre 2 explicitera la méthodologie détaillée employée pour l'accomplissement de ce travail. Par la suite, le chapitre 3 sera dédié à une description précise de l'architecture du site du Sart Tilman et de la Maison Strebelle. L'audit énergétique et thermographique du bâtiment sera réalisé dans le chapitre 4. Le chapitre 5 comprendra, quant à lui, la création de la modélisation et de la simulation thermique dynamique de la maison. Finalement, le chapitre 6 détaillera les différents scénarios de rénovation proposés.

1.3. Etat de l'art

La thématique abordée dans le cadre de ce travail a déjà fait l'objet de diverses études similaires. Celles-ci avaient pour objectif majeur le développement de solutions face à la problématique décrite précédemment. Aux différentes échelles internationale et locale, il est possible de mettre en évidence les institutions et les publications qui s'intéressent au domaine traité.

Au niveau international, la première conférence intitulée « *Energy efficiency in historic buildings* » s'est tenue à Madrid en septembre 2014. Cette dernière avait pour but d'apporter des réponses à cette question fondamentale : « *How to improve the energy efficiency of historic buildings while preserving their historic character, values and historical integrity ?* » (López, Yáñez, Gomes da Costa, & Avellà, 2014). Cette conférence s'intéressait donc davantage à la notion de bâtiment historique, mais les principes soulevés peuvent s'appliquer à tout bâtiment dont la protection des caractéristiques architecturales et patrimoniales se justifie.

Dans le même ordre d'idées, une seconde conférence internationale est prévue en octobre 2016 à Bruxelles et portera sur la thématique suivante : « *Energy efficiency and Comfort of Historic Buildings* ».

L'association internationale R.E.D. (Ruralité – Environnement – Développement) est une association créée en 1980 ayant pour but d'assurer des échanges continus sur les politiques rurales et leur mise en œuvre, en renforçant l'opérationnalité sur le terrain et le dialogue avec les institutions européennes (Association Internationale R.E.D., s.d.). Cette association est à l'origine de différents projets liés à la rénovation énergétique du bâti d'intérêt architectural ou patrimonial. Parmi ces projets, nous pouvons citer : le projet **BAPE**³ (2010-2011), le projet **ERFIN**⁴ (2012-2013) et le projet **PAGE45+**⁵ (2014-2015). Décrivons successivement le contenu et les objectifs de chacun de ces projets.

- **BAPE**

Le projet avait pour finalité de mener une réflexion sur les possibilités de conjuguer le respect des qualités patrimoniales du bâti ancien et sa performance énergétique (Association internationale R.E.D, s.d.). Il a abouti à la création d'un fascicule de recommandations sur les « Calculs de performance énergétique du bâti ancien » (2011), une brochure ciblant les

³ « Bâtiment Ancien : entre enjeux Patrimoniaux et Énergétiques ».

⁴ « Éco-rénovation patrimoniale : formation et innovation ».

⁵ « Inscrire les bâtiments d'intérêt architectural construits après 1945 dans les défis du XXI^e siècle ».

« Autorités intellectuelles et administratives sur le bâti ancien » (2011) ainsi qu'une brochure de présentation de « 25 cas pratiques » (2011).

- **ERFIN**

Ce projet s'articule autour de deux thématiques : l'innovation et la formation. Dans ce projet, la notion de patrimoine inclut « *le patrimoine bâti classé et inventorié mais aussi les constructions sans reconnaissance officielle qui possèdent un intérêt patrimonial par leur valeur de témoin du passé et/ou par leur valeur d'ensemble* » (Association internationale R.E.D, s.d.). Les différents résultats du projet ont pu être présentés lors de la conférence de clôture du 24 septembre 2013, à savoir : « un répertoire de formation » sur le dialogue patrimoine-énergie, une liste de « 29 recommandations » pour améliorer ce dialogue ainsi qu'une brochure « Patrimoine-Énergie : former, innover ». De plus, 19 rénovations énergétiques de bâtiments d'intérêt patrimonial ont pu être mises en évidence pour leur caractère innovant.

- **PAGE45+**

Ce dernier projet a mis l'accent sur la question de l'avenir des bâtiments d'intérêt architectural construits après 1945, souvent dépréciés et énergivores. Un objectif majeur du projet était de pouvoir identifier des exemples d'amélioration de performance énergétique de bâtiments construits après 1945, et qui possèdent une qualité patrimoniale ou architecturale reconnue. Par la suite, 25 recommandations ont été émises. Elles concernent l'identification de la qualité architecturale du bâti, les outils de reconnaissance et de protection, la sensibilisation et la formation, l'équilibre entre le respect de la qualité architecturale du bâtiment et son devenir en intégrant les contraintes énergétiques (Association internationale R.E.D, s.d.). Les projets sélectionnés devaient donc présenter un certain équilibre entre amélioration des performances énergétiques et préservation de la qualité architecturale. 14 projets ont ainsi fait l'objet d'une étude particulière, sous la forme d'une publication « *Inscrire les bâtiments construits après 1945 dans les défis du XXI^e siècle* » (2015).

Un autre projet intitulé **RE-Emploi**⁶, initié en 2010, a pour vocation d'aider la population à comprendre la réglementation et les enjeux par rapport au fait de « *concilier rénovation respectueuse du patrimoine bâti et les enjeux énergétiques, environnementaux et de santé* » (Ré-Emploi, 2010). Ce programme transfrontalier se veut intégrateur dans le sens où il

⁶ « Rénovation respectueuse du patrimoine, économie d'Énergie, qualité Environnementale, stimulation de l'Emploi »

existe une volonté de sensibiliser les différents intervenants de tout acte de rénovation⁷ : le demandeur (propriétaire), le professionnel du bâtiment et les compétence de ces derniers (par l'intermédiaire de formations). Différents outils, comme la mallette à isolation, et des publications telles que : « Guide pratique : Rénover pour consommer moins d'énergie » ou encore « Réussir une rénovation performante »⁸, ont émergé depuis la naissance du projet. Ces dernières sont généralement présentées sous formes de guides pratiques et techniques accessibles à tous.

Par rapport à la procédure d'audit énergétique, la Directive européenne 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique précise les différentes obligations des états membres à l'article 8. Elle définit aussi unilatéralement l'audit énergétique à 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, [...], de déterminer et de quantifier les économies d'énergies qui peuvent être réalisées d'une façon rentable, et de rendre compte des résultats* » (Journal officiel de l'Union européenne, 2012). Cette définition renvoie donc à une procédure systématique qu'il est important d'identifier. En Belgique, la norme « NBN EN 16247 – Audits énergétiques »⁹ précise les exigences et les procédés qui interviennent dans toute procédure d'audit énergétique et s'inscrit dans la directive européenne « Efficacité énergétique ». En région wallonne, l'annexe 2 de l'arrêté du Gouvernement wallon du 28 mars 2013 définit le cahier des charges minimal d'un audit énergétique. Ce dernier décrit de manière détaillée les objectifs et exigences à respecter.

A travers le monde, il existe un nombre important de méthodologies différentes qui permettent de réaliser un audit énergétique. De manière non exhaustive, décrivons quelques procédures particulières.

L'ADEME¹⁰, dans le cadre du dispositif d'aide à la décision, a réalisé un cahier des charges « type » sur l'audit énergétique dans les bâtiments. Dans ce dernier, elle établit 4 phases distinctes (ADEME, 2014) :

- Phase 1 : Etat des lieux ;
- Phase 2 : Bilan énergétique et préconisations ;
- Phase 3 : Programmes d'améliorations ;

⁷ Associant les arrondissements de Thuin (Belgique), de Charleroi (Belgique) et d'Avesnes-sur-Helpe (France).

⁸ Disponibles sur le site internet : <http://www.renovationdurable.eu/Publications.html>.

⁹ La norme se décline en 5 parties : 1) Exigences générales, 2) Bâtiments, 3) Procédés, 4) Transports, 5) Compétence des auditeurs énergétiques.

¹⁰ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.

- Phase 4 : Analyse financière.

Cette méthodologie suit la Directive européenne « Efficacité énergétique » décrite précédemment.

Aux Etats-Unis, l'ASHRAE¹¹ distingue 3 niveaux différents d'audit énergétique avec pour chacun un protocole bien spécifique à respecter (ASHRAE, 2004) :

- Level I: Walk-Through Analysis;
- Level II: Energy Survey and Analysis;
- Level III: Detailed Analysis of Capital Intensive categories.

Le premier niveau d'audit se base sur les factures d'énergie ainsi que sur une courte étude sur site du bâtiment. Le deuxième niveau identifie, en plus des exigences du premier niveau, les économies potentielles, une analyse des coûts ainsi qu'une liste d'améliorations possibles qui nécessitent une étude approfondie. Le dernier niveau est une analyse très profonde et rigoureuse de chaque possibilité identifiée dans le deuxième niveau.

En Europe, Giuliano Dall'O' (Dall'O', Green Energy Audit of Buildings, A Guide for a Sustainable Energy Audit of Buildings, 2013, p. 16) établit une procédure d'audit qui peut se simplifier en 4 étapes :

- Acquisition of documentation ;
- Field surveys and monitoring ;
- Definition of energy retrofit measures;
- Editing of the audit report.

Plus particulièrement et d'une façon similaire aux Etats-Unis, il définit une procédure dite « Green Energy Audit » qui se scinde en 3 catégories :

- Walkthrough audit ;
- Standard audit ;
- Simulation audit.

Il établit (Dall'O', Green Energy Audit of Buildings, A Guide for a Sustainable Energy Audit of Buildings, 2013, p. 23) une comparaison stricte entre ces trois catégories d'audit où les exigences pour chacune sont précisées dans le Tableau 1 suivant.

¹¹ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Tableau 1 - Features, instruments and procedures for three operational levels (walkthrough, standard, simulation) of green energy audit (Dall'O', Green Energy Audit of Buildings, A Guide for a Sustainable Energy Audit of Buildings, 2013, p. 23)

Features, instruments and procedures	Green Energy Audit		
	Walkthrough	Standard	Simulation
Building size	Rough plan	Plans, cross-sections and detailed exterior elevation views	Plans, cross-sections and detailed exterior elevation views
Systems' features	Recommended (approx.)	Recommended (detailed)	Recommended (detailed)
Data on energy Required	consumption	Required	Required
Measurements	Size (approx.), air temperature, surface temperature, illuminance, electrical measurements	Size, air temperature, surface temperature, air speed, air flow, illuminance, power grid analysis, flue gas analysis, infrared audit, thermal conductivity	Size, air temperature, surface temperature, air speed, air flow, illuminance, power grid analysis, flue gas analysis, infrared audit, thermal conductivity
Monitoring Forms	None Basic check-list	Data logger (recommended) Detailed check-list	Data logger (recommended) Detailed check-list
Calculation tools	Nomograms, simple spreadsheets	Simplified calculation models, simple algorithms or simplified models	Dynamic simulation models (e.g., Energy Plus, ESP-r, etc.)
Expected results	Brief report pinpointing inefficiencies in the systems or their management; rough list of actions to be taken and works to be carried out; suggestions for further in-depth surveys	Detailed report including a description of the current situation (building and plants), pinpointing inefficiencies in the systems or their management; definition and description of actions to be taken and works to be carried out, economics	Detailed report including a description of the current situation (building and plants), pinpointing inefficiencies in the systems or their management; definition and description of actions to be taken and works to be carried out, economics
Estimated average time	A few days	A few weeks	A month or more
Cost	Low	Medium	High

La dernière catégorie d'audit correspond à un audit réalisé grâce à l'utilisation d'un logiciel de simulation thermique dynamique. Ce type d'audit sera implémenté dans le cadre de ce travail via l'utilisation du logiciel DesignBuilder, utilisant le moteur de calcul EnergyPlus (voir chapitre 5).

Il est aussi important de préciser que des audits énergétiques ont déjà été réalisés par le bureau d'étude Greisch sur différents bâtiments du campus universitaire du Sart Tilman, dans le cadre du projet EEEF. Ceux-ci serviront notamment d'exemples pour mettre en place une structure d'audit cohérente.

En ce qui concerne les différentes technologies de rénovation qui peuvent être employées, le CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) édite quatre fois par an le CSTC-Contact destiné aux entrepreneurs. Cette publication couvre bon nombre de thématiques nécessaires à la réalisation d'un chantier ou d'un dossier technique de tout ordre. Des aspects liés au diagnostic d'un bâtiment, au choix des matériaux à mettre en œuvre, à l'isolation thermique, acoustique ou encore sur certaines typologies de structure sont abordés à travers les différentes éditions disponibles gratuitement sur le site internet du CSTC¹².

¹² Les publications sont disponibles en ligne gratuitement sur : <http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact>

Nous avons pu constater, à l'issue de ce chapitre introductif, que la problématique étudiée est relativement récente. Diverses associations tentent d'apporter des réponses, non pas par l'établissement de grands principes à respecter, mais bien par l'explication d'exemples représentatifs. Il s'agit effectivement d'un problème devant être étudié au cas par cas, chaque bâtiment possédant ses caractéristiques propres. Nous avons pu également mettre en évidence les différentes méthodes d'audit énergétique qui témoignent de l'importance de cette procédure, devenue courante dans tout diagnostic de construction. Développons, dans le chapitre suivant, la méthodologie employée pour étudier et diagnostiquer la Maison Strebelle.

Chapitre 2 : Méthodologie

La méthodologie peut être scindée en deux niveaux : une méthodologie globale et une méthodologie opérationnelle. La première définit les intentions générales tandis que la deuxième décrit, de façon pratique, la manière dont le travail se décompose.

2.1. Méthodologie générale

La méthodologie globale, utilisée pour la réalisation de ce travail, est représentée sur la Figure 3 suivante. Trois volets différents seront envisagés : une analyse qualitative, une procédure quantitative et une phase d'interprétation.

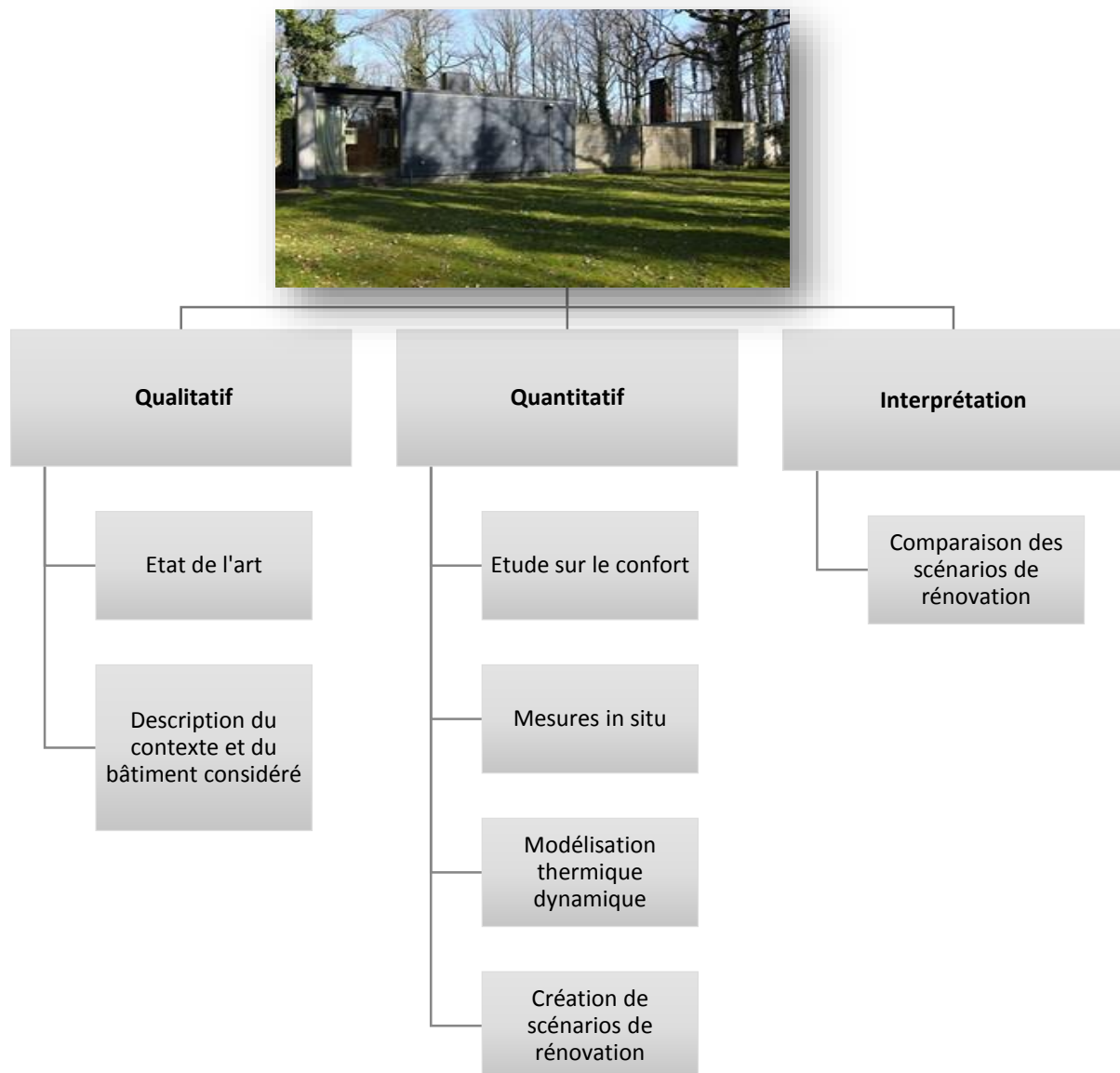


Figure 3 - Méthodologie globale

À la suite de la phase de recherche, présentée dans le chapitre précédent, une analyse qualitative du bâtiment et de son contexte doit être réalisée préalablement à toute proposition de rénovation. Cette analyse aura donc pour but de présenter le site du Sart Tilman dans sa globalité avant de se concentrer sur le bâtiment en question. En plus d'une bonne compréhension du cadre naturel, culturel et sociétal dans lequel évolue le bâtiment, cette analyse fournira une identification des caractéristiques architecturales et patrimoniales majeures.

Une phase quantitative permettra ensuite d'aborder l'évaluation des performances énergétiques du bâtiment. Différentes mesures permettront d'élaborer un modèle thermique dynamique simplifié mais réaliste qui servira de base à la création de deux scénarios de rénovation.

La dernière phase est une analyse interprétative qui comparera objectivement les scénarios de rénovation pour faire émerger un scénario optimal en fonction de différents critères (caractéristiques architecturales et patrimoniales, coûts, gains d'énergie, etc.).

2.2. Méthodologie opérationnelle

De manière plus détaillée, nous pouvons scinder cette méthodologie globale en 4 grandes phases opérationnelles qui structurent également les chapitres du travail.

Comme déjà mentionné, la première phase précisera le contexte dans lequel le bâtiment s'inscrit. Une description globale du site du Sart Tilman précèdera une analyse architecturale fine du bâtiment considéré. A l'issue de ce chapitre, il s'agira d'identifier les caractéristiques architecturales et patrimoniales à respecter afin d'établir un projet de rénovation cohérent. Pour ce faire, des documents relatifs à la création du campus universitaire seront utilisés pour comprendre les intentions de Claude Strebelle.

En ce qui concerne la procédure d'audit énergétique et thermographique de la deuxième phase, la méthodologie générale adoptée est similaire à la démarche initiée par l'ADEME et par le « Green Energy Audit – Simulation » (audit standard). Un état des lieux permettra de recueillir toutes les informations utiles pour les phases suivantes de l'audit (recueil des plans, coupes, description des bâtiments existants, etc.). Une deuxième étape consistera à réaliser un bilan énergétique du bâtiment. Le but de cette étape est d'obtenir les valeurs de consommations énergétiques initiales, avant implémentations des améliorations potentielles dans le logiciel de simulation thermique dynamique.

La troisième phase correspond à l'étude des différents scénarios de rénovation en fonction des observations émises dans la deuxième phase. Ces scénarios de rénovation diffèrent selon la manière dont l'enveloppe est traitée. Ils sont créés de manière à satisfaire les critères définissant un bâtiment passif aujourd'hui. Dans le premier scénario, nous considérerons une isolation de l'enveloppe par l'extérieur de la structure existante. Dans le second cas, nous envisagerons une isolation thermique par l'intérieur du bâtiment. Pour chacun des scénarios, nous préciserons l'ensemble des tâches à réaliser ainsi que les matériaux choisis. Nous justifierons certains choix effectués, tels que dispositif d'éclairage ou chauffage, par un dimensionnement des équipements.

Une dernière phase permettra de comparer quantitativement les résultats de la simulation thermique dynamique, obtenus pour les deux scénarios de rénovation, avec ceux issus de la situation initiale. Une évaluation des coûts de rénovation permettra aussi d'obtenir un critère de comparaison entre les scénarios de rénovation.

La Figure 4 ci-dessous synthétise visuellement le découpage des différentes phases qui seront suivies dans la suite de ce travail.

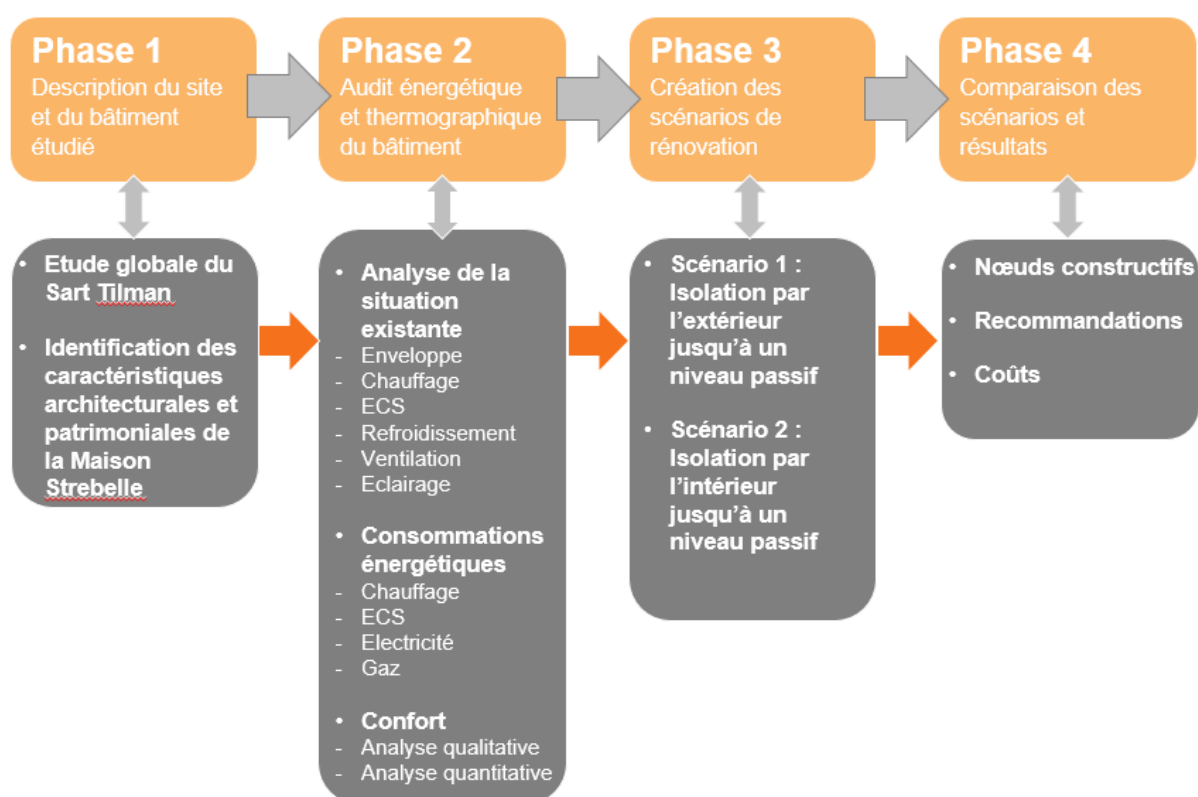


Figure 4 - Méthodologie détaillée

2.3. Limitations et reproductibilité du travail

Précisons quelques limitations importantes à prendre en considération. Tout d'abord, ce travail réunit à la fois des mesures et des descriptions objectives avec des interprétations pouvant paraître subjectives. Effectivement, la section relative à l'analyse architecturale de la Maison Strebelle, bien que basée sur une description objective globale du site du Sart Tilman, reflète une certaine part de subjectivité, une part d'interprétation liée à la sensibilité architecturale variant d'une personne à l'autre. Toutes les mesures et descriptions sont quant à elles objectives, basées sur un état de fait réel ou issues de la littérature.

Cette précision définit aussi le caractère reproductible de la démarche adoptée. Toutes les mesures in situ et les descriptions rendent le travail reproductible, si elles sont réalisées dans des conditions similaires, en suivant un protocole identique. L'audit énergétique et la modélisation thermique dynamique, détaillés dans les chapitre 4 et 5 sont parfaitement reproductibles si les mêmes hypothèses sont suivies, dans des conditions similaires. Ces remarques définissent la robustesse de la démarche employée. Si une donnée d'entrée est erronée, son introduction dans le logiciel induira un résultat non réaliste et a fortiori, un scénario de rénovation non pertinent. Le développement de ces scénarios de rénovation est en partie reproductible puisqu'il est basé sur les mesures in situ. Néanmoins, ces scénarios restent des choix subjectifs, pouvant différer selon l'auteur de projet.

Chapitre 3 : Description du site et du bâtiment étudié

Penchons-nous, à travers ce chapitre, sur la description des caractéristiques architecturales et patrimoniales qui façonnent le campus universitaire du Sart Tilman. Cette description globale sera suivie d'une analyse plus précise de la Maison Strebelle. A l'issue de ce chapitre, les principes architecturaux majeurs du bâtiment seront mis en évidence.

3.1. Description architecturale globale du Sart Tilman

Pour comprendre l'architecture de la Maison Strebelle, il est important de cerner le cadre dans lequel elle s'inscrit : le domaine du Sart Tilman. Ce vaste domaine boisé est situé entre les vallées de la Meuse et de l'Ourthe, au sud de la ville de Liège (voir Figure 5). À la charnière des années cinquante et soixante, le site a vu s'implanter les nouvelles infrastructures de l'Université de Liège, alors que les bâtiments du centre de la ville n'offraient plus une surface suffisante (Legros, 2005, p. 6).



Figure 5 - Localisation du Sart Tilman (source : WalOnMap)

En 1959, l'Université de Liège acquiert les premiers hectares qui lui permettront de concrétiser le transfert de l'Université vers ce plateau du Sart Tilman (Frankignoulle, 2014, p. 262). Marcel Dubuisson, recteur à cette époque, développe une vision préservatrice des qualités paysagères des lieux. Il désigne Claude Strebelle (Figure 6) comme architecte coordonnateur du développement du site (Charlier & Moor, Juillet 2014, p. 267). Claude Strebelle s'entoure alors d'une équipe d'architectes et conçoit un plan d'urbanisation en lien avec la vision du recteur.

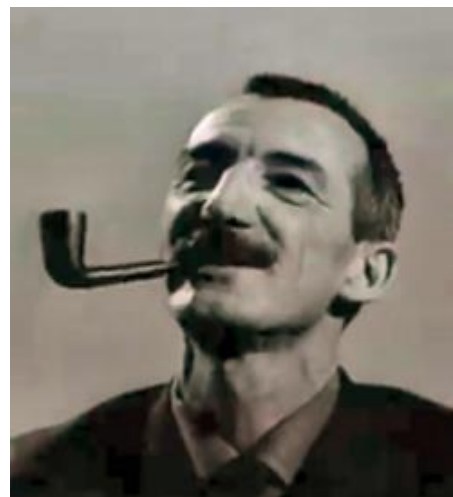


Figure 6 - Claude Strebelle (Henrion, 2009)

Trois principes fondamentaux sont établis (Strebelle, 2005) :

- Création dans le respect de la nature et amélioration de la richesse végétale du plateau ;
- L'Université ne se fermera pas sur elle-même mais s'ouvrira largement au public ;
- L'Université gardera et renforcera ses liens avec la ville.

Strebelle (2005) précise : « *Le parti urbanistique est marqué par la volonté de réaliser « un tout » en de nombreuses étapes. C'est une œuvre de longue haleine, chaque **action ponctuelle** devant tenir compte de la **globalité**. L'urbanisme et l'architecture qui le compose sont organiques, conçus par l'esprit pour répondre à un ensemble de propriétés essentielles dont la nature même du site est prioritaire. Le terme « organique » signifie pour moi « entité ». Il s'applique à toute structure vivante dont les parties sont organisées les unes en rapport avec les autres, tant dans leur forme que dans leur substance* ». On comprend donc l'importance de la vision globale à percevoir avant toute intervention, aussi ponctuelle soit-elle.

Un plan directeur reprenant ces idées est donc mis sur pied et est revu quotidiennement. Il reprend le zonage et l'affectation au sol de l'ensemble des 2000 hectares qui composent le plateau du Sart Tilman. La Figure 7 ci-après représente ce plan directeur actualisé dans le courant de l'année 1984, année durant laquelle la mission d'architecte coordonnateur de Claude Strebelle prit fin. Elle est tirée d'un carnet réalisé par l'atelier du Sart Tilman qui devait exposer aux successeurs les principes fondateurs de l'ensemble des bâtiments construits jusqu'alors.

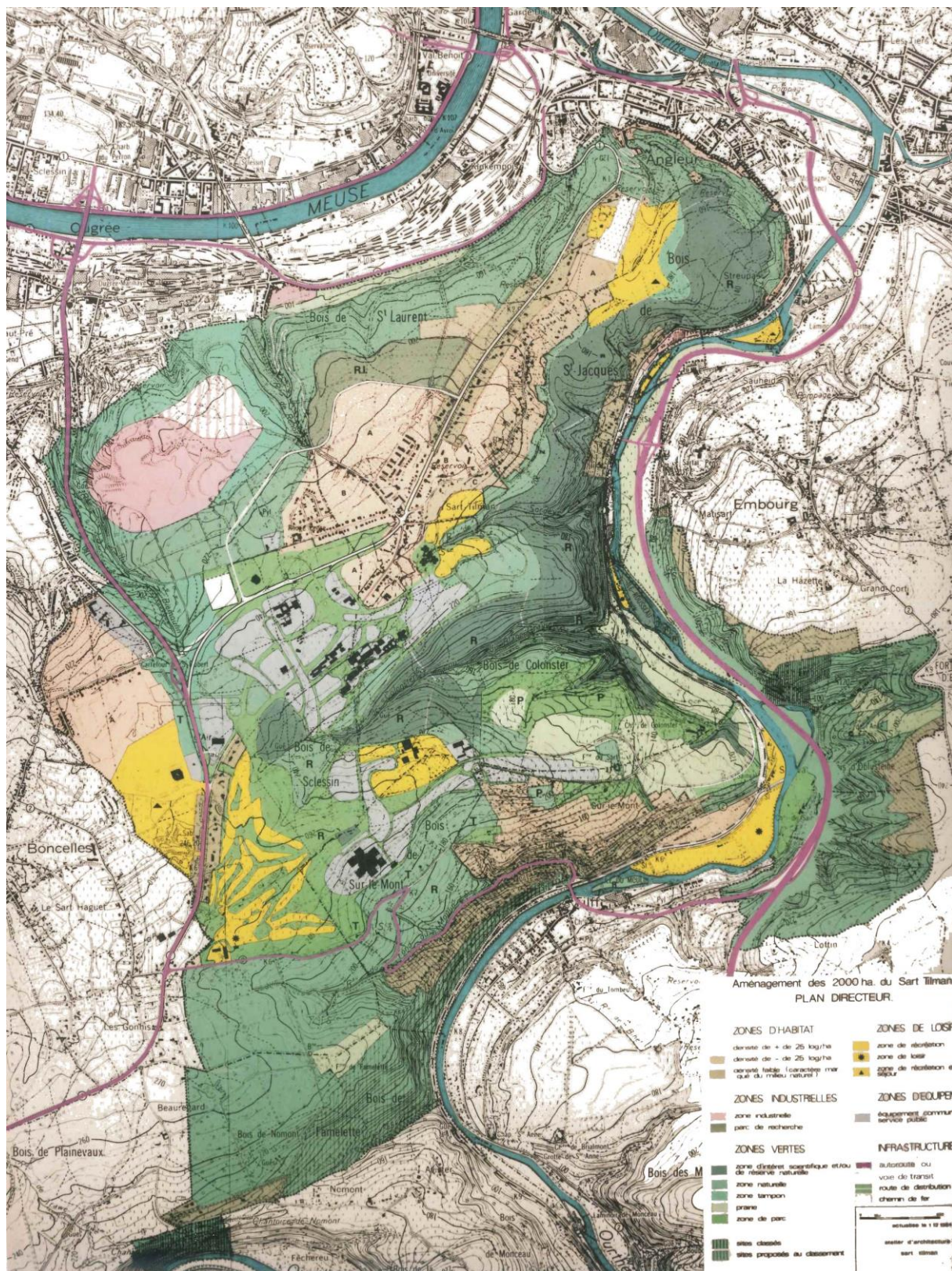


Figure 7 - Plan directeur (Atelier d'architecture du Sart Tilman, 1984)

En ce qui concerne l'évolution des caractéristiques architecturales des bâtiments édifiés, Edith Micha (2005) distingue 3 phases d'édifications différentes, avec des caractéristiques architecturales propres, qu'il est intéressant de souligner.

- **Phase 1 : 1960-1970**

Cette première phase peut être caractérisée par une architecture sobre qui favorise une certaine géométrisation des volumes mais surtout un principe d'intégration à la nature primordial. Un exemple d'application pratique réside dans l'utilisation des toitures plates, couvertes de gazon et qui prolongent le paysage. Parmi les ouvrages qui illustrent bien ces principes, on peut citer les pavillons de l'« Atelier d'architecture » qui sont des structures en bois qui accueillaient les différents architectes et urbanistes travaillant sur place. Le but était de favoriser une imprégnation des lieux en s'implantant dans un cadre boisé et en plein cœur du site. Dans le même esprit, on peut citer la maison personnelle de Claude Strebelle qu'il a choisi d'implanter à côté de ces pavillons (Figure 8) et qui sera décrite plus précisément dans la partie suivante de ce travail.



Figure 8 - Pavillon D des Urbanistes et maison Strebelle (ULg-Houet)

Claude Strebelle avait également la volonté d'assurer une certaine cohérence entre les différents bâtiments implantés sur le domaine. Ainsi, l'emploi du béton, l'adoption de volumes géométriques et les soucis d'intégration au site sont devenus des caractéristiques de composition architecturale. Au même titre, les théories modernistes et fonctionnalistes de l'époque, comme la simplicité du traitement des façades et des formes, ont eu une influence indéniable sur la création architecturale.

- **Phase 2 : 1970-1990**

Cette deuxième période se caractérise par un changement des mentalités : on passe à une architecture aux formes et aux matériaux plus variés, à des plans plus complexes, à

l'utilisation de courbes, à une sorte d'« humanisation de l'architecture », les œuvres d'art s'intègrent à l'architecture. L'institut Montefiore (Figure 9), construit durant cette période, illustre bien ces principes : volumes à taille humaine autour d'un espace central de détente et utilisation du bois qui procure une atmosphère plus chaleureuse à l'intérieur (Marchesani, 2014).



Figure 9 - Institut Montefiore (ULg-Houet)

- **Phase 3 : Après 1991**

Cette dernière phase a vu émerger les amphithéâtres de l'Europe, l'institut de mathématique ou encore le bâtiment de génie civil (Figure 10). D'un point de vue architectural, le béton est toujours utilisé mais le traitement est différent en comparaison aux deux périodes précédentes. Durant cette période, le bâtiment est recouvert d'un matériau résistant tel que le zinc, le cuivre ou encore l'acier inoxydable. L'architecture s'accompagne de volumes simples et d'une organisation interne claire. Cette tendance à l'épure peut être interprétée comme une sorte de réaction à la complexité développée durant la phase précédente.



**Figure 10 - Amphithéâtres de l'Europe (B4), Génie Civil (B52), Institut de mathématique (B37)
(ULg- Deru)**

On voit donc, à travers ces quelques exemples, que le contexte architectural du domaine du Sart Tilman a évolué au cours de ces dernières décennies. Alors que les premières constructions des années 1960 s'inspiraient des tendances modernistes et fonctionnalistes, elles ont été remises en cause dans la deuxième phase pour davantage de complexité formelle et spatiale. La dernière phase, dont les principes sont encore utilisés actuellement, revient à une architecture épurée et très axée sur l'aspect organisationnel de l'espace.

3.2. Description de la Maison Strebelle

Après cette brève description globale du site du Sart Tilman, étudions plus en détail la maison de Claude Strebelle et de sa famille, occupée durant les premières phases de construction du campus. Cette habitation est située au sein de l'actuel quartier des Urbanistes du site de l'Université de Liège. La Figure 11 ci-dessous pointe en rouge la localisation plus précise de ce bâtiment sur le site.

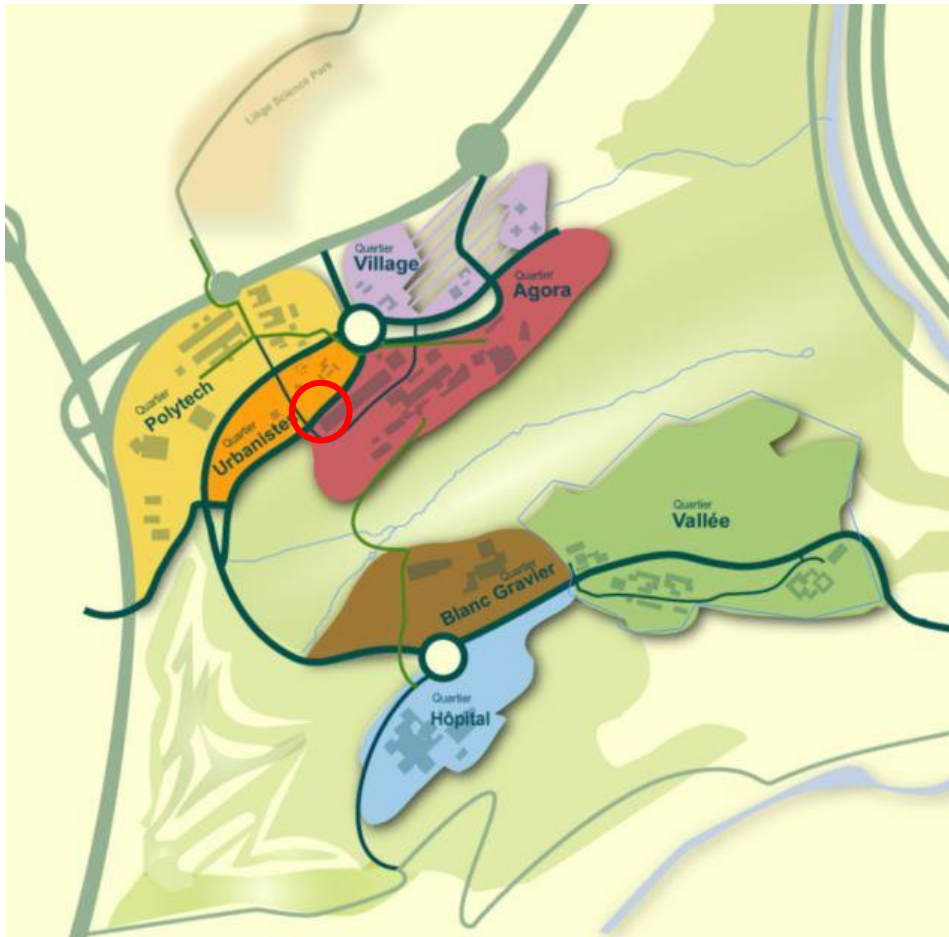
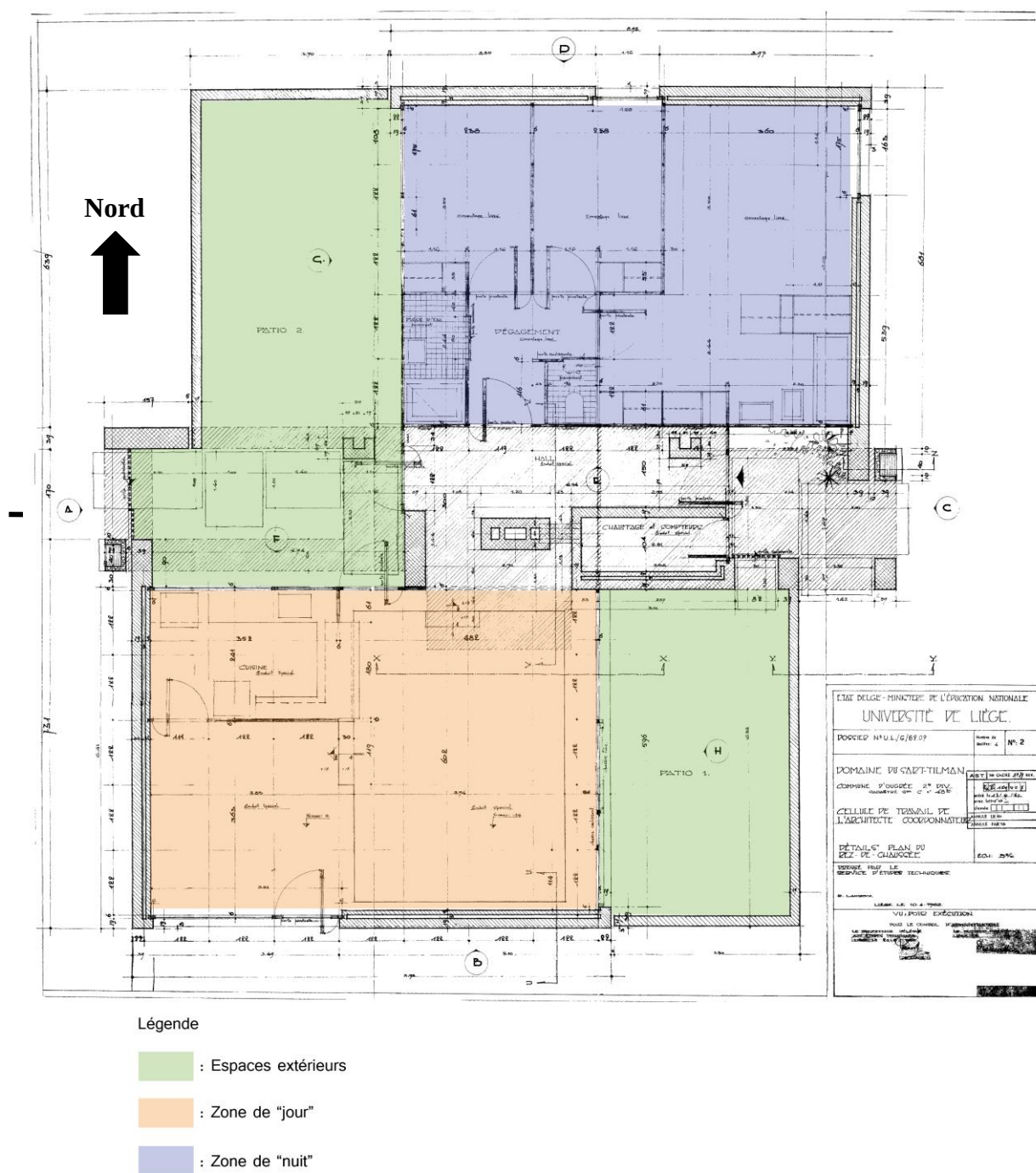


Figure 11 - Localisation de la Maison Strebelle (ULg)

Cette construction, datant des années 1960, s'inscrit donc dans la première période d'édification du site. Les deux grands principes conceptuels définis précédemment pour cette période peuvent être identifiés pour ce bâtiment : une géométrisation des formes ainsi qu'une intégration forte à la nature.

L'étude précise de ce bâtiment a commencé par la récolte des documents architecturaux nécessaires à la bonne compréhension du bâti. Bien que peu d'informations soient disponibles, les documents récoltés auprès de l'Administration des Ressources immobilières de l'Université de Liège permettent d'émettre certaines hypothèses quant à l'évolution de la construction. Le

document le plus ancien relatif à la Maison Strebelle date du 10 avril 1962. Il s'agit d'un premier tracé de plans d'exécution dont le plan principal est représenté sur la Figure 12 ci-dessous. L'ensemble des plans d'exécution disponibles sont présents dans la partie annexe (Annexe 1) de ce travail. Ceux-ci ont été dressés par la cellule de travail de l'architecte coordonnateur Claude Strebelle lui-même, puis approuvés par le Conseil d'Administration de l'Université de Liège et par le recteur de l'époque Marcel Dubuisson.



Le repérage couleur dessiné sur la Figure 12 précédente permet de comprendre la structure de l'habitation. Celle-ci s'articule autour d'un axe central ouest-est qui scinde la construction en deux zones distinctes. Sur cet axe se positionnent les séquences d'entrée (à l'est) et de sortie vers le jardin (à l'ouest). La zone centrale comprend un sas d'entrée ainsi qu'un local technique destiné à accueillir la chaufferie. Elle permet de donner accès à deux espaces aux fonctions bien différentes. La zone bleue correspond à la « zone de nuit » qui contient trois chambres et deux salles de bain. La zone orange correspond quant à elle à la « zone de jour » contenant les fonctions de cuisine et living. Deux patios cloisonnés (zones vertes) terminent la volumétrie du bâtiment pour offrir un espace extérieur pour chacune des deux zones précitées. On voit ainsi qu'un des principes majeurs, énoncés dans la partie précédente, est rencontré dans le plan : la géométrisation des formes. Effectivement, vu de l'extérieur, le bâtiment est constitué d'un simple parallélépipède. Le second principe d'intégration à la nature est atteint par la recherche de matériaux utilisés mais par aussi par le contexte dans lequel il s'implante. En outre, la faible hauteur de la construction (un seul niveau) participe à l'intégration au site en suscitant un ancrage au sol, une horizontalité marquée.

Cette version du plan présentée ne correspond néanmoins pas à la situation actuelle du bâtiment. Un relevé du bâtiment, dressé le 12 juin 1969, est représenté sur la Figure 13 suivante. Il montre une configuration spatiale identique à la configuration d'aujourd'hui.



Figure 13 - Plan du rez-de-chaussée : Juin 1969 (ARI)

Un volume supplémentaire apparaît par rapport au quadrilatère originel. Il est repéré en orange sur la Figure 13. Ce dernier contient un garage, une buanderie, une chaufferie ainsi qu'un bureau. Il est difficile de savoir si cette extension a été construite simultanément au premier volume bâti mais il est certain que cet ajout a suivi les mêmes principes de composition. Certains indices laissent penser que la construction de cette extension fût légèrement postérieure à la première version du plan d'exécution. Citons quelques exemples qui peuvent étayer cette hypothèse. Un premier élément apparaissant sur plan est le transfert de la chaufferie vers cette extension, juste à côté du garage. La cheminée de la version du plan de 1962 n'ayant plus aucune raison d'être dans le plan de 1969, il semble peu probable que la construction de l'extension soit contemporaine à celle du corps principal (où le local chaufferie est transformé en local compteur et débarras). Un autre élément qui marque une différence entre périodes de construction réside dans la manière dont l'extension s'imbrique dans le corps principal. Le patio situé à l'est a été largement agrandi pour être orienté davantage vers le sud. Sur site, la limite entre patio de 1962 et patio de 1969 se remarque par une différence de hauteur. Cette différence est perceptible sur la Figure 14 suivante, il s'agit d'une marche en béton qui pourrait être la fondation du mur cloisonnant la frontière du patio de 1962.

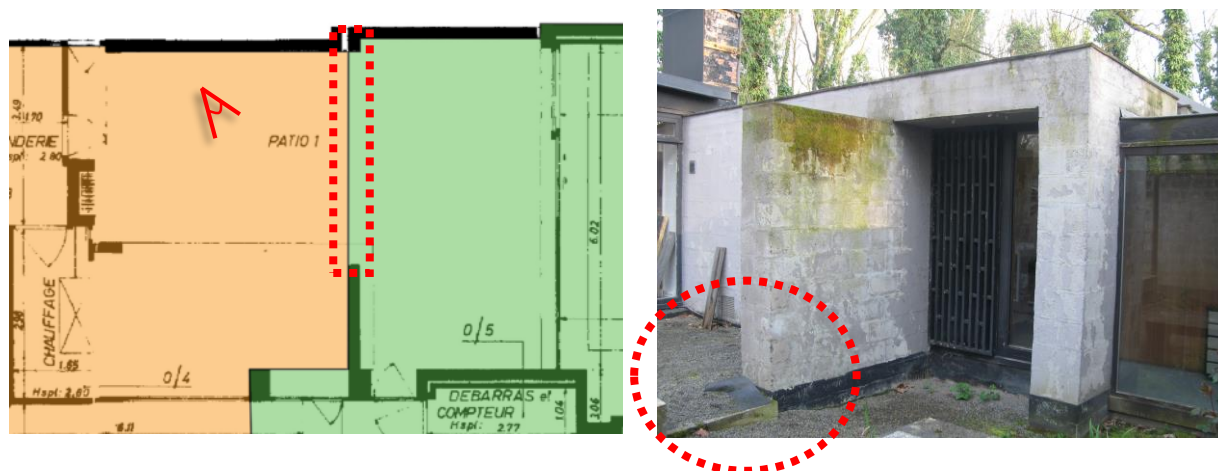


Figure 14 - Position du mur cloisonnant le patio de 1962 (ARI)

Un autre élément réside dans l'utilisation des matériaux à l'intérieur de la maison. Pour le volume principal, le bois est essentiellement présent sous forme de lambris, recouvrant les parois de blocs de béton. Dans cette extension, aucun lambris de bois n'est présent et toutes les parois sont réalisées en blocs de béton apparents.

A contrario, certains éléments du bâtiment laissent sous-entendre une construction simultanée des deux volumes de l'habitation. Certains détails d'architecture particuliers sont présents dans les deux ailes de la construction. Par exemple, des colonnes particulières en forme

de « U » sont utilisées dans les deux parties. La Figure 15 ci-dessous montre une de ces colonnes sur la façade d'accès principal du bâtiment (côté ancien garage). Ces colonnes imposantes n'ont qu'une fonction : assurer la descente des eaux pluviales des toitures. Il est intéressant de remarquer que cette colonne est identique à celles implantées selon le plan antérieur de 1962.

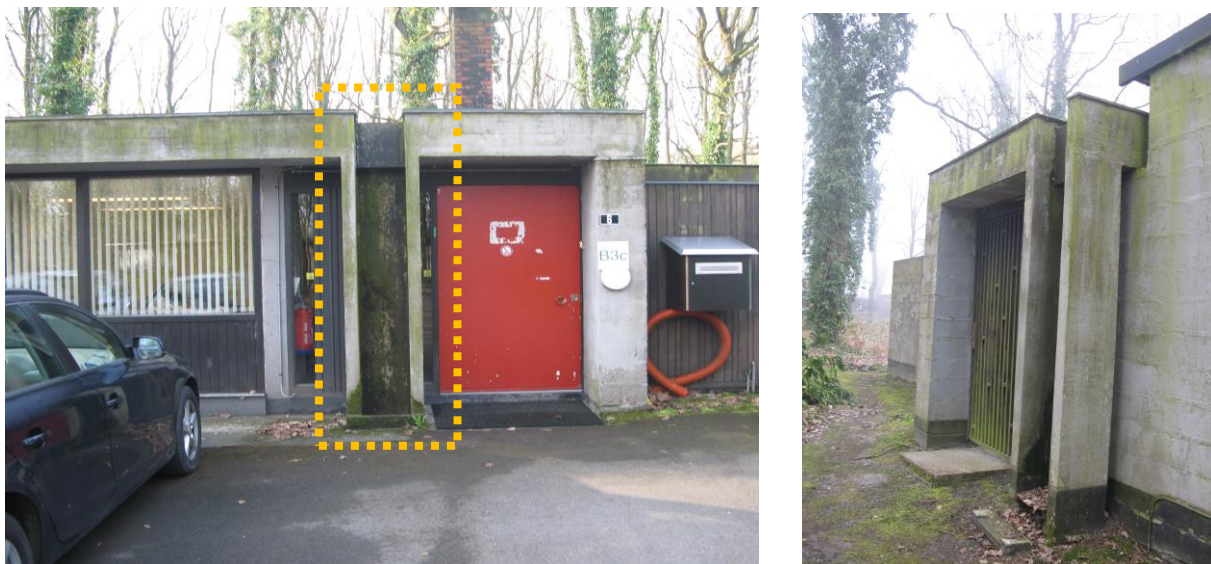


Figure 15 - Façade Nord (à gauche) et façade Ouest (à droite), vue de colonnes en forme de "U"

Un autre élément est l'utilisation harmonieuse de la même typologie de châssis en bois. Bien que ceux-ci ont probablement été remplacés à une époque (comme en témoigne l'absence de porte d'accès au garage ou encore la présence simultanée de simple et de double vitrage), l'utilisation des mêmes matériaux participe à la perception d'une seule et même entité architecturale.

Finalement, que cette adjonction soit simultanée ou postérieure à la construction du bâtiment correspondant au plan de 1962, il apparaît clairement que la logique de composition est similaire. Même si la séquence d'entrée est déplacée vers une façade différente sur la version du plan de 1969, le plan fonctionne de la même manière. Un axe central ouest-est dessert non plus deux zones distinctes, mais bien trois zones : une zone « nuit », une zone « jour » ainsi qu'une zone davantage technique qui contient notamment la chaufferie et le garage.

Intéressons-nous désormais aux différents matériaux façonnant l'ancienne unité d'habitation de l'architecte. Les matériaux utilisés sont similaires à ceux employés pour la construction des bâtiments du campus à cette époque. Le béton assure une forme de cohérence entre les différents bâtiments du site du Sart Tilman. La Maison Strebelle n'échappe pas à la règle puisque toute l'enveloppe est conçue en blocs de béton préfabriqués. Outre cette fonction de cohésion entre bâtiments, le béton permet naturellement d'atteindre une certaine simplicité, tant formelle que structurelle, rencontrée dans les bâtiments de la première phase de construction du site du Sart Tilman. Cette simplicité est également un élément qui participe à l'intégration de la construction dans son contexte très boisé. Des ardoises en fibres-ciment sont présentes sur un pan de façade, du côté sud de l'habitation (voir Figure 16).



Figure 16 - Vue de la façade sud

La minéralité de ces matériaux induit une certaine forme de durabilité, un rapport au sol marqué comme un ancrage mais aussi et surtout un rapport à la nature important et souhaité par l'architecte.

Cette nature est aussi suggérée à l'intérieur de l'habitation. L'emploi de panneaux de bois préfabriqués comme revêtement mural rappelle la localisation du bâtiment tout en travaillant sur une atmosphère plus appréciable, plus chaleureuse pour une habitation. La Figure 17 suivante montre comment les panneaux sont employés et intégrés à la composition, tant en revêtement de mur qu'au plafond, ou dans la création du mobilier.



Figure 17 - Utilisation du bois à l'intérieur : revêtement et mobilier

Il est intéressant de noter certains détails architecturaux au sein du bâtiment. Les portes intérieures font parties intégrantes des parois et traduisent, dans une certaine logique, une forme de simplicité (Figure 18). Celles-ci font généralement la hauteur totale sous-plafond et sont coulissantes ou pivotantes autour d'un axe vertical. Elles offrent ainsi un passage libre d'environ un mètre. Les poignées de porte sont en cuir et se font discrètes. De façon générale, nous pouvons noter que l'ornementation laisse place à l'homogénéité, la rationalité reconnue de l'époque ainsi que la recherche de fonctionnalité dans les formes et l'utilisation de l'espace.



Figure 18 - Détail de porte intérieure pivotante

Nous pouvons conclure cette description de la Maison Strebelle en synthétisant les grandes caractéristiques architecturales rencontrées. Il semble essentiel, dans le cadre du projet de rénovation de ce bâtiment, de tenir compte de ces quelques aspects fondamentaux.

Le premier de ceux-ci est rencontré dans le rapport existant entre le bâtiment et son contexte. Les matériaux choisis, les teintes ainsi que la volumétrie simple et très étirée de la construction ancrent la maison dans la nature avoisinante. La minéralité extérieure, très marquée en façade, l'utilisation de toitures plates, tout comme les proportions des ouvertures et les rapports « pleins/vides » perceptibles depuis l'extérieur du bâtiment, participent aussi à incorporer le bâtiment dans son environnement. De plus, l'orientation verticale des panneaux

de bois des façades non portantes des patios ou encore la présence des cheminées ponctuent cet effet d'ancrage au sol par une verticalité qu'on retrouve naturellement dans la forêt avoisinante.

L'image d'un « abris » est perceptible dans la découverte de ce bâtiment. Depuis l'extérieur, il paraît très cloisonné et renfermé sur lui-même. Les murs en béton qui referment les deux patios et la proportion des ouvertures vers les façades périphériques participent à intimiser l'espace de l'ancienne habitation. Par contre, depuis l'intérieur, de larges baies sont présentes et suscitent la continuité des espaces intérieurs avec le jardin privé du patio principal. Des percées verticales dans les murs d'enceinte de ce patio permettent de lier visuellement ce jardin privatif avec la forêt avoisinante. On comprend l'intérêt de prôner une recherche d'intimité dans le cas de la Maison Strebbelle. Même si celle-ci n'est plus forcément nécessaire pour la fonction actuelle du bâtiment, il convient de conserver cette image.

La fonctionnalité de l'espace s'exprime quant à elle de différentes manières. Dans le plan, les formes sont simples, géométriques et justement dimensionnées selon leurs fonctions originelles. A l'extérieur, les colonnes massives récoltant les eaux de pluie sont clairement mises en valeur pour deux raisons principales. D'une part, elles sont complètement désolidarisées de la peau du bâtiment. D'autre part, elles marquent soit une entrée dans l'habitation, soit une sortie vers le patio ou vers l'extérieur de l'enceinte. Même si de telles infrastructures sont surdimensionnées par rapport au rôle qu'elles doivent remplir, elles participent à la lecture globale du bâtiment.

La recherche de la simplicité apparaît également à l'intérieur du bâtiment, tant dans le traitement des parois que dans la mise en œuvre du mobilier. L'axe principal desservant les différents espaces de la construction se poursuit vers l'extérieur. Il s'agit d'un axe visuel et physique en connexion directe avec la forêt. Les matériaux utilisés à l'intérieur du bâtiment rappellent encore cette notion de lien avec la nature tout en proposant une atmosphère plus chaleureuse que celle pouvant être initialement perçue depuis l'extérieur. Cet espace intérieur se veut géométrique mais surtout simple, efficace et fonctionnel. Les armoires et le mobilier de l'ancienne habitation doivent être conservés pour continuer à percevoir la fonction originelle de la construction.

Dans la partie suivante de ce travail, nous aborderons la procédure d'audit énergétique et thermographique réalisée pour ce bâtiment, témoin de l'époque moderniste du siècle dernier, avant d'en tirer une proposition de rénovation en adéquation avec ce patrimoine architectural.

Chapitre 4 : Audit énergétique

Pour rappel, la méthode suivie dans le cadre de la réalisation de l’audit énergétique de la Maison Strebelle correspond à celle décrite par l’ADEME dans son cahier des charges « type » (ADEME, 2014). Cette méthodologie est comparable à celle suivie et appliquée par Giuliano Dall’O’ dans ce qu’il nomme l’ « audit standard » (Dall’O’, Green Energy Audit of Buildings, A Guide for a Sustainable Energy Audit of Buildings, 2013, p. 38). La structure utilisée dans le cadre de ce travail varie par rapport à celles définies ci-avant mais le contenu s’appuie sur la définition d’un audit énergétique selon ces différentes sources.

Nous commencerons donc par décrire la situation existante sous tous ses aspects : occupation actuelle, énergie disponible, systèmes mis en place, description de l’enveloppe et des parois et consommations énergétiques. Sur la base de ces descriptions, une modélisation thermique dynamique sera réalisée en vue de pouvoir développer des solutions de rénovation en adéquation avec le bâtiment.

4.1. Présentation générale de l’établissement

Pour analyser la situation initiale de façon pertinente, la première étape de cet audit a consisté à recueillir un maximum d’informations sur le bâtiment et son contenu. L’Administration des Ressources Immobilières nous a donc fourni tous les documents dont elle disposait pour assurer cette mission. Ensuite, plusieurs inspections et visites ont été réalisées pour recueillir les informations manquantes nécessaires. Un reportage photographique partiel des lieux est d’ailleurs présent en partie annexe de ce travail (Annexe 2).

4.1.1. Affectation et occupation actuelle

Avant de rentrer dans les détails de construction de la Maison Strebelle, il est important de préciser l’utilisation actuelle de ce bâtiment. Effectivement, celui-ci n’a plus une fonction d’habitation mais bien celle de bureau pour la cellule planification de l’Administration des Ressources Immobilières de l’Université de Liège. Un aménagement particulier a donc été réalisé pour transformer cette habitation. La Figure 19 représente le plan actualisé de la maison avec la répartition actuelle des différents bureaux.

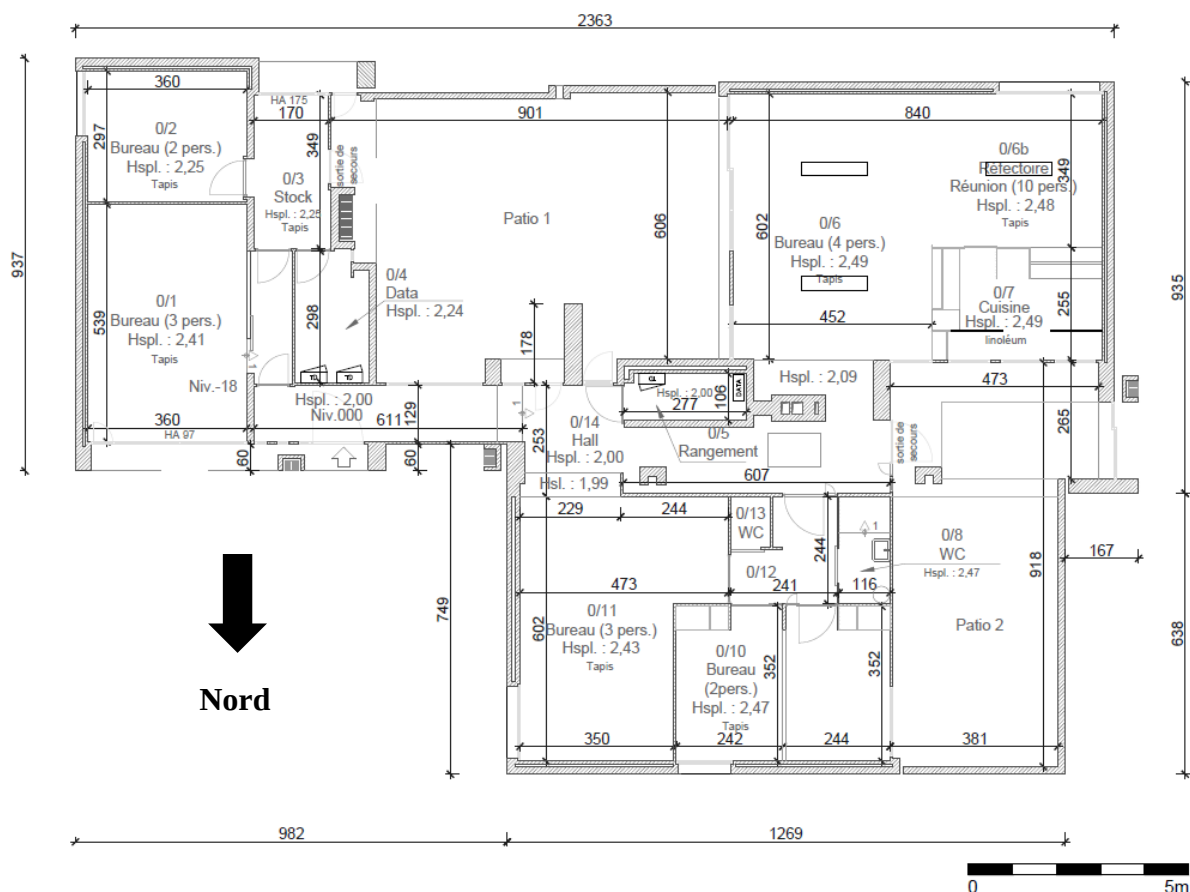


Figure 19 - Configuration spatiale actuelle

Nous voyons que 14 personnes utilisent ce bâtiment, occupé à l'origine par une seule famille. Toutes les fonctions initiales de l'habitation ont été transformées, sauf les fonctions telles que les sanitaires ou encore la cuisine qui servent encore aujourd'hui au personnel de l'administration.

L'utilisation actuelle de la construction est ainsi bien différente de l'occupation originelle, tant au niveau du nombre de personnes présentes que de l'horaire d'occupation. Il s'agit aujourd'hui d'une occupation journalière suivant l'horaire mis en place par l'administration. Le bâtiment est occupé du lundi au vendredi, de 9h00 à 17h30 excepté durant les périodes de congé. L'occupation est un paramètre important puisque les conditions hygrothermiques actuelles ne correspondent pas à celles rencontrées initialement. Ces conditions peuvent, par exemple, induire une nécessité de conditionner l'air pour éviter une concentration trop importante de polluants. Nécessité qui n'existait certainement pas à l'origine. Ce paramètre sera discuté dans l'analyse du confort des occupants, plus loin dans l'audit énergétique (voir Chapitre 4 – point 4.4).

La structure de l'ancien garage, à l'est de la construction, est composée d'une dalle de béton armé coulée sur place, comme en témoigne les traces de planches ayant servi à coffrer le béton lors de sa mise en œuvre. Ces traces sont visibles depuis l'extérieur, en tête de mur, mais aussi à l'intérieur au niveau des plafonds de ce volume. De la même façon, la toiture de la zone centrale du bâtiment est réalisée en béton armé coulé sur place. Ces deux toitures sont plates tandis que les toitures des deux volumes restants, repérés en vert sur la figure précédente, sont en légère pente. Les poutres primaires de ces toitures, réalisées en lamellés collés, s'appuient d'une part sur les façades principales nord et sud, et d'autre part en bordure de la zone centrale. La composition des éléments de la structure est précisée dans la description des compositions de parois (voir Chapitre 4 – point 4.2.1).

4.2. Analyse de la situation existante

Détaillons désormais tous les éléments constitutifs du bâtiment : l'enveloppe, les systèmes de chauffage, de production d'eau chaude sanitaire, de ventilation ainsi que l'éclairage installé. Précisons que toutes ces données sont basées sur l'analyse des documents fournis par l'Administration des Ressources Immobilières, des visites sur site ou encore à partir d'interprétations induites par la réalisation de mesures in situ.

4.2.1. Enveloppe

Distinguons les différentes parois déperditives du bâtiment et décrivons successivement les murs extérieurs, les toitures, les dalles de sol et les châssis. La question de l'étanchéité de l'enveloppe sera discutée dans la section relative à l'audit thermographique (voir Chapitre 4 – point 4.5) du bâtiment.

4.2.1.1. Murs extérieurs

Comme précisé dans l'analyse architecturale du chapitre précédent de ce travail, le bâtiment est essentiellement constitué de blocs de béton préfabriqués. La Figure 21 ci-après détaille la composition générale des murs : un bloc creux de béton de dimensions **L39xI9xh19** cm en guise de parement extérieur, une coulisse de 5 cm (a priori non isolée) et un bloc de dimensions **L39xI9xh19** cm comme finition intérieure. La finition intérieure peut également consister en l'application d'un lambris de plaques de bois stratifié sur un lattage fin. La valeur du coefficient de transmission thermique **U** calculé pour ce type de mur de façade est de **2,5**

[W/m².K]. Il est intéressant de noter qu'une couche de peinture recouvrait initialement tous les murs extérieurs de béton. Cette dernière, probablement filmogène¹³, est fortement dégradée aujourd'hui.

Certains murs de façade non porteurs sont réalisés selon un principe courant de structure bois de faible épaisseur. La Figure 22 ci-dessous illustre le principe structurel de ces éléments de façade. Une structure principale de chevrons verticaux espacés de 60 [cm] supporte des panneaux de bois. Cette ossature a été supposée isolée, pour un coefficient de transmission thermique **U** de **0,9** [W/m².K].

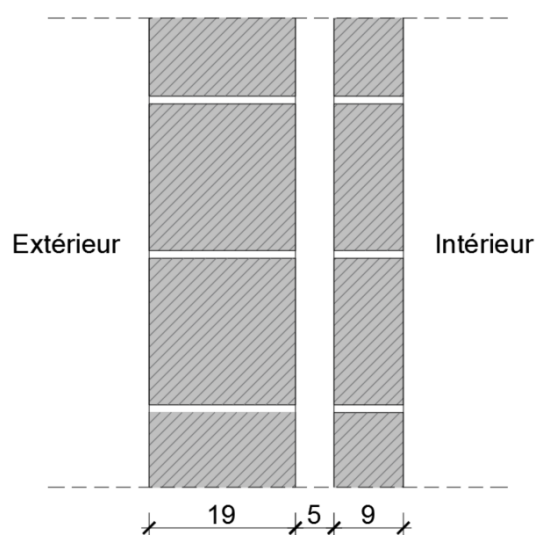


Figure 21 – Coupe verticale : composition des murs de façade



Figure 22 - Exemple de façade en structure bois et coupe horizontale

4.2.1.2. Toitures

Comme déjà mentionné précédemment, deux types de structure de toiture coexistent pour ce bâtiment. Les toitures plates sont composées d'une dalle de béton, d'un béton de pente et d'une membrane d'étanchéité bitumineuse en partie supérieure.

¹³ Des traces d'humidité font éclater cette couche ce qui laisse supposer qu'il s'agit d'une peinture « non respirante ».

Les toitures des deux volumes principaux sont en légère pente et la composition de ces parois est représentée sur la Figure 23 ci-dessous.

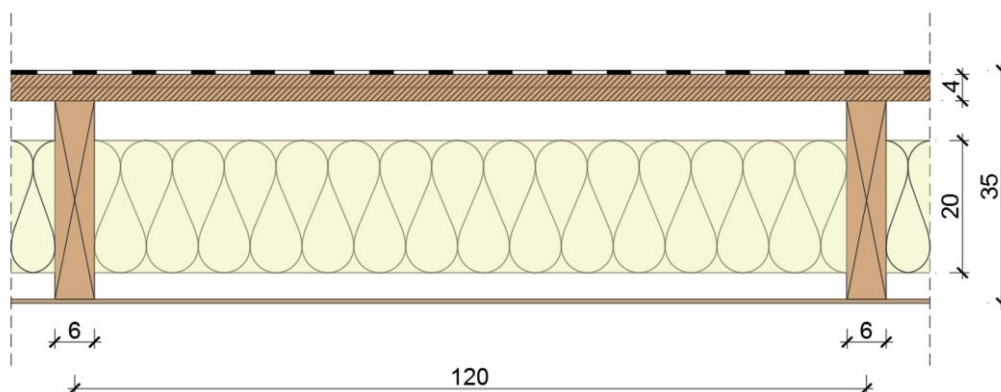


Figure 23 - Coupe verticale : détail des toitures en pente

Des poutres maitresses à inertie variable¹⁴ en bois lamellé collé, espacées d'environ 120 [cm] franchissent des portées de 600 [cm]. Certaines de ces poutres sont visibles dans leur entièreté notamment au niveau des façades en structure bois, non porteuses, parallèles au sens de portée (voir Figure 24 ci-dessous).



Figure 24 - Vue d'une poutre à inertie variable sur la façade est côté intérieur du patio 1

¹⁴ Permettant de créer la pente de ces toitures.

La Figure 25 ci-contre montre l'about d'une de ces poutres maîtresses de toiture.

Il est à noter que le détail de ces toitures possède un certain degré d'incertitude. En effet, l'entraxe est déduit d'une coupe tirée de la première version des plans d'exécution (voir Annexe 1) mais la thermographie infrarouge (voir Chapitre 4 – point 4.5) réalisée au sein du bâtiment montre un espacement plus réduit. Aucun accès n'a permis de

vérifier la structure exacte de ces toitures, excepté à un endroit, où l'épaisseur de l'isolation en laine de verre a pu être vérifiée. De la même façon, un système d'étrésillon est certainement présent entre ces poutres maîtresses pour empêcher le déversement. Il n'est pas possible, sans dégagements préalables, de vérifier la structure exacte de ces toitures. L'étanchéité supérieure, tout comme pour les toitures plates en béton, est réalisée à l'aide d'une membrane bitumineuse placée sur une double couche de panneaux multiplex de 20 [mm].

La composition précitée a donc été retenue et donne un coefficient de transmission thermique U calculé de 0,23 [W/m²K].

4.2.1.3. Dalles de sol

Les dalles de sol suivent toutes une composition semblable. Pour les deux volumes principaux, des vides ventilés d'une trentaine de centimètres sont surplombés de hourdis en béton. Une chape de compression recouvre ceux-ci et la finition supérieure est constituée, selon les endroits, soit d'un linoléum (dans les locaux sanitaires), soit d'une moquette (pour le reste des planchers). Pour le volume de l'ancien garage, le niveau du sol étant inférieur au reste de l'habitation, il semble qu'aucun vide ventilé ne soit présent. Il s'agirait plutôt d'une dalle sur terre-plein recouverte d'une chape et d'un revêtement de surface en moquette.

La valeur du coefficient de transmission thermique U pour ces parois a été calculée et vaut 2,177 [W/m²K].



Figure 25 - About de poutre de toiture en lamellé-collé

4.2.1.4. Châssis et vitrages

L'ensemble des châssis et portes du bâtiment sont en bois massif. Les vitrages, quant à eux, varient en fonction de la situation. Certaines baies sont assorties d'un simple vitrage d'une épaisseur de 4 [mm] tandis que d'autres, très ponctuelles, possèdent un double vitrage. Celles-ci ont probablement été modifiées durant la vie du bâtiment.

Les coefficients de transmission thermique des vitrages et des cadres peuvent être répertoriés en fonction de périodes de construction (Giebeler, et al., 2012) suivant le Tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 - Performances énergétiques des fenêtres et dates de construction (Giebeler, et al., 2012)

Type de fenêtre	Année de construction	Fenêtre U_w [W/m²K]	Vitrage U_g [W/m²K]	Châssis U_f [W/m²K]	Valeur g coefficient global de transmission thermique [-]
Châssis bois avec vitrage simple	jusqu'en 1960	5,0	5,8	1,6-2,2	0,9-0,85
Fenêtre caisson avec deux vitrages simples	1870-1945	2,6-2,8	2,8	1,6-2,3	0,8-0,76
Fenêtre double avec deux vitrages simples	1950-1965	2,5-2,7	2,8	1,6-2,2	0,8-0,76
Châssis bois avec double vitrage isolant	1960-1985	2,6-2,7	3,0-2,8	1,6-2,0	0,8-0,76
Châssis PVC avec double vitrage isolant	1965-1985	2,6-3,0	3,0-2,8	1,6-2,5	0,8-0,76
Châssis aluminium avec double vitrage isolant	1965-1985	3,2-4,3	3,0-2,8	3,5-7,0	0,8-0,76

Les châssis bois assortis de simple vitrage ont donc les propriétés suivantes :

- U_g (vitrage) = 5,8 [W/m²K]
 - U_f (cadre en bois) = 1,6-2,2 [W/m²K]
 - Facteur solaire g = 0,85 [-]
- U_w (fenêtre) = 5 [W/m²K]

Les châssis bois recevant des doubles vitrages ont quant à eux les propriétés :

- U_g (vitrage) = 3-2,8 [W/m²K]
 - U_f (cadre en bois) = 1,6-2,2 [W/m²K]
 - Facteur solaire g = 0,8-0,76 [-]
- U_w (fenêtre) = 2,6 [W/m²K]

4.2.2. Chauffage

Décrivons désormais le système de chauffage en place dans la Maison Strebelle. Contrairement à une procédure d'audit classique où les postes de production, de distribution, d'émission et de régulation sont analysés et décrits séparément, la configuration sur site permet de simplifier l'analyse. Effectivement, le système de chauffage suit un principe de



Figure 276 - Convecteur à gaz

chauffage localisé. Des convecteurs à gaz, datant de 1987, assurent les fonctions de production et d'émission. Un de ces convecteurs est représenté sur la Figure 26 ci-dessus. Le gaz est brûlé dans chaque appareil d'où la nécessité de ventouses qui permettent à la fois l'apport d'air neuf, nécessaire à la combustion, mais aussi l'évacuation des gaz issus de cette combustion. Ces ventouses sont visibles sur chacune des façades et un exemple est montré sur la Figure 27 ci-après. Il n'y a pas de phase de distribution (si ce n'est l'amenée du gaz naturel jusqu'à chaque convecteur) puisqu'il n'y a pas de transport d'un fluide caloporteur. Il n'y a pas non plus de phase de régulation et les convecteurs fonctionnent uniquement par allumage manuel. Deux types de convecteurs sont rencontrés et possèdent des puissances différentes. Les petits locaux à faible demande énergétique bénéficient de convecteurs de 1,2 [kW] de puissance. Dans les locaux plus importants, nécessitant une plus grande puissance de chauffe, des convecteurs à gaz de 3,7 [kW]¹⁵ sont établis. La puissance totale installée pour le chauffage au sein du bâtiment atteint donc environ 32 [kWh]. L'implantation de ces différents convecteurs est représentée sur la Figure 28 ci-après.



Figure 267 - Ventouse de convecteur à gaz

¹⁵ La date de construction et la puissance des convecteurs sont issues des plaquettes d'identifications des convecteurs.



Figure 28 - Schéma d'implantation des convecteurs à gaz

4.2.3. Eau chaude sanitaire

La production d'eau chaude sanitaire est réalisée par l'intermédiaire d'un boiler de la marque « Neotherme 3 », d'une capacité de 100 litres et d'une puissance de 1500 [W]. La consommation pour le bâtiment est relativement faible et très ponctuelle. La distribution d'eau est assurée par un réseau de tuyaux en cuivre.

4.2.4. Ventilation et refroidissement

Aucune ventilation n'est installée dans le bâtiment, excepté dans les sanitaires. Il s'agit d'un simple extracteur d'air s'activant uniquement au moment où l'interrupteur contrôlant le luminaire est actionné. L'air est directement extrait vers l'extérieur.

4.2.5. Eclairage

L'éclairage des locaux se fait majoritairement au moyen de tubes fluorescents de la marque OSRAM, de 150 [cm], de type T8 (diamètre de 2,6 [cm]) et d'une puissance de 58 [W]. Les tubes possèdent les principales caractéristiques listées dans le Tableau 3 suivant. Ces données proviennent du fabricant.

Tableau 3 - Données des TL T8 en place dans le bâtiment

Puissance nominale	58 [W]
Efficacité lumineuse	90 [lm/W]
Indice de rendu des couleurs	> 80
Flux lumineux	5200 [lm]
Température de couleur	3000 [K]
Durée de vie	18000 [h]

La puissance totale installée dans le bâtiment est donc de 1700 [W] pour les 30 points lumineux.

Notons qu'aucun système de détection automatique n'est installé dans le bâtiment, toutes les commandes sont manuelles

4.3. Consommations énergétiques

Peu d'informations étaient disponibles auprès de l'Administration des Ressources immobilières de l'Université de Liège en ce qui concerne les consommations énergétiques. En effet, la Maison Strebelle ne dispose pas d'un compteur électrique indépendant, qui permettrait de connaître les consommations en électricité du bâtiment. Néanmoins, nous avons pu obtenir les consommations de gaz trimestrielles, représentées dans le Tableau 4 suivant.

Tableau 4 - Consommations de gaz (ARI)

	Janvier – Mars [kWh]	Avril – Juin [kWh]	Juillet – Septembre [kWh]	Octobre – Décembre [kWh]	TOTAL [kWh]
2013	3233	1066	455	1789	6543
2014	922	274	274	758	228
2015	2211	1074	644	1821	5750

Ces données seront notamment utilisées pour calibrer le modèle de simulation thermique dynamique (voir Chapitre 5 – point 5.4) réalisé dans la partie suivante de ce travail.

De manière intuitive, il semble que l'année 2014 ne soit pas représentative de la consommation réelle du bâtiment en gaz. Le graphique représenté sur la Figure 29 suivante montre l'évolution de la consommation de gaz au cours de chaque année.

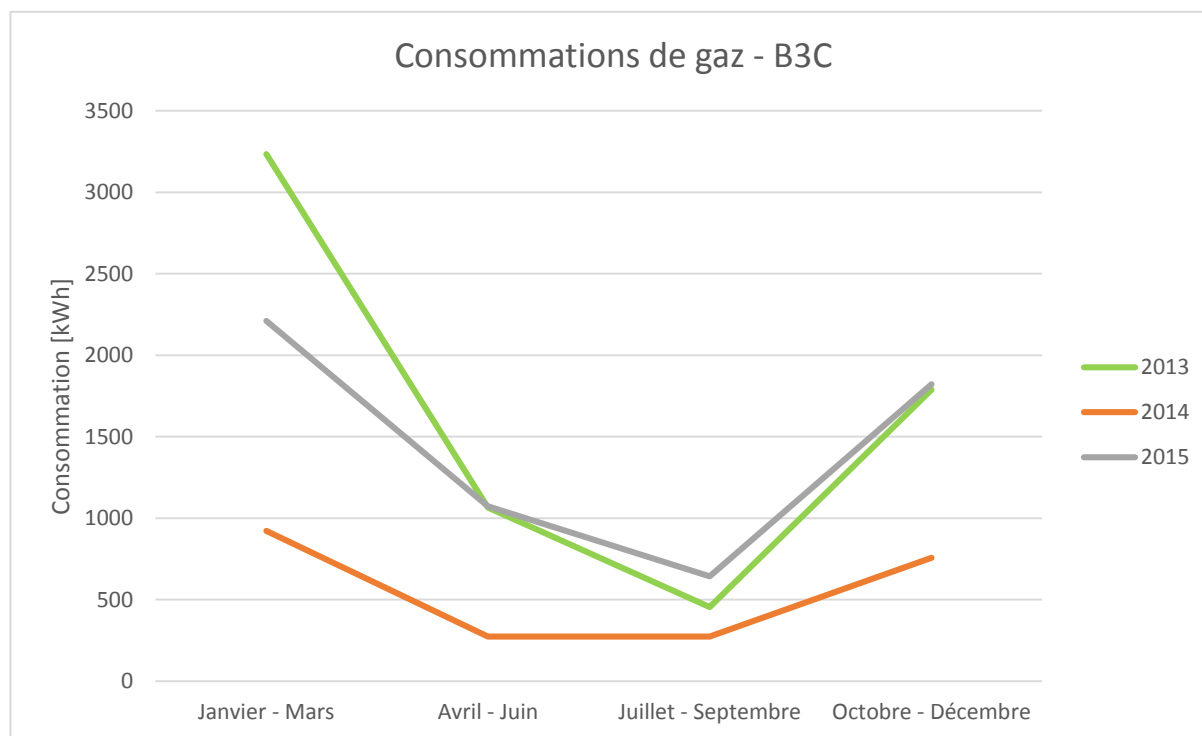


Figure 29 - Consommation de gaz pour le B3C

Les courbes suivent une tendance logique : un pic de consommation durant les mois les plus froids de l'année tandis qu'un minimum est bien localisé en été. On remarque également que les courbes des années 2013 et 2015 sont relativement proches, sauf pour le premier trimestre de l'année. La courbe qui correspond à l'année 2014 est quant à elle bien en-dessous des valeurs représentatives des années 2013 et 2015. En fait, l'occupation actuelle du bâtiment n'est en place que depuis une année et il est probable qu'une période d'inoccupation du bâtiment ait eu lieu dans le courant de l'année 2014. Ces valeurs seront donc exclues dans le processus de calibration du modèle de simulation thermique.

Aucune consommation en eau n'est disponible pour le bâtiment. Nous considérons donc une consommation typique d'eau par personne, pour un bâtiment de bureaux à faible occupation, de 2 à 6 litres par personne et par jour (Architecture et climat - Faculté d'architecture, s.d.).

4.4. Evaluation du confort

Le confort est un paramètre important à prendre en compte dans tout projet de rénovation. Pour évaluer ce paramètre, différentes mesures ont été effectuées. Nous étudierons donc tant le confort visuel que le confort hygrothermique des occupants. Pour ce faire, une campagne de monitoring a été mise en place au sein du bâtiment avec l'aide de « data loggers » de la marque Hobo, tels que représentés sur la Figure 30 ci-contre. Cet instrument permet de mesurer différents paramètres comme la température de l'air, l'éclairement, l'humidité relative ou encore la concentration en dioxyde de carbone.



Figure 30 - Data logger
Hobo

Sur chaque poste de travail a donc été placé un de ces capteurs suivant l'implantation représentée sur la Figure 31 ci-dessous.

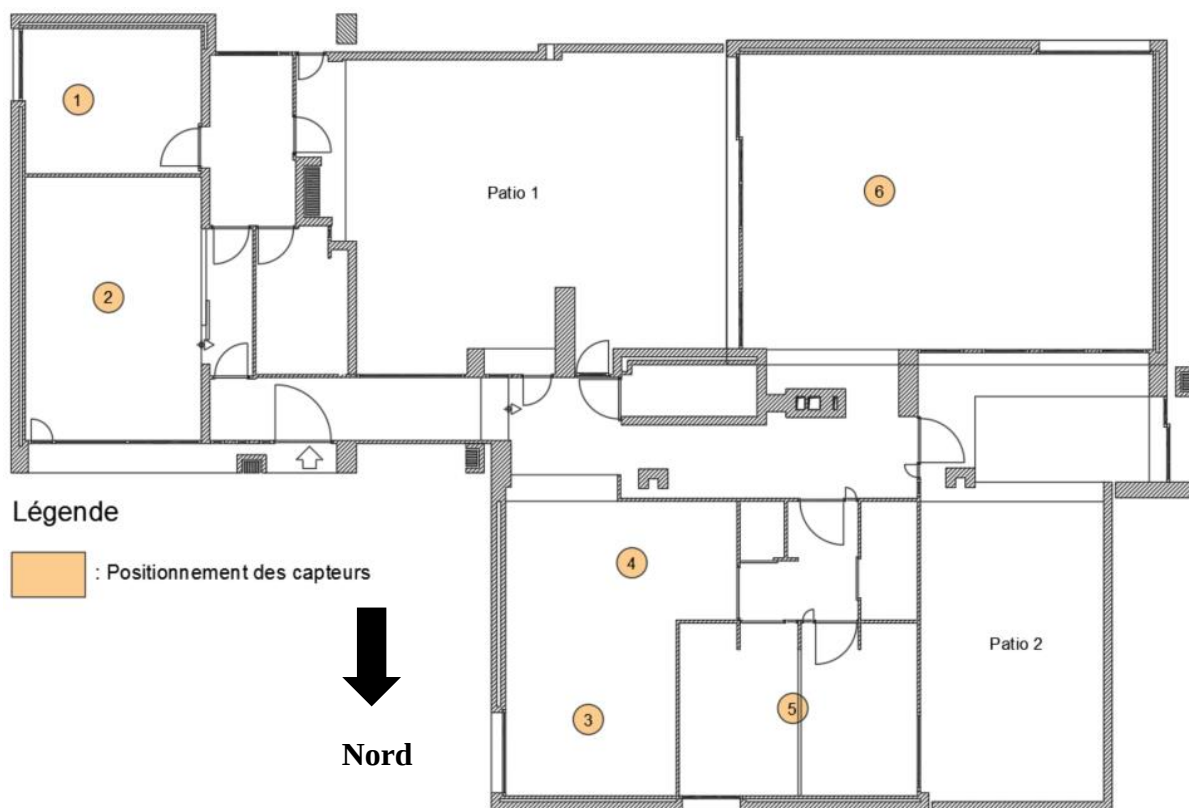


Figure 31 - Positionnement des capteurs "data logger"

Les mesures ont été prises selon un intervalle de temps de 5 minutes durant environ 3 semaines (du 24/03/2016 au 15/04/2016), ce qui représente approximativement 6350 mesures par capteur. Nos mesures permettent d'obtenir des profils relativement précis dans le temps.

4.4.1. Confort visuel

Pour l'évaluation du confort visuel des occupants, le critère analysé et mesuré est l'éclairement disponible sur le plan de travail, c'est-à-dire sur le bureau de chaque occupant. Rappelons que la norme belge « NBN EN 12464-1 : lumière et éclairage des lieux de travail » fixe l'éclairement minimum à maintenir sur le plan de travail à 500 [Lux] (Institut Belge de l'éclairage, 2007). Cette dernière fixe également un critère d'uniformité de l'éclairage à respecter. Ce critère ne sera pas examiné ici.

Détaillons les résultats obtenus pour le bureau n°1. La courbe d'éclairement mesurée est représentée sur la Figure 32 ci-dessous.

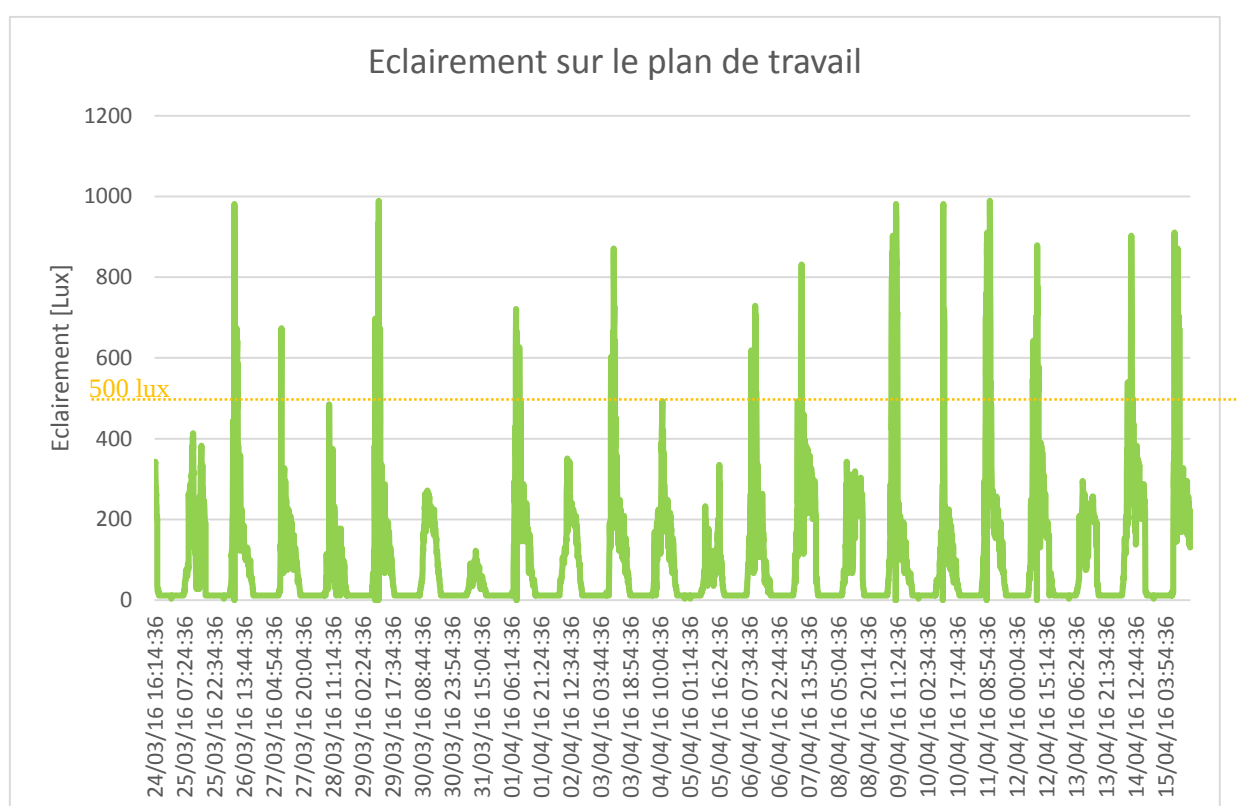


Figure 32 - Evolution de l'éclairement sur le plan de travail : Bureau 1

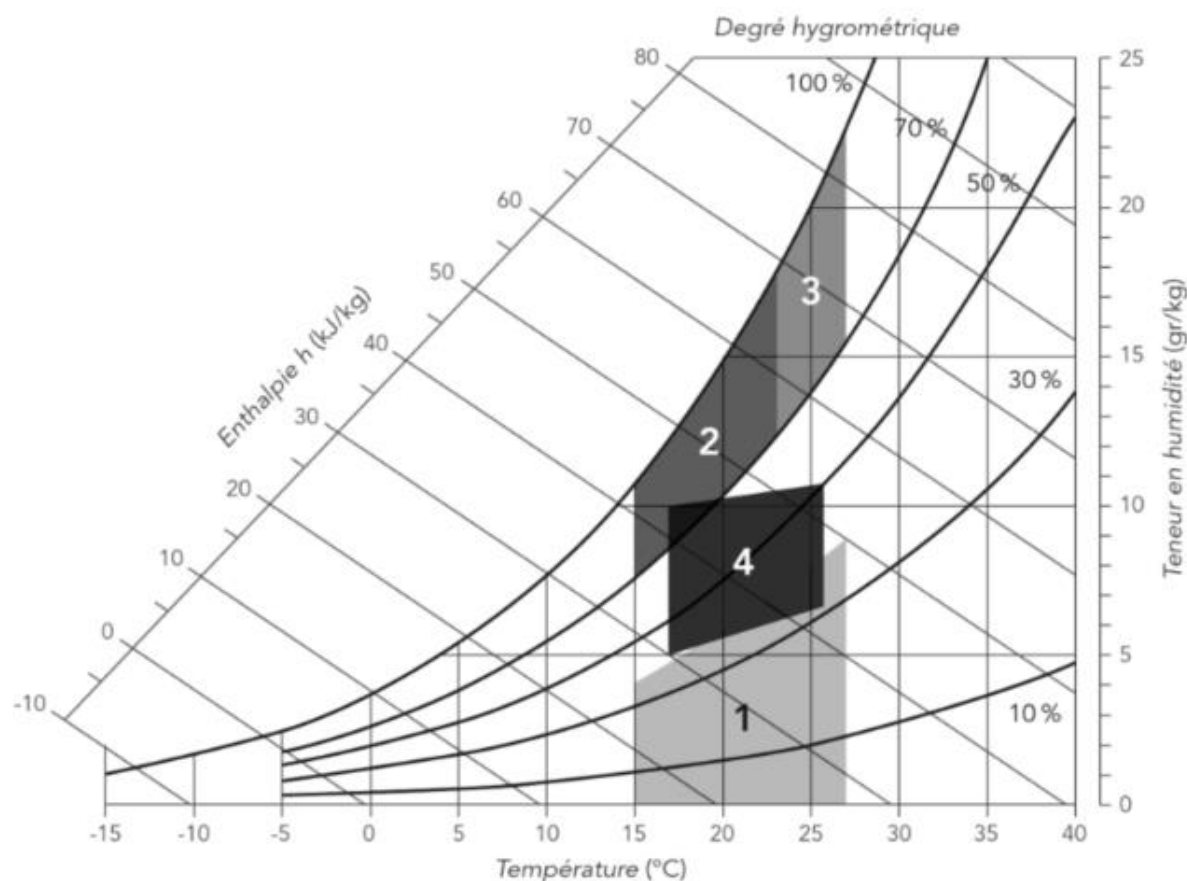
Nous voyons donc que le niveau requis de 500 [Lux] n'est que très rarement et très ponctuellement dépassé. Les pics visibles correspondent en fait à un ensoleillement direct mais bref du capteur en matinée. La moyenne de l'éclairement pour une journée de travail type (débutant à 9h00 et finissant vers 17h30-18h00) vaut à peine **192** [Lux] pour ce poste de travail. Il s'agit d'une valeur beaucoup trop faible, source d'inconfort important.

De façon générale, cette vérification d'éclairement a été réalisée pour les 6 implantations de capteurs et des résultats similaires apparaissent. Ceux-ci ne seront pas décrits ici mais sont

présents dans une partie annexe à ce travail (voir Annexe 3). L'éclairement moyen pour chaque poste de travail avoisine généralement les 200 [Lux] et varie légèrement en fonction de l'orientation du bureau. Une rénovation importante de l'éclairage est ainsi à inclure dans le projet de rénovation complet du bâtiment.

4.4.2. Confort hygrothermique

D'un point de vue hygrothermique, la récolte des données des capteurs a permis d'obtenir des informations sur le taux d'humidité relative de la pièce ainsi que sur la température de l'air, pour la période considérée. Ces variables permettent d'avoir une indication sur l'état thermodynamique dans lequel sont plongés les occupants. Si on se base sur le diagramme psychrométrique de la Figure 33 ci-dessous (Jedidi & Benjeddou, 2016, p. 17), on peut visualiser un polygone de confort hygrothermique.

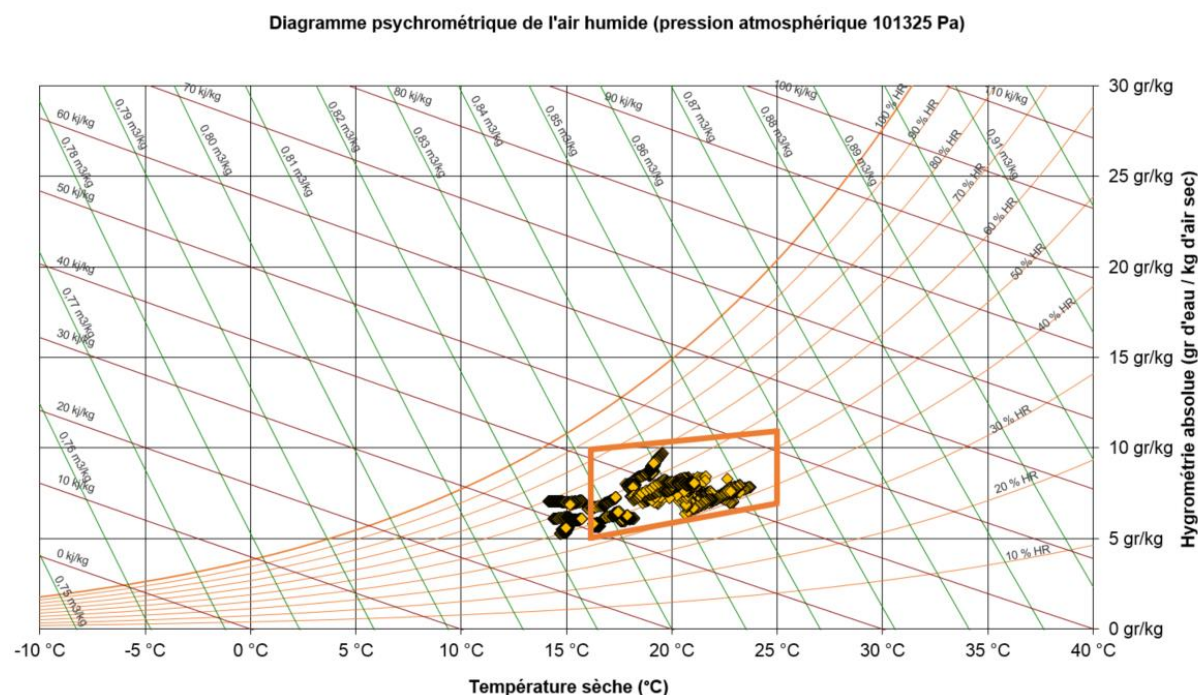


- 1 : Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.
- 2 et 3 : Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons.
- 3 : Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.
- 4 : Polygone de confort hygrothermique.

Figure 33 - Zone de confort hygrothermique (source : Jedidi & Benjeddou, 2016, p.17)

Tous les points inclus dans ce polygone de confort sont dans un état où les conditions de température et d'humidité sont satisfaisantes.

Il est donc possible de reproduire ce diagramme psychrométrique en y incluant la zone de confort et de vérifier si les mesures récoltées par les capteurs se positionnent à l'intérieur du polygone. Le diagramme, réalisé avec le tableur Excel, est représenté sur la Figure 34 ci-dessous. Ce dernier correspond aux mesures du capteur n°1, les autres résultats sont placés dans la partie annexe de ce travail (voir Annexe 3).



Les points orange sur ce diagramme correspondent aux points de mesure inclus dans l'horaire d'occupation habituelle d'une journée type (de 9h00 à 18h00). Toutes les mesures effectuées pendant la nuit et hors horaire d'occupation ne sont pas représentées puisqu'aucune contrainte de confort n'est nécessaire à ces moments. On voit qu'une série de points sont situés en dehors du polygone de confort. En comptabilisant le nombre d'occurrence où la mesure est hors zone de confort, on obtient 526 points. Ces 526 points correspondent à une période de 2630 minutes soit environ **44 heures**. La période de prise de mesures s'étendait sur une durée de **163 heures** (selon l'horaire de travail). On peut donc conclure que pour cette période de l'année, une situation d'inconfort est atteinte pendant près de **27 %** du temps de travail, ce qui n'est pas négligeable. Il est intéressant de préciser que le diagramme permet de voir quel paramètre est source d'inconfort. On observe que l'humidité n'entre pas réellement en compte dans la création d'une zone d'inconfort. Celle-ci oscille entre 40 % et 70 % d'humidité relative,

ce qui reste acceptable pour l'être humain, peu sensible à ces variations. Par contre, la température atteint régulièrement 15 °C, ce qui crée réellement une situation d'inconfort. Qui plus est, la période de prises de mesure ne correspond pas à la période la plus froide de l'année comme en témoigne la courbe de consommation de chauffage présentée plus tôt dans ce travail (Figure 29). Il serait intéressant de réaliser une campagne de monitoring durant cette période pour vérifier le pourcentage d'heures d'inconfort dû à la température et à l'humidité.

4.4.3. Qualité de l'air

Pour vérifier la qualité de l'air dans les différents locaux, les capteurs décrits précédemment ont été utilisés et programmés pour mesurer la concentration en dioxyde de carbone. Malheureusement, ces capteurs n'ont pas permis de vérifier le profil de concentration du dioxyde de carbone car les valeurs mesurées semblaient beaucoup trop faibles et irréalistes. Finalement, un indicateur de qualité d'air branché sur secteur a permis de mesurer très ponctuellement cette concentration. Elle avoisinait les 500-600 [ppm], ce qui correspond à une qualité d'air moyenne. La norme « NBN EN 13779 : la ventilation des bâtiments » classe les différentes qualités d'air en fonction des concentrations de dioxyde de carbone selon le Tableau 5 suivant.

Tableau 5 - Classification de la qualité de l'air (NBN EN 13779 : la ventilation des bâtiments)

Qualité de l'air	Niveau de CO2 [ppm]	
	Plage type	Valeur par défaut
INT 1 Excellente qualité	< 400	350
INT 2 Qualité moyenne	400-600	500
INT 3 Qualité modérée	600-1000	800
INT 4 Qualité basse	> 1000	1200

Puisqu'aucune ventilation n'est actuellement en place dans le bâtiment, cette concentration faible en CO2 peut témoigner d'une mauvaise étanchéité à l'air des parois et plus particulièrement des châssis de fenêtres. Cependant, cette mesure étant très ponctuelle, il peut être intéressant de procéder à un monitoring plus complet pour s'assurer que la concentration en polluant n'excède pas la valeur de 1000 [ppm] fixée par la PEB. Il pourrait également être utile de mesurer la concentration d'autres polluants tels que le formaldéhyde présent dans les panneaux de bois, vernis voire dans certaines moquettes.

4.4.4. Indices de confort : Fanger

Le dernier paramètre utilisé pour estimer le niveau de confort dans le bâtiment consiste à calculer les indices de confort de la théorie de Fanger : le PMV (Predicted Mean Vote) et le PPD (Percentage of People Dissatisfied). Claude-Alain Roulet (2004, p. 339), rappelle la définition de ces indices :

- Le vote moyen prévisible (PMV) est l'appréciation moyenne d'une population dans un environnement donné, sur l'échelle allant de -3 (très froid) à +3 (très chaud) en passant par 0 (neutre) ;
- Le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD) exprime la part des sujets insatisfaits dans une condition donnée ;
- La relation entre ces deux indices est la suivante :

$$PPD = 1 - 0,95 \cdot \exp(-0,003353 PMV^4 - 0,2179 PMV^2)$$

La formulation complète de l'équation de Fanger permettant le calcul du PMV inclut différents paramètres qui ont une influence sur le confort thermique. Cette formulation est relativement complexe et pour simplifier la démarche, nous utiliserons ici une application simple et intuitive disponible gratuitement sur internet : « Comfort Calculator »¹⁶. Cette application, développée par Andrew Marsh, est basée sur la norme « ISO7730 : Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local ».

Différents paramètres sont nécessaires au bon fonctionnement de l'application. Il est important de préciser que ces valeurs correspondent à des mesures ponctuelles et non à des valeurs issues d'une campagne de monitoring. Ceci induit que les deux indices de confort précités représentent une situation de confort valable uniquement dans des conditions similaires. Les mesures qui suivent ont donc été prises dans le bureau accueillant le capteur n°3 (voir figure 31) le 25 mars 2016 vers 17h00.

Les paramètres nécessaires au fonctionnement de l'application sont :

- La **température de l'air** :

Cette température a été mesurée par le capteur n°3 et vaut **22,2 [°C]**.

¹⁶ Disponible sur http://www.healthyheating.com/solutions.htm#.VzyW_vmLQh4

- La **température moyenne radiante** :

Il s'agit de la moyenne des températures de surfaces des parois intérieures du local. Celles-ci ont été mesurées avec l'aide d'un thermomètre infrarouge « Testo 830-T1 » tel que représenté sur la Figure 35 ci-contre. La moyenne des températures de surface mesurées vaut **17,6 [°C]**.



Figure 35 - Thermomètre infrarouge Testo 830-T1

- Le **taux d'humidité relative** :

Ce taux d'humidité relative a été mesuré par le capteur n°3 et vaut **44,48 [%]**.

- La **vitesse de l'air** :

La vitesse de l'air a été mesurée avec l'aide d'un multimètre digital représenté sur la Figure 36 ci-contre. Ce multimètre permet de mesurer différentes variables : la température de l'air, le taux d'humidité relative, le niveau d'éclairement, la vitesse de l'air et le niveau sonore. Le multimètre a donné une valeur de **0,22 [m/s]** ce qui correspond à une situation agréable, mais à la limite du confort pour les personnes assises en permanence (Architecture et climat - Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme UCL, s.d.).



Figure 36 - 6 in 1 Multi-functional Environmental Meter MS6300

- L'**activité métabolique** :

La valeur du métabolisme retenue correspond à une activité légère de bureau soit approximativement **70 [W/m²]** ou **1,1 [met]** (Architecture et climat - Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme UCL, s.d.).

- L'**habillement** :

Le dernier paramètre estimé correspond au niveau d'habillement. La valeur de **0,7 [clo]** correspond à une tenue de travail légère (chemise de travail en coton à manches longues, pantalon de travail, chaussettes de laine et chaussures) et a été retenue pour cette saison (Architecture et climat - Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme UCL, s.d.).

L'encodage de ces différents paramètres dans l'application utilisée donne les résultats présentés sur la Figure 37 ci-contre. Le PMV de -1,5 indique un niveau de confort correspondant à une sensation de « légèrement frais à frais ». Le PPD atteint une valeur importante de 50,9 [%] qui signifie que plus d'une personne sur deux sera en situation d'inconfort dans les

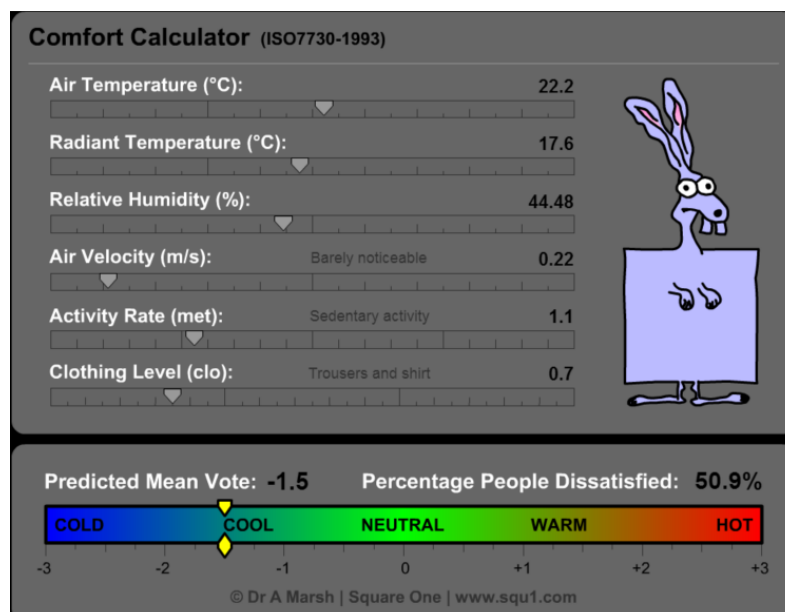


Figure 377 - Résultats du calcul de PMV et PPD - Comfort Calculator

conditions mesurées ici. Il est intéressant de noter que les paramètres qui influencent majoritairement cette sensation de confort sont la vitesse de l'air et la température des parois et plus particulièrement la dalle de sol qui tend à diminuer la valeur moyenne. Un essai rapide de modification de ces paramètres montre qu'il est possible, en améliorant l'étanchéité du bâtiment et en isolant davantage la dalle de sol, d'obtenir des indices de confort satisfaisants. Si nous passons à une température radiante de 20 [°C] et une vitesse de l'air de 0,1 [m/s], nous obtenons les résultats présentés sur la Figure 38 suivante.

Le PMV est ainsi passé de -1,5 à -0,9, ce qui correspond à une situation de confort proche de la sensation du légèrement frais. Le PPD a chuté de 50,9 [%] de personnes insatisfaites à 22,1 [%]. Cet exemple montre bien l'utilité du calcul de ces deux indices qui permettent de simuler rapidement des résultats, en lien avec une réalité physique.

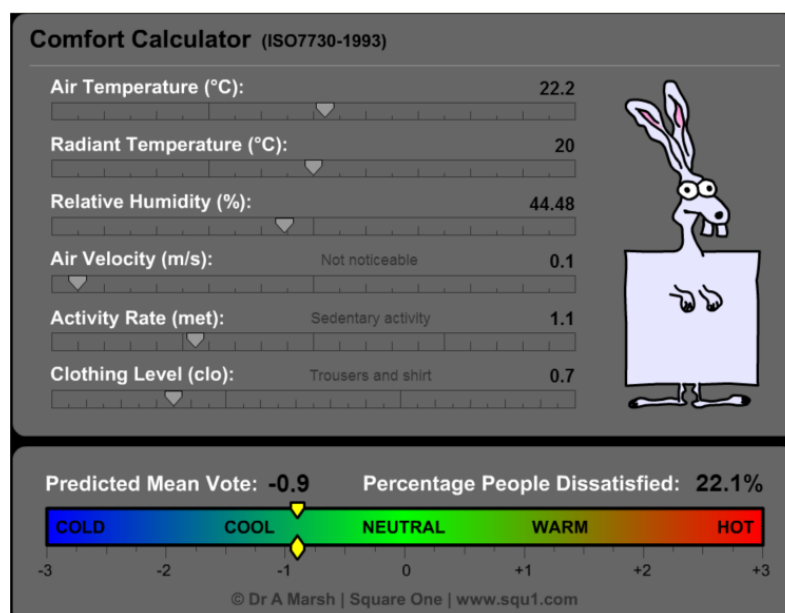


Figure 388 - Résultats du calcul de PMV et PPD après modification des paramètres - Comfort Calculator

4.5. Audit thermographique du bâtiment

Un audit thermographique a été réalisé sur la Maison Strebelle. La thermographie infrarouge peut être définie comme une méthode de détermination et de représentation des températures superficielles, réalisée en mesurant la densité de rayonnement infrarouge d'une surface (Delmotte, 2011). Cet audit avait donc pour but premier d'évaluer les performances de l'enveloppe et d'avoir une idée sur la qualité de l'étanchéité à l'air du bâtiment. L'objectif était d'abord d'effectuer une analyse qualitative et non quantitative de ces performances. L'audit s'est avéré très intéressant puisqu'il a aussi permis de mettre en évidence certains éléments structurels non visibles. Précisons qu'une partie du reportage de photographie thermique se trouve dans la partie annexe de ce travail (voir Annexe 4). Seuls les éléments les plus représentatifs sont repris dans la section ci-dessous. Nous distinguerons les mesures réalisées depuis l'extérieur de celles faites à l'intérieur de la Maison Strebelle.

4.5.1. Description du matériel utilisé

La caméra thermique employée dans le cadre cet audit est représentée sur la Figure 39 ci-contre. La précision de cet appareil est de l'ordre du dixième de degré Celsius. Elle permet de pointer la température de surface d'un point précis mais également de repérer automatiquement les températures minimum et maximum d'un cadrage défini par l'utilisateur.



Figure 39 - Caméra thermique Flir I7

4.5.2. Vues depuis l'extérieur du bâtiment

L'audit thermographique a commencé par une analyse des parois extérieures du bâtiment. Les points de vue des photographies thermiques choisies sont représentés sur la Figure 40 ci-dessous.

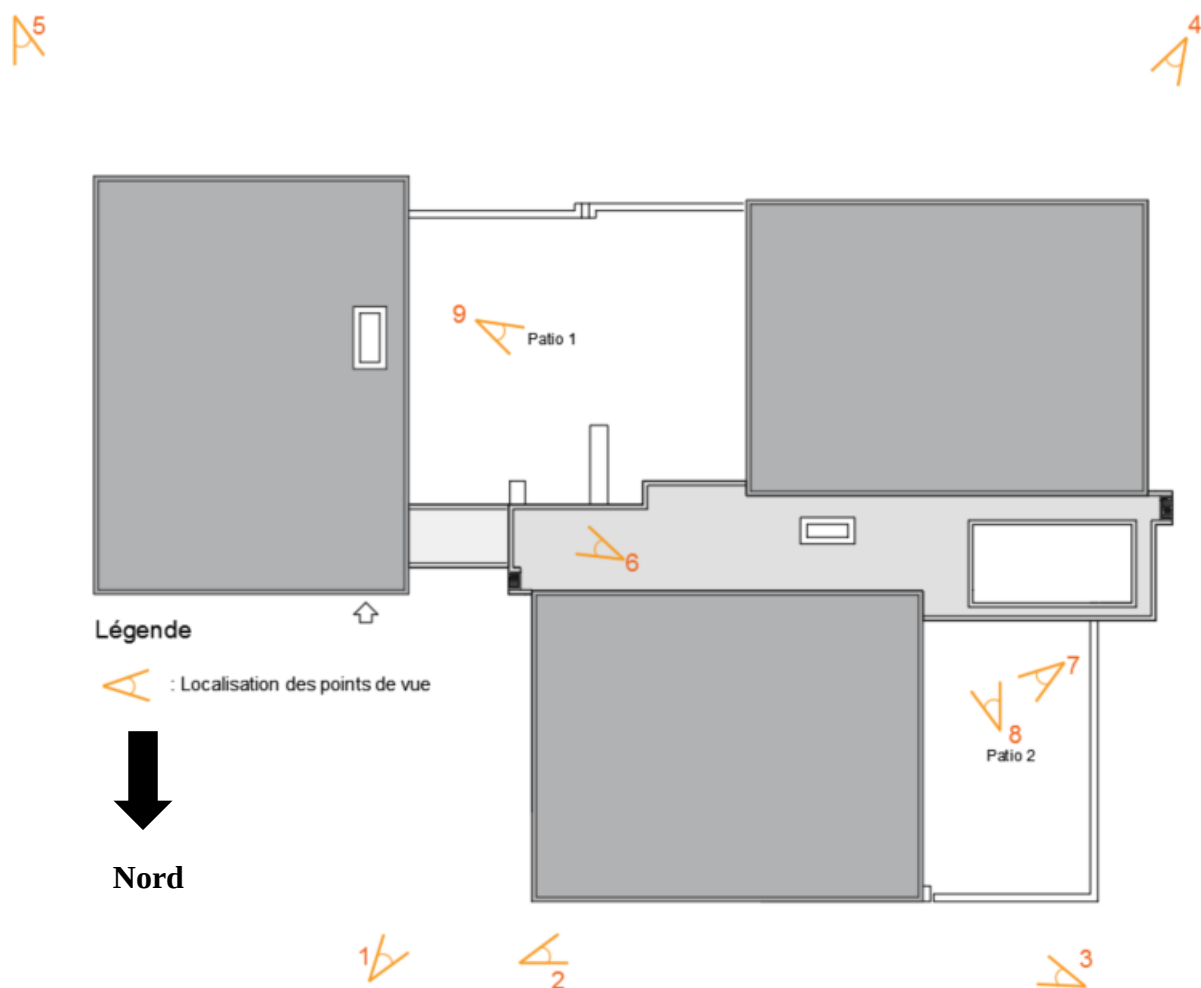


Figure 40 - Repérage des points de vue de photographie thermique extérieurs

La première vue thermographique est représentée sur la Figure 41 et montre l'angle nord-ouest du bâtiment. Celle-ci permet de mettre en évidence certaines faiblesses de l'enveloppe. L'hétérogénéité des températures de surface a laissé supposer que les murs de façades n'étaient pas isolés (voir point 4.2.1).

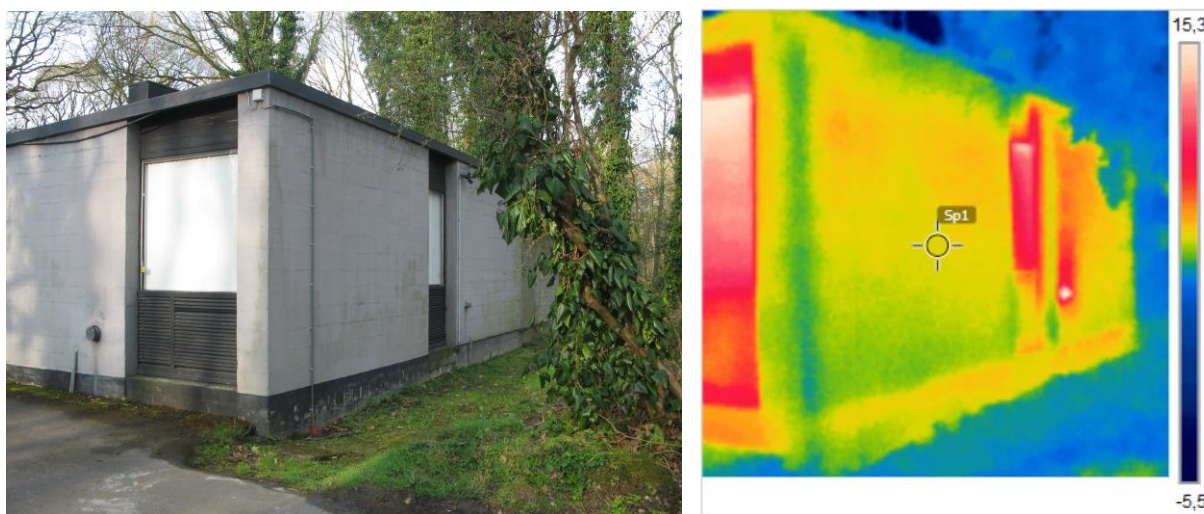


Figure 41 - Photographie thermique extérieure n°1

Il apparaît également clairement que les châssis de fenêtres (et particulièrement les vitrages) constituent des points faibles de l'enveloppe. Des effets de coin sont également visibles sur cette figure. Ce type de pont thermique géométrique induit des températures plus faibles au niveau des coins. Ce phénomène est compréhensible intuitivement : la surface exposée à l'extérieur est plus importante que la surface intérieure, la température y est donc plus faible.

La Figure 42 concerne la même façade mais se focalise sur un point plus précis. Elle montre une température de surface plus importante au niveau de la dalle. Ceci s'explique simplement par le fait que la dalle de sol est continue de l'intérieur vers l'extérieur.

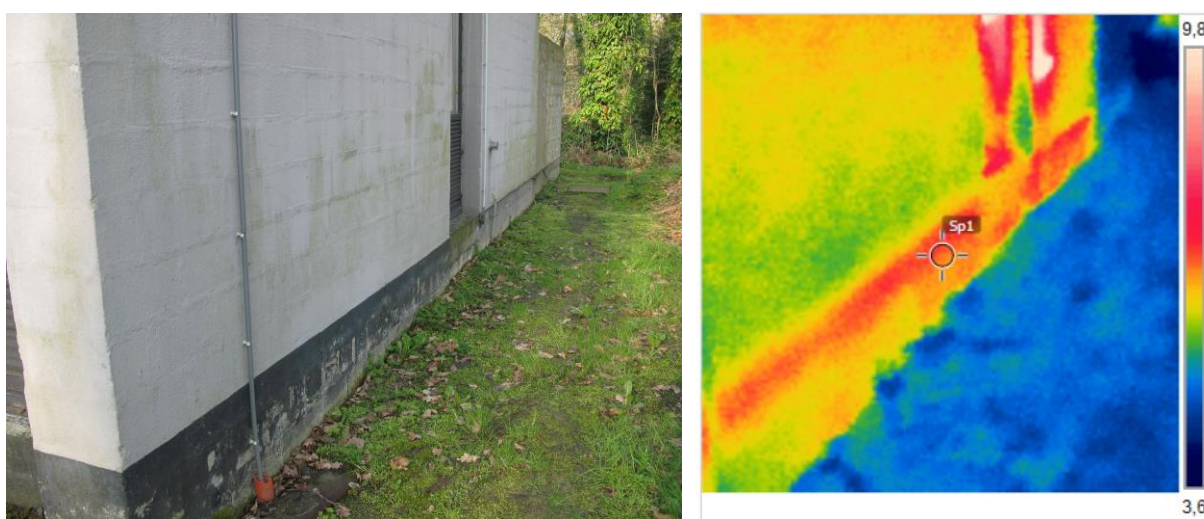


Figure 42 - Photographie thermique extérieure n°2

La troisième photographie thermique sélectionnée sur la Figure 43 suivante montre une nouvelle fois la même façade. Le pont thermique au niveau de la dalle est toujours bien visible. Il est aussi intéressant de visualiser l'impact du système de chauffage en place à l'intérieur.

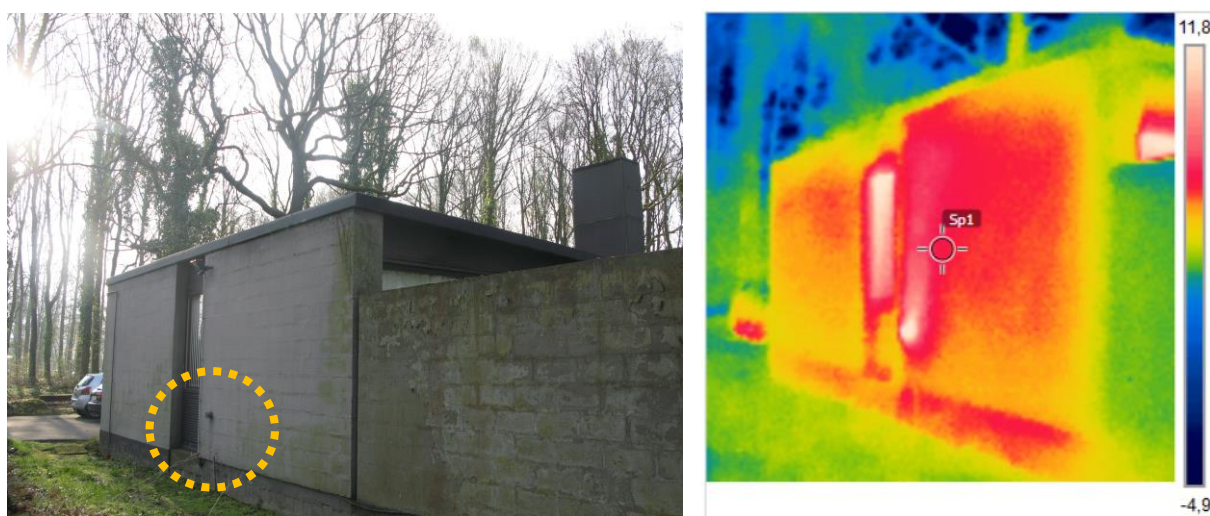


Figure 43 - Photographie thermique extérieure n°3

Les ventouses, permettant d'évacuer les gaz de combustion des convecteurs, libèrent par la même occasion une quantité de chaleur importante. Ce phénomène est visible sur toutes les sorties des ventouses. Il serait donc judicieux de penser un système de chauffage évitant de telles pertes calorifiques.

La Figure 44 ci-dessous représente l'angle sud-ouest du bâtiment. Nous pouvons voir une nouvelle fois que les vitrages constituent les principaux points faibles de l'enveloppe. L'influence des ventouses d'évacuation est toujours bien présente. La poutre, située en partie supérieure du vitrage, semble aussi très hétérogène. Ce transfert de chaleur plus important sur certaines parties laisse supposer une humidification du bois plus importante dans cette zone d'ombre thermique.

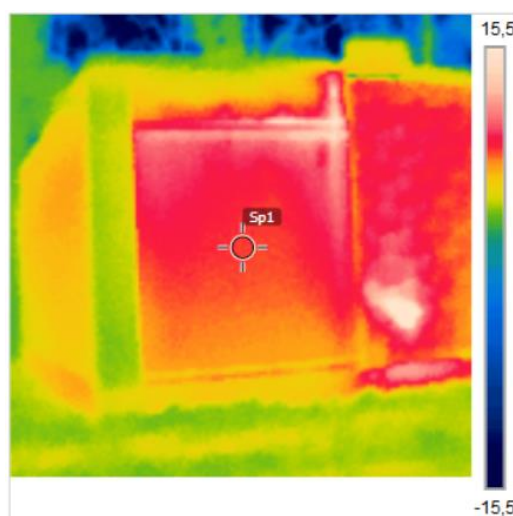


Figure 44 - Photographie thermique extérieure n°4

La Figure 45 suivante représente l'angle sud-est du bâtiment. Celle-ci montre une nouvelle fois le phénomène d'effet de coin, l'impact des ventouses de chauffage mais aussi et

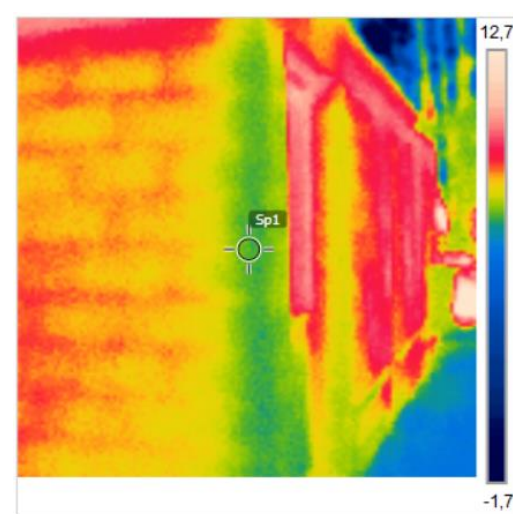


Figure 45 - Photographie thermique extérieure n°5

surtout une différence de température entre les blocs de maçonnerie en béton et les joints de mortier de ciment. La température de surface est plus importante au niveau des joints. Ceci peut témoigner d'une plus grande porosité des joints par rapport aux blocs de maçonnerie. De plus, ce coin, et plus particulièrement cette façade, est situé à proximité directe de la végétation, ce qui a pour tendance d'augmenter l'humidité à cet endroit. Un test de perméabilité à l'eau serait intéressant pour juger de l'état des maçonneries.

La Figure 46 montre une des photographies thermiques réalisées lors de l'inspection des toits du bâtiment. Toutes les images thermiques des toits sont difficilement interprétables. Effectivement, le matériau de surface étant sombre et absorbant, la majorité des zones ensoleillées correspondent aux températures les plus élevées mais ne permettent pas de donner un avis sur la performance de ces parois.

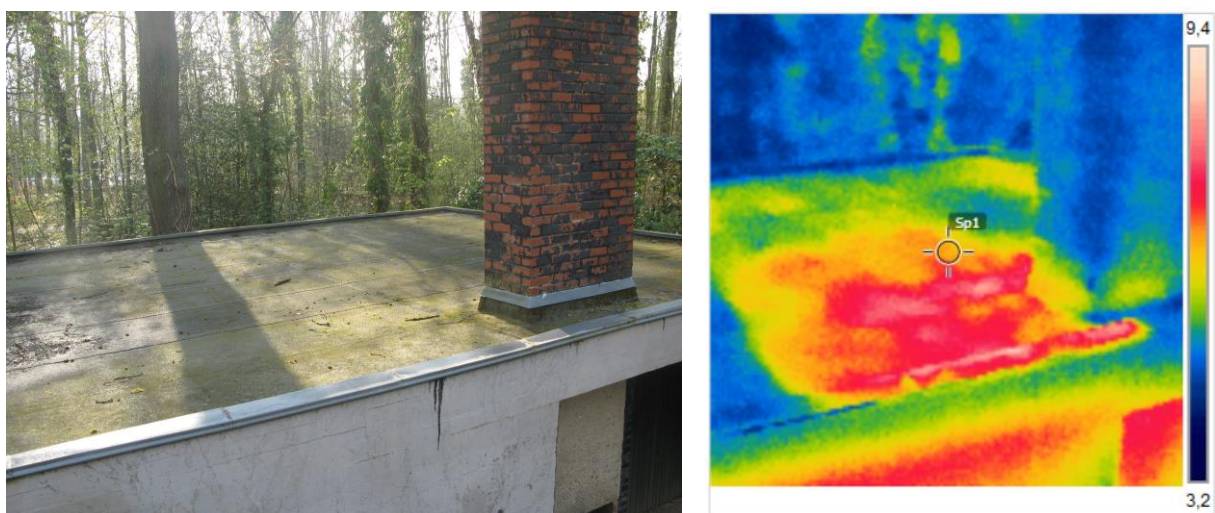


Figure 46 - Photographie thermique extérieure n°6

La Figure 47 ci-dessous représente quant à elle une vue depuis le patio 2 du bâtiment.



Figure 47 -Photographie thermique extérieure n°7

Elle permet les mêmes constatations que les photographies précédentes : faiblesse des châssis, effets de coin, faiblesse au niveau de la dalle, etc. Cette photographie montre aussi une autre application de la thermographie infrarouge : révéler certains éléments structurels. Elle permet effectivement de repérer l'ossature décrite dans la partie 4.2.1.1 du travail portant sur les parois à ossature bois. Même si aucune information précise quant à l'isolation thermique en place ne peut être déduite, l'implantation des poteaux structurels donne des indications sur la logique constructive de ces parois.

La photographie représentée sur la Figure 48 est prise sur la même façade. Elle pointe le nœud constructif problématique créé par la toiture du bloc central. En effet, il s'agit d'une dalle de béton traversant la façade sans aucune coupure thermique.

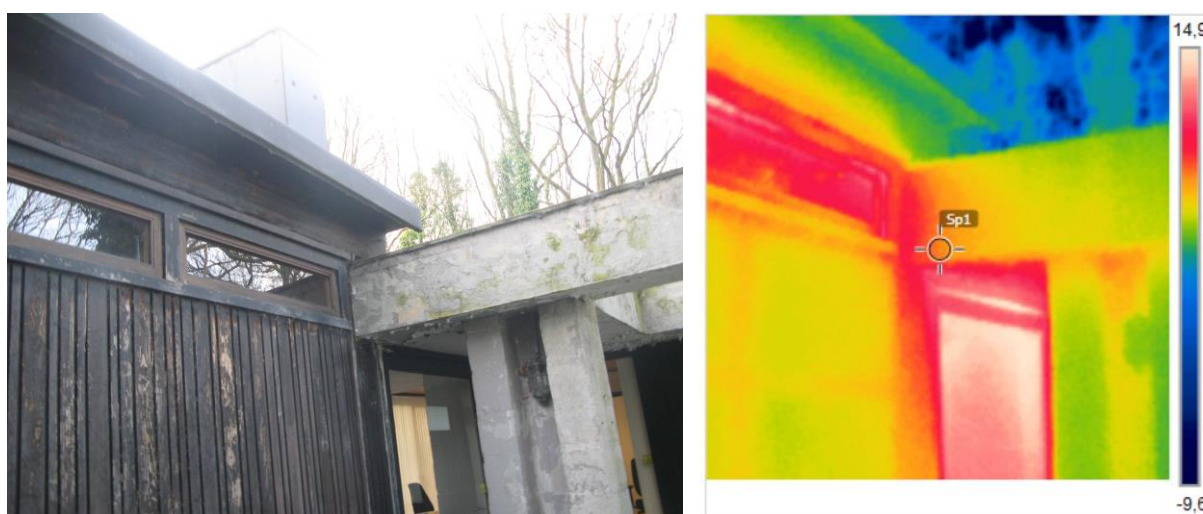


Figure 48 - Photographie thermique extérieure n°8

La dernière photographie thermique extérieure sélectionnée est représentée sur la Figure 49 suivante. Elle montre une façade légère, vue depuis le patio 1, et identifie des éléments semblables.

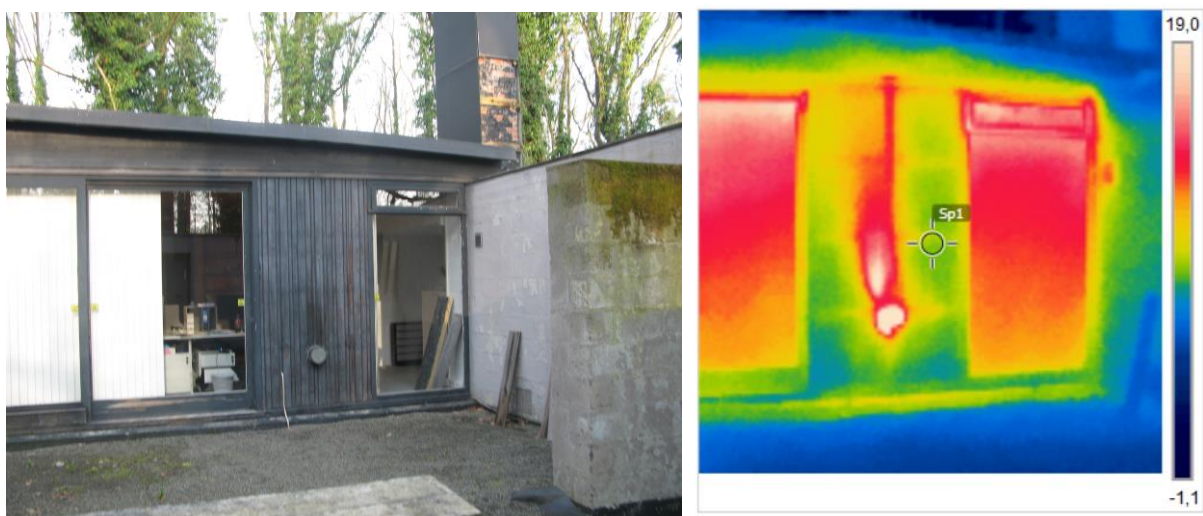


Figure 49 - Photographie thermique extérieure n°9

4.5.3. Vues depuis l'intérieur du bâtiment

Similairement à ce qui a été fait précédemment pour les vues thermographiques extérieures, sélectionnons quelques vues intérieures intéressantes. La Figure 50 suivante représente les différents points de vue choisis.

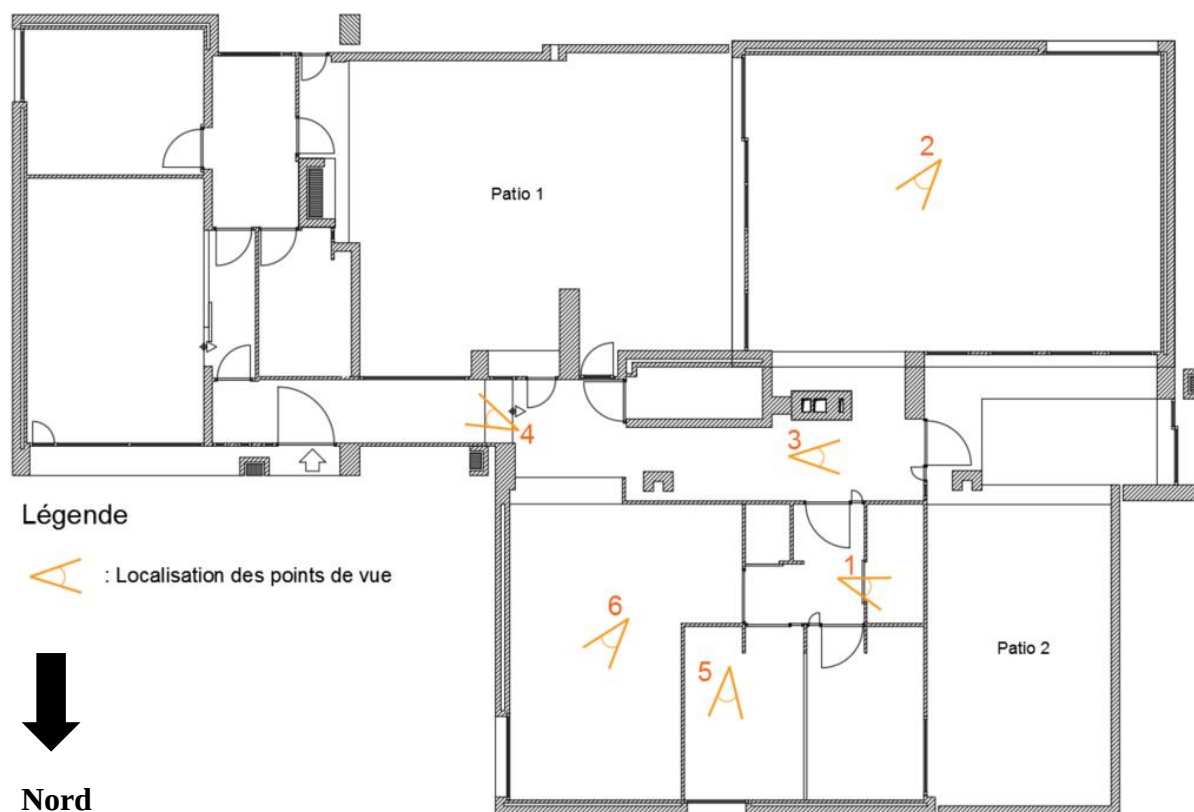


Figure 50 - Repérage des points de vue de photographie thermique intérieurs

La Figure 51 ci-dessous représente une application courante de l'audit thermographique à savoir la visualisation des températures des équipements techniques.

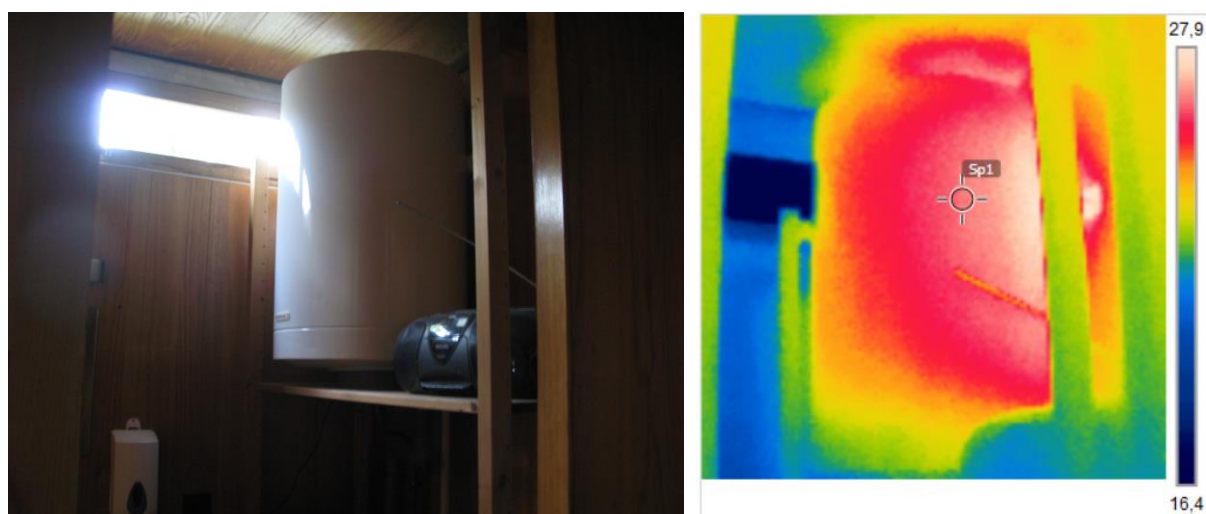


Figure 51 - Photographie thermique intérieure n°1

Tout comme pour les photographies thermiques réalisées à l'extérieur du bâtiment, les captures intérieures ont permis d'identifier la position d'éléments structurels. La Figure 52 ci-dessous a permis de montrer que l'entraxe entre poutres maîtresses de toiture réel ne correspond pas à celui figurant les documents d'exécution d'origine. Il est en fait beaucoup plus réduit.

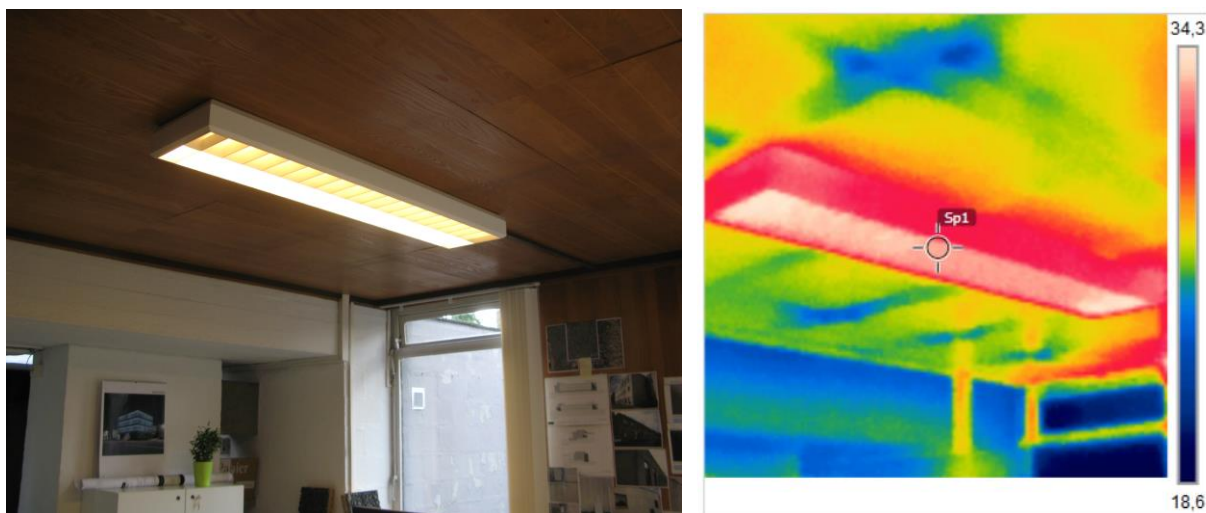


Figure 52 - Photographie thermique intérieure n°2

La thermographie infrarouge permet aussi de montrer les faiblesses des vitrages depuis l'intérieur. La Figure 53 montre la porte de sortie vers l'ouest, située dans l'axe transversal de l'habitation. On peut percevoir des zones très foncées et donc très froides en pied de baie, du côté de l'ouverture. Cette position particulière illustre le défaut d'étanchéité du châssis. Dans ce cas, il s'agit certainement des joints d'étanchéité à l'eau et/ou à l'air qui font défaut.



Figure 53 - Photographie thermique intérieure n°3

La Figure 54 ci-dessous représente un châssis fixe situé dans le couloir central du bâtiment, juste à l'entrée. Les mêmes constatations que pour la figure précédente peuvent être mentionnées. Des zones très sombres (très froides) sont présentes en pied de châssis et témoignent probablement d'un défaut d'étanchéité.



Figure 54 - Photographie thermique intérieure n°4

Dans le même esprit, les allèges vitrées de certains châssis sont des zones thermiquement froides (voir Figure 55) pour plusieurs raisons. La première est que ces allèges vitrées sont situées à ras du sol où l'air est plus froid. De plus, elles sont masquées depuis l'extérieur par une sorte de volet fixe pare-soleil qui empêche tout rayonnement solaire de pénétrer vers l'intérieur.

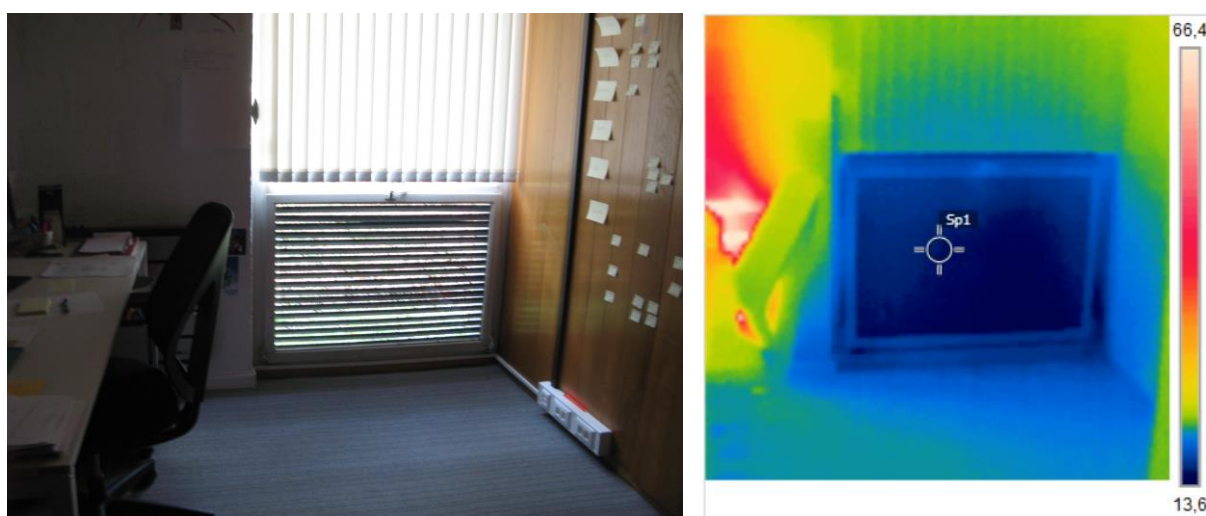


Figure 55 - Photographie thermique intérieure n°5

La Figure 56 représente la partie supérieure d'un convecteur à gaz. Elle montre ainsi l'influence qu'ont ces convecteurs sur les parois intérieures des locaux. Une part non négligeable de l'énergie calorifique dégagée par ces installations réchauffe simplement les parois avoisinantes et non l'environnement. On voit donc que le réchauffement des parois vues depuis l'extérieur n'est pas uniquement dû à la sortie des gaz de combustion chauds, mais aussi et surtout, au réchauffement de la paroi elle-même.



Figure 56 - Photographie thermique intérieure n°6

A l'issue de ce chapitre, l'ensemble des caractéristiques du bâtiment, à savoir sa géométrie, sa structure, la composition de l'enveloppe, les systèmes en place, le niveau de confort ou encore ses performances, ont pu être évaluées. Il apparaît que la performance de l'enveloppe de la Maison Strebelle est loin d'être optimale. Le manque d'étanchéité à l'air et les faibles performances thermiques des parois induisent un niveau de confort insuffisant. Les systèmes en place, et tout particulièrement l'éclairage, ne sont pas satisfaisants pour l'usage actuel du bâtiment. Toutes les informations récoltées à travers cet audit permettent désormais de modéliser le bâtiment dans un logiciel de simulation thermique dynamique. Cette étape importante est décrite dans le chapitre suivant du travail.

Chapitre 5 - Modélisation et simulation thermique dynamique

Décrivons désormais la simulation thermique dynamique réalisée avec le logiciel DesignBuilder (version d'évaluation 4.6.0.015). Nous commencerons par expliquer le choix de ce logiciel avant de rentrer dans les détails de construction du modèle.

5.1. Choix et description du logiciel

Le choix du logiciel de simulation a été réalisé sur la base d'une comparaison entre les différents programmes existants et reconnus par la communauté scientifique. DesignBuilder s'est imposé pour son caractère intuitif et par la disponibilité d'informations qui permettent de prendre le logiciel en main. Ce dernier utilise le moteur de simulation EnergyPlus (version 8.3) disponible depuis 2001 et développé à l'initiative de l'US Department of Energy (Crawley, et al., 2001). Ce moteur de simulation a d'ailleurs été validé par le protocole BESTEST (Building Energy Simulation Test) basé sur la norme ASHRAE 140 (Attia, 2011, p. 33) , vérifiant la précision des résultats obtenus pour des modèles prédéfinis.

Les développeurs du logiciel précisent les fonctionnalités suivantes (Batisim, 2013) :

- « Calcul des déperditions et gains thermiques de l'enveloppe en hiver et en été ;
- Dimensionnement du chauffage et du refroidissement par ventilation naturelle et/ou climatisation ;
- Simulation dynamique restituant des données de confort, de bilan thermique, ventilation, ... ;
- Construction en 3D ;
- Modeleur du bâtiment qui inclut des assistants de création de fenêtres, composition de la construction, ... ;
- Gestion de l'occupation, de la ventilation mécanique, des ouvertures de fenêtres, de l'occultation des baies, des apports internes, ... avec l'aide de planning paramétrables ;
- Economie d'énergie (free-cooling, récupérateur de chaleur, ...) ;
- Bibliothèques de matériaux intégrés ;
- Calculs LEED ;
- ... »

5.2. Mesures préalables

Différents éléments ont dû être préalablement mis au point avant de pouvoir réaliser le modèle. Parmi ceux-ci, décrivons successivement les étapes de création d'un fichier météorologique et de récolte de mesures, en vue de constituer une volumétrie simplifiée et adaptée du bâtiment.

5.2.1. Création d'un fichier météorologique

De manière à garantir une précision maximale du modèle, il était nécessaire d'obtenir un fichier météorologique correspondant à la zone géographique du Sart Tilman. Aucun fichier n'étant disponible, le logiciel Meteonorm (version 7) a été utilisé pour créer un fichier epw (EnergyPlus Weather Data), supporté par DesignBuilder. Ce logiciel a accès à un catalogue de données météorologiques basé sur une expérience de plus de 25 ans, partout à travers le monde (Meteotest, s.d.). Dans le cas du Sart Tilman, le logiciel a permis d'interpoler des données météorologiques à partir des six stations les plus proches (Bierset – 9 km, Liège – 11 km, Aachen – 43 km, Beek – 40 km, Beauchevain – 59 km et Charleroi – 80 km). Les résultats fournis par le logiciel sont placés en partie annexe de ce travail (voir Annexe 5).

5.2.2. Volumétrie

Pour faciliter la modélisation dans le logiciel DesignBuilder, nous avons choisi de réaliser un modèle tridimensionnel simplifié dans le logiciel de dessin Sketchup. Des mesures de hauteur ont été prises de manière à pouvoir retracer une volumétrie complète du bâtiment. Celle-ci servira de base pour construire la géométrie dans DesignBuilder. Cette étape a également permis de bien comprendre l'ensemble des interpénétrations de volumes et d'espaces au sein du bâtiment. Une vue de cette volumétrie simplifiée est représentée sur la Figure 57 ci-après.

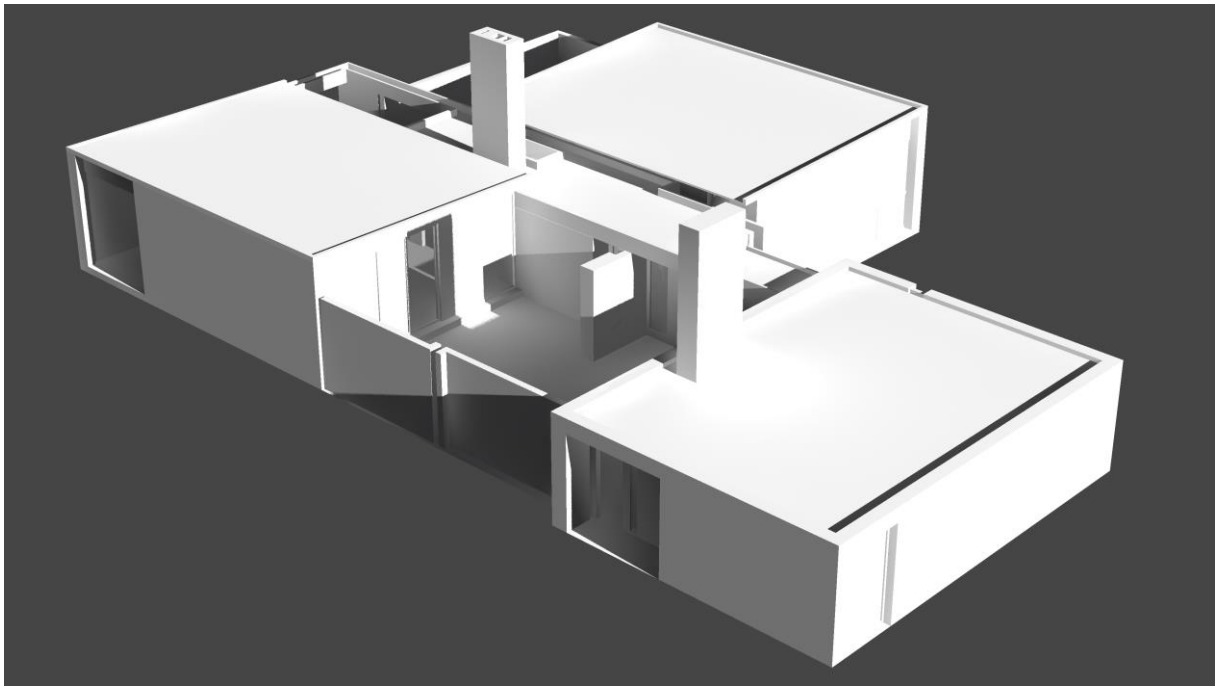


Figure 57 - Volumétrie simplifiée de la Maison Strebelle

5.3. Modélisation

Une fois les données précédentes rassemblées, la modélisation dans DesignBuilder a pu être réalisée. Le modèle complet est représenté sur la Figure 58 ci-dessous.

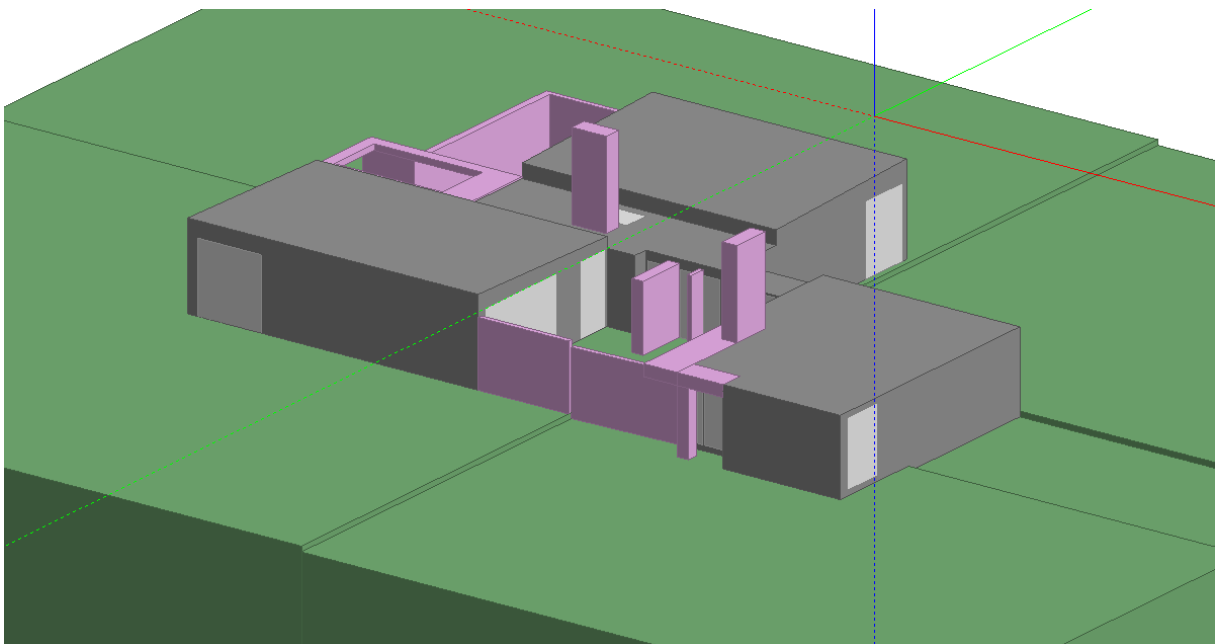


Figure 58 - Modèle DesignBuilder de la Maison Strebelle

Définissons désormais plus précisément la manière dont ce modèle a été construit, afin de rendre cette modélisation reproductible.

La première étape de modélisation consiste à préciser la situation géographique et les différentes données générales relatives au projet. La seconde étape correspond à la modélisation de la volumétrie du bâtiment ainsi que de son environnement. Il est important de rappeler que la Maison Strebelle est située dans un environnement très boisé. Les arbres avoisinants sont très

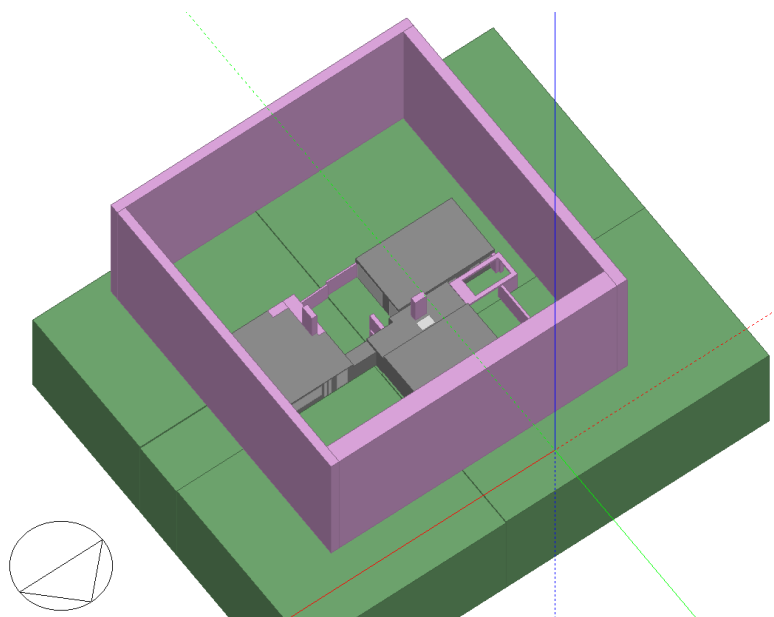


Figure 59 - Modélisation de la végétation avoisinante

proches du bâtiment et doivent être modélisés. La Figure 59 représente la manière dont il est possible de prendre en compte cette végétation. Un bloc « composant » symbolise les plans de la lisière du bois entourant littéralement la maison. Un planning de transparence est alors appliqué aux parois de manière à simuler la perte des feuillages des arbres durant la période hivernale. Ceci permet de préciser le modèle d'un point de vue « apports solaires ». Néanmoins, cette proximité de la végétation implique aussi des conditions hygrothermiques très particulières, difficilement modélisables dans le logiciel. Le fichier météorologique utilisé pour simuler le climat local ne permet pas non plus de prendre ces caractéristiques en compte puisqu'il représente une interpolation des stations météorologiques les plus proches. La situation réelle est donc difficilement atteignable et la phase de calibration permettra de maximiser la correspondance entre la situation réelle et simulée.

Une fois la modélisation géométrique réalisée, le positionnement des différentes ouvertures du bâtiment prend place. Un découpage en zones thermiques doit être réalisé par la suite. Dans ce cas, dix zones thermiques ont été définies. Elles correspondent à la séparation physique des différents locaux du bâtiment. Ce zonage est représenté sur la Figure 60 suivante.

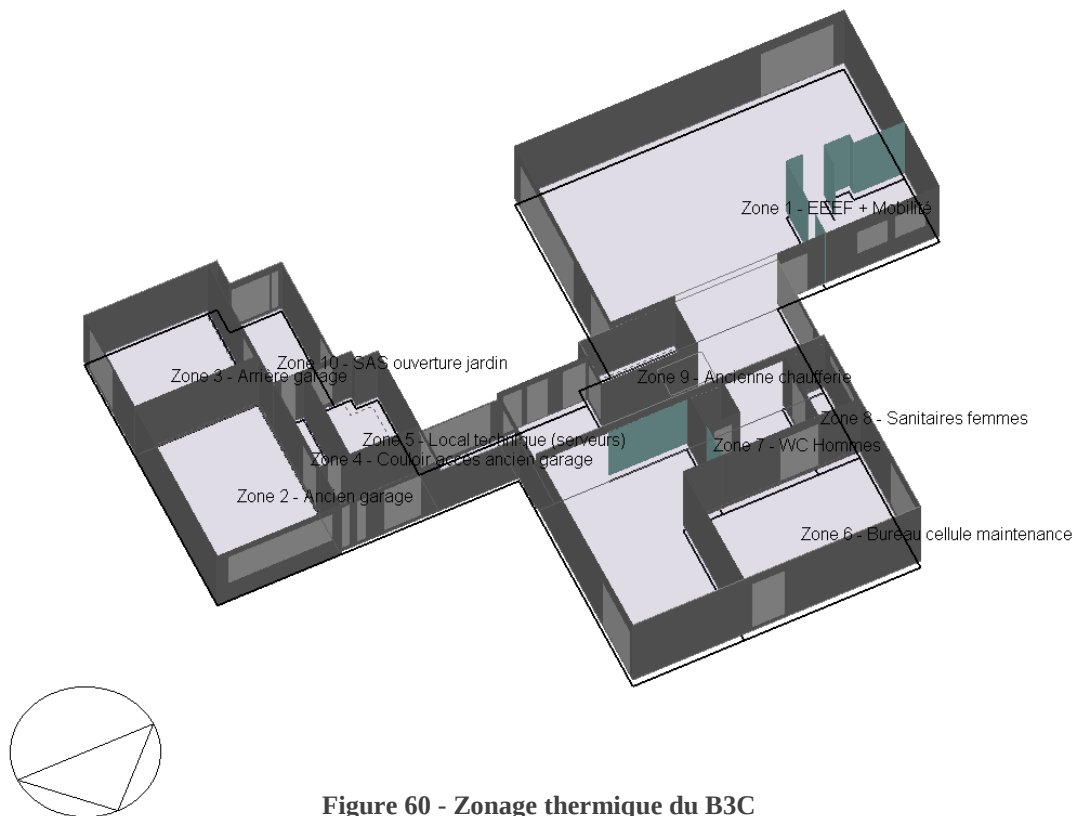


Figure 60 - Zonage thermique du B3C

Pour la suite, toutes les zones ont été paramétrées en fonction des données récoltées durant la phase d’audit présentée précédemment. Ces données se traduisent dans le logiciel à travers différents onglets à compléter. Ils se répartissent selon ces thématiques :

- La définition de l’activité ;
- La définition de la construction ;
- La définition des ouvertures ;
- La définition de l’éclairage ;
- La définition des installations HVAC.

Toujours dans une logique de reproductibilité, précisons pour chacun d’eux les paramètres encodés.

5.3.1. Définition de l’activité

Pour chaque zone thermique, la définition de l’activité prend en compte les paramètres suivants : la définition des surfaces et volumes chauffés, l’occupation du bâtiment, l’activité métabolique des occupants, la définition des vacances, la présence d’équipements de bureau, le contrôle d’ambiance (pour le chauffage, l’éclairage et la ventilation), la consommation en eau

chaude sanitaire ou encore l'adjonction de charges internes supplémentaires.

La définition des surfaces et des volumes chauffés est automatiquement calculée sur la base du modèle géométrique construit. La surface au sol occupée est de 194,1 [m²] pour un volume de 434,2 [m³].

La densité d'occupation est quant à elle exprimée en [pers/m²]. Elle a été calculée pour chacune des zones thermiques. Pour le bâtiment complet, elle vaut 0,077 [pers/m²] tandis que la valeur maximale est rencontrée dans la zone thermique 3 (arrière garage) pour un taux de 0,2 [pers/m²]. Un planning, suivant l'occupation réelle, a été créé pour simuler le taux d'occupation du bâtiment. Celui-ci est représenté sur le Tableau 6 ci-dessous. Ce dernier ne prend pas en compte les vacances, définies séparément, sur la base des jours fériés ainsi que des périodes de vacances de l'Administration des Ressources Immobilières.

Tableau 6 - Planning d'occupation (DesignBuilder)

Mois	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Jan	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	Off	Off
Fév	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	Off	Off
Mar	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	Off	Off
Avr	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	Off	Off
Mai	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	Off	Off
Juin	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	Off	Off
Juil	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	Off	Off
Aoû	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	Off	Off
Sep	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	Off	Off
Oct	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	Off	Off
Nov	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	Off	Off
Déc	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	9h00 - 17h30	Off	Off

L'activité métabolique est quant à elle définie en fonction du travail accompli par les occupants. Dans ce cas, l'option « travail de bureau léger » a été sélectionnée et correspond à une charge de 120 [W/pers.].

Pour simuler l'impact des équipements bureautiques, une charge par défaut de 11,77 [W/m²] a été encodée pour toutes les zones thermiques qui en contiennent.

La consommation en eau chaude sanitaire a été fixée à la valeur de 0,2 [l/m².jour].

Pour le contrôle d'ambiance, aucun régulateur n'est réellement présent dans le bâtiment mais l'option n'est pas désactivable et les températures de consigne sont à définir. Pour le conditionnement d'air, aucun équipement n'est installé dans le bâtiment. Les températures de consigne et limites d'humidification (ou de déshumidification) de l'air à encoder n'ont pas d'incidences sur les résultats. Elles sont laissées à leurs valeurs par défaut. Pour le chauffage, la température de consigne a été fixée à 18 [°C], ce qui correspond à une valeur représentative

des températures enregistrées lors du monitoring. La température limite basse a quant à elle été fixée suffisamment bas, de façon à modéliser l'absence de régulation. En effet, le système ne détecte pas une température trop faible dans le bâtiment, ce qui relancerait les corps de chauffe. Tout se fait manuellement par l'utilisateur en journée. La valeur de 14 [°C] a été choisie car elle correspond à la valeur la plus faible mesurée durant la période d'inoccupation du bâtiment. De plus, en hiver, le personnel de l'Administration laisse tourner les convecteurs à faible puissance pour éviter de descendre trop bas en température. Pour l'éclairage, les valeurs mesurées par les capteurs (voir Chapitre 4 – point 4.4) ont permis de mettre en évidence un éclairage sur le plan de travail faible. Une valeur de 200 [Lux] a été retenue pour le modèle.

5.3.2. Définition de la construction

Dans cet onglet, tous les détails relatifs aux parois sont encodés : murs extérieurs, cloisons intérieures, toitures et planchers. Ceux-ci respectent les valeurs décrites dans la partie précédente (voir Chapitre 4 – point 4.2), relative à la définition des parois de l'enveloppe. L'onglet construction permet également de modéliser la qualité de l'étanchéité à l'air du bâtiment. L'audit thermographique ainsi que l'analyse du confort ont permis de mettre en évidence la mauvaise qualité de l'étanchéité à l'air. Un taux d'infiltration à 50 Pascal a été défini à 25 [Vol/h], valeur courante pour les bâtiments datant des années 1960, tandis que le curseur de définition de la performance de l'étanchéité à l'air a été initialement réglé sur « très mauvais ». Un « Blower Door Test » permettrait de confirmer la pertinence de ces valeurs.

5.3.3. Définition des ouvertures

Les châssis et vitrages sont paramétrés dans cet onglet. Dans ce cas, comme repéré dans l'analyse initiale du bâtiment, les châssis sont en bois massif et peuvent être assortis de simple ou de double vitrage. Une fenêtre de toiture est également présente au niveau du bloc central. Les coefficients de transmission thermique des ouvertures respectent les valeurs calculées dans la description précédente (voir Chapitre 4 – point 4.2.1.4).

5.3.4. Définition de l'éclairage

L'éclairage est essentiellement réalisé par l'intermédiaire de tubes fluorescents de type T8. Le Tableau 7 indique les puissances installées pour chaque zone ainsi que les puissances normalisées encodées dans le logiciel de simulation.

Tableau 7 - Liste des éclairages et puissances installées

	Nombre de tubes et points lumineux [Pce]	Puissance installée [W]	Surface [m²]	Puissance normalisée [W/m²]	Puissance normalisée pour 100 Lux [W/m².100lux]
Zone 1	15	870	125,66	6,92344421	3,46172211
Zone 2	4	232	18,52	12,5269978	6,26349892
Zone 3	2	116	9,87	11,7527862	5,87639311
Zone 4	1	58	2,08	27,8846154	13,9423077
Zone 5	0	0	4,83	0	0
Zone 6	4	232	19,91	11,652436	5,82621798
Zone 7	1	18	1,24	14,516129	7,25806452
Zone 8	1	58	2,8	20,7142857	10,3571429
Zone 9	1	58	3,32	17,4698795	8,73493976
Zone 10	1	58	5,84	9,93150685	4,96575342
TOTAL	30	1700	194,07	8,75972587	4,37986294

Il est important de préciser que l'éclairage extérieur, présent en pourtour du bâtiment, ne fait pas partie de la modélisation.

5.3.5. Définition des installations HVAC

La définition des installations HVAC s'est avérée relativement simple étant donné le peu d'équipements présents dans le bâtiment. Pour rappel, aucun groupe de ventilation et de conditionnement d'air ne sont installés¹⁷. Seuls les convecteurs à gaz sont à modéliser dans DesignBuilder. Pour ce faire, le Tableau 8 représente les puissances installées dans chaque zone thermique. La température de soufflage de l'air par les convecteurs a été estimée à 40 [°C] sur base de la thermographie infrarouge. Le coefficient de performance de l'installation a été estimé à 80 [%], selon les données du fabricant de l'époque. Le planning de chauffe suit le planning d'occupation de manière à simuler de manière correcte l'absence de système de régulation.

Le boiler permettant la production d'eau chaude sanitaire a également été encodé dans cet onglet. Une température de consigne de 65 [°C] a été choisie pour un coefficient de performance de 85 [%].

¹⁷ Précisons que le petit extracteur sanitaire a été négligé dans le modèle en raison de son faible apport dans le bilan énergétique global.

Tableau 8 - Puissance de chauffe installée

Zone thermique	Nombre de convecteurs en place [Pce]	Puissance installée [kW]
Zone 1	6	19,7
Zone 2	1	3,7
Zone 3	1	3,7
Zone 4	0	0
Zone 5	0	0
Zone 6	2	4,9
Zone 7	0	0
Zone 8	0	0
Zone 9	0	0
Zone 10	0	0
Total	10	32

5.4. Calibration du modèle

Une fois l'ensemble des paramètres encodés, la simulation des résultats peut être réalisée. Avant de pouvoir interpréter les résultats et implémenter le modèle pour de nouvelles valeurs, l'étape de calibration est primordiale. Cette étape consiste simplement à vérifier que les résultats simulés sont représentatifs de la réalité. Le relevé des consommations trimestrielles de gaz constitue la seule donnée certaine et est, pour cette raison, utilisé pour calibrer le modèle. Pour rappel, l'analyse des consommations de gaz (voir Chapitre 4 – point 4.3) a permis de mettre en évidence les années pertinentes à prendre en compte qui sont les années 2013 et 2015. Une moyenne arithmétique de ces consommations permet d'obtenir la valeur vers laquelle la consommation de gaz de DesignBuilder doit tendre. Cette valeur est de **6146,5 [kWh]** pour une année complète soit **31,67 [kWh/m²an]** pour le gaz.

Les paramètres principaux sur lesquels il est possible d'ajuster le modèle pour coller à la réalité ont été choisis par rapport à leur degré de certitude et leur sensibilité. Le degré de certitude sur les coefficients de performance des installations ainsi que sur le niveau de performance de l'étanchéité étant faible, ces valeurs ont été choisies comme paramètres. Un autre paramètre, choisi cette fois pour sa sensibilité, est la température limite basse de chauffage.

Après de multiples essais sur les paramètres choisis, les résultats présentés sur la Figure 61 ci-dessous ont pu être obtenus en abaissant la température limite basse à 13 [°C], en réglant la qualité d'étanchéité sur « moyen » et en augmentant le coefficient de performance des convecteurs à 1.

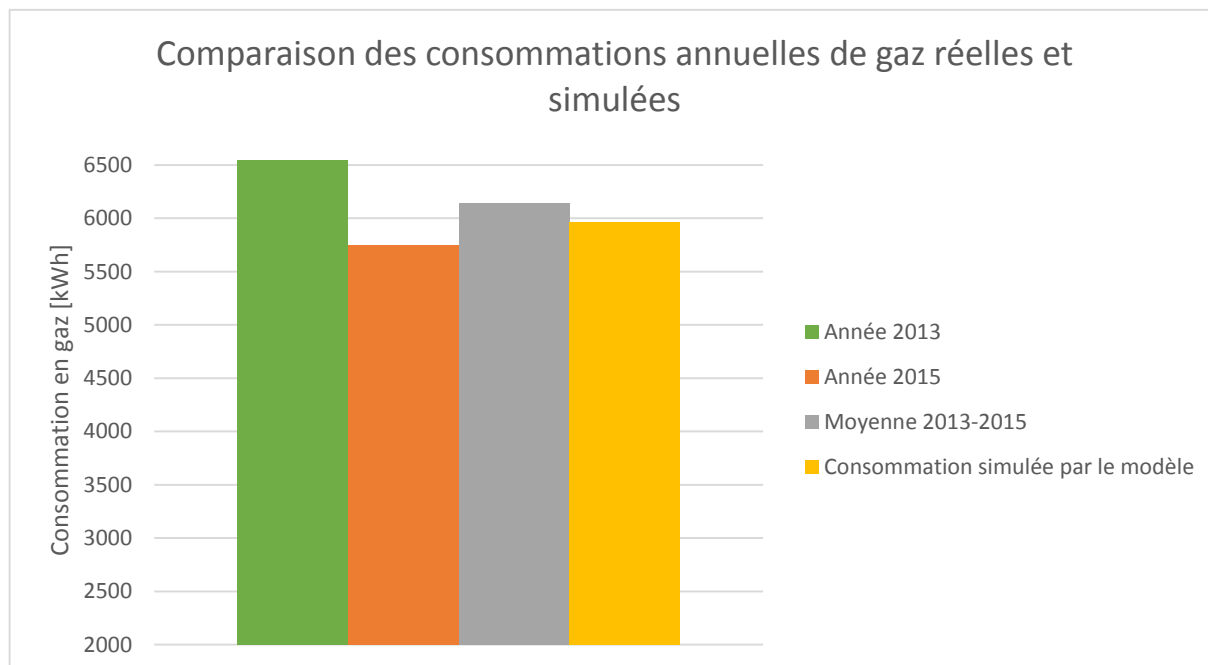


Figure 61 - Calibration : comparaison des consommations de gaz réelles et simulées

Cette figure compare les résultats obtenus par DesignBuilder (en jaune) et les données des années précédentes. Si on représente ces différences en termes de pourcentage d'écarts entre résultat simulé et réel, nous obtenons les résultats présentés sur la Figure 62.

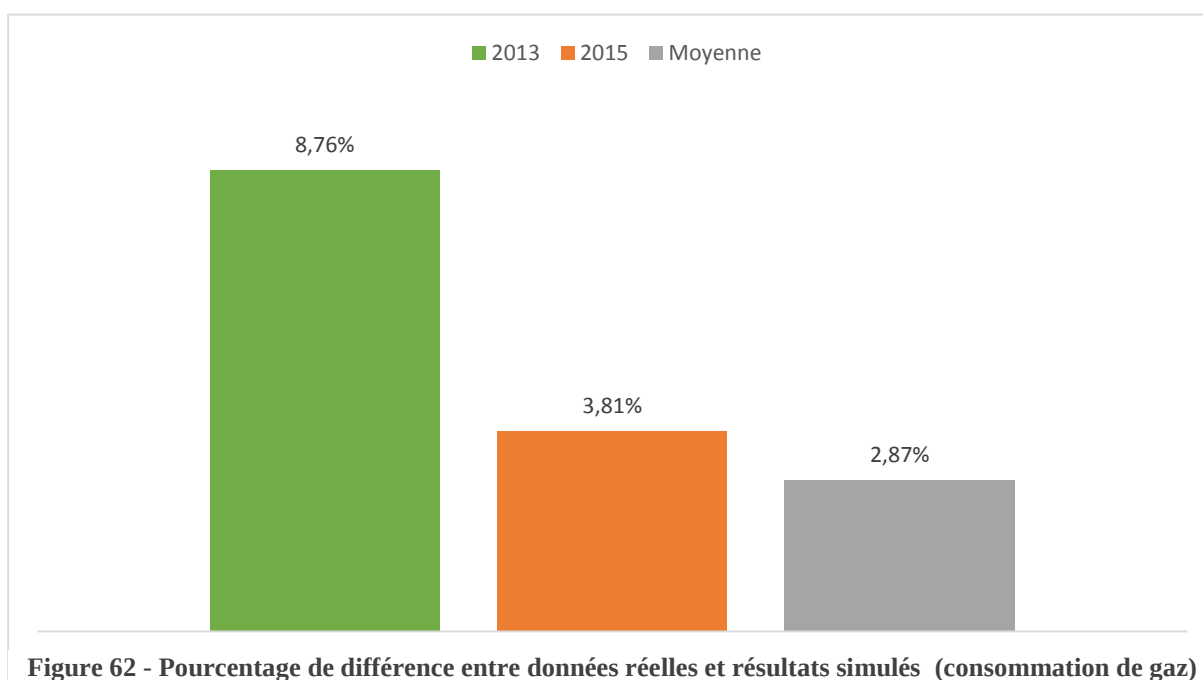


Figure 62 - Pourcentage de différence entre données réelles et résultats simulés (consommation de gaz)

La différence entre la moyenne des données considérées et simulées est de **2,87 [%]**. Ce résultat est très acceptable. Il est également intéressant de noter que la différence avec l'année 2015 est de 3,81 [%] tandis que la différence avec 2013 est de 8,76 [%]. Rappelons que l'année 2015 est considérée comme l'année la plus représentative de l'occupation actuelle du bâtiment (voir Chapitre 4 – point 4.3). Outre la valeur faible de l'écart moyen de 2,87 [%], la différence de résultat entre consommation réelle et consommation simulée par le modèle (plus faible pour 2015) nous permet aussi de valider la calibration du modèle.

5.5. Résultats de la simulation thermique dynamique

Le modèle étant calibré, les différents résultats simulés par DesignBuilder peuvent être analysés. Le logiciel permet notamment d'étudier différents paramètres tels que : le confort, les apports internes, la consommation des combustibles, la production de dioxyde de carbone ... et ce, selon différents intervalles possibles (annuel, mensuel, hebdomadaire, quotidien et horaire).

5.5.1. Confort

Le modèle DesignBuilder permet d'étudier le confort défini par l'indice PMV de la théorie de Fanger. Dans les mesures réalisées in situ, seul un calcul ponctuel avait pu être réalisé selon ce modèle de confort. Comparons les résultats obtenus par la simulation réalisée. La Figure 63 représente l'évolution mensuelle (correspondant à une moyenne horaire sur un mois) de l'indice PMV pour la zone thermique n°1.

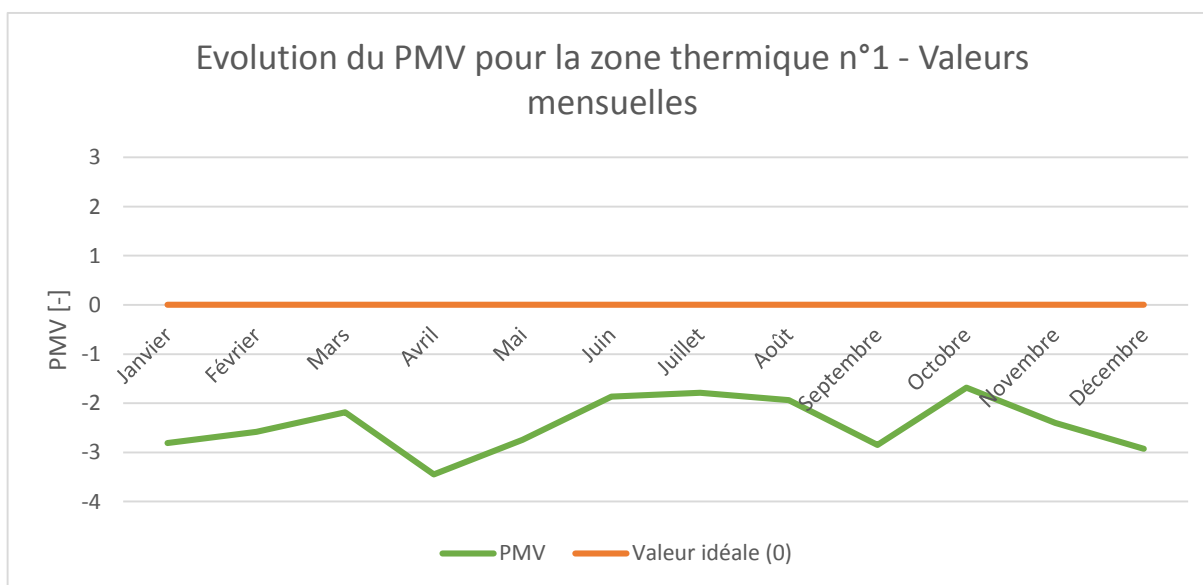


Figure 63 - Evolution du PMV pour la zone thermique n°1 au cours de l'année

Nous voyons que le PMV est loin de la situation idéale pour la quasi-totalité de l'année. En été, la courbe de tracé du PMV heure après heure montre qu'il peut tout de même atteindre des valeurs proches de 0. L'évolution de cet indice pour l'ensemble des autres zones thermiques suit la même tendance que celle montrée sur la figure précédente. Pour rappel, le PMV calculé à partir des mesures in situ (faites le 25 mars 2016 vers 16h00) dans la partie précédente du travail valait -1,5. Pour la zone thermique concernée, la valeur horaire du PMV pour cette date dans le modèle donne un résultat de -1,8, ce qui est bien en adéquation avec les mesures. Cet indice de confort doit globalement être amélioré dans toute proposition de rénovation du bâtiment.

5.5.2. Consommations énergétiques

La consommation en énergie primaire simulée par le logiciel est de **138** [kWh/m²an]. Pour rappel, cette valeur rassemble les consommations des différentes sources d'énergie à savoir l'électricité et le gaz pour ce bâtiment. Notons que les facteurs de conversion pour le calcul de la consommation en énergie primaire ont été choisis à 2,5 pour l'électricité et 1 pour le gaz. La Figure 64 ci-dessous représente l'évolution annuelle des consommations énergétiques pour les deux sources précitées.

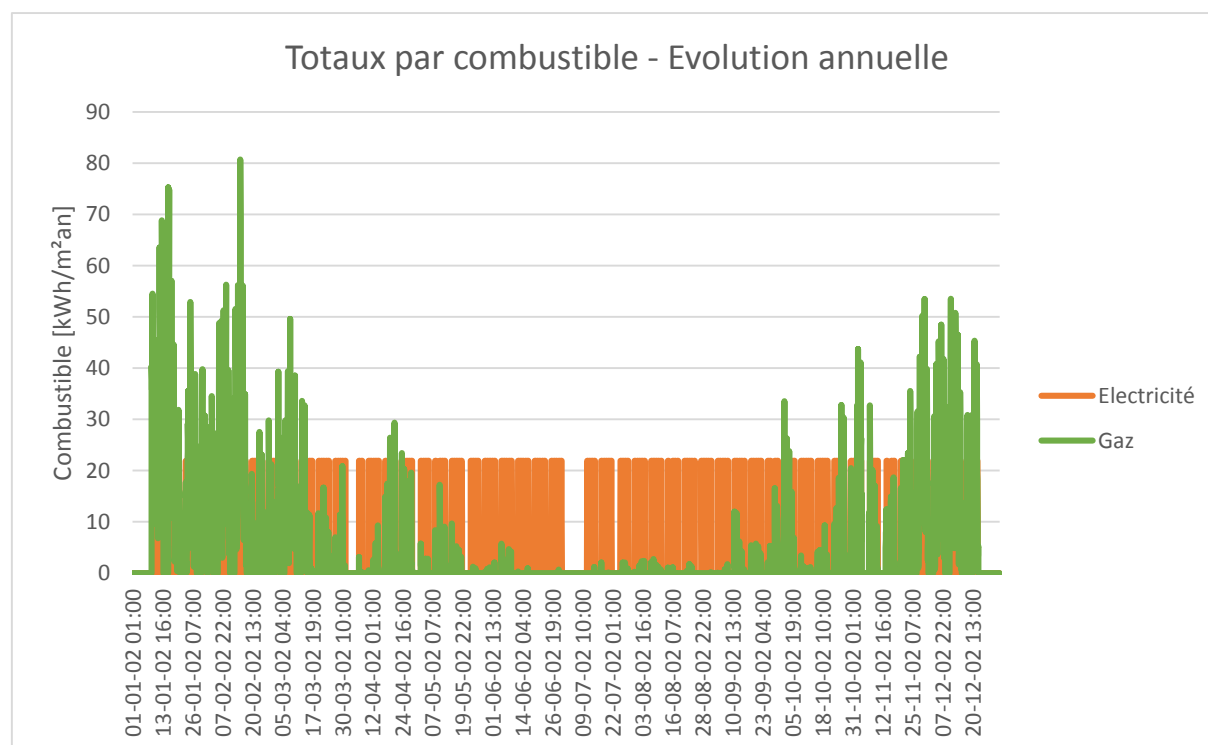


Figure 64 - Consommations énergétiques (gaz et électricité) : Evolution annuelle

Le profil de la consommation en gaz (pour le chauffage) suit une courbe logique : des pics de consommation en période hivernale tandis que la consommation diminue en été. Pour l'électricité, il s'agit d'un profil constant qui suit le planning d'occupation du bâtiment. Les périodes creuses

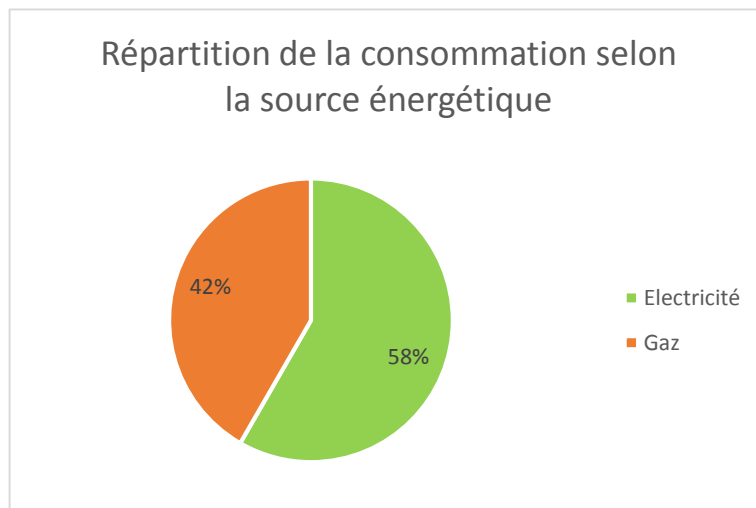


Figure 665 - Répartition de la consommation selon la source énergétique

correspondent aux nuits et aux périodes d'inoccupation, tandis que le tracé constant correspond aux consommations journalières. Par rapport à la consommation totale, le poids de chaque source d'énergie est représenté sur la Figure 65 ci-dessus. On peut constater que la part de consommation d'énergie électrique surpasse la consommation de gaz. Ce résultat semble logique au vu de l'intermittence de l'occupation actuelle du bâtiment. De plus, de grandes charges électriques dues aux équipements bureautiques sont présents. Cependant, du fait de l'incertitude par rapport à la consommation en électricité du bâtiment¹⁸, cette constatation peut souligner une limitation du modèle réalisé. Des données de consommation en électricité ont néanmoins pu être estimées par l'audit : le relevé de l'éclairage et des installations en place pour l'eau chaude sanitaire. Si on précise davantage le diagramme de la Figure 65 précédente, on obtient la répartition suivante (Figure 66). Celui-ci montre que les données de consommations mesurables in situ représentent plutôt 70 [%] du total de la consommation. Il serait intéressant de réaliser un audit complet sur la consommation électrique afin d'assurer la précision du modèle.

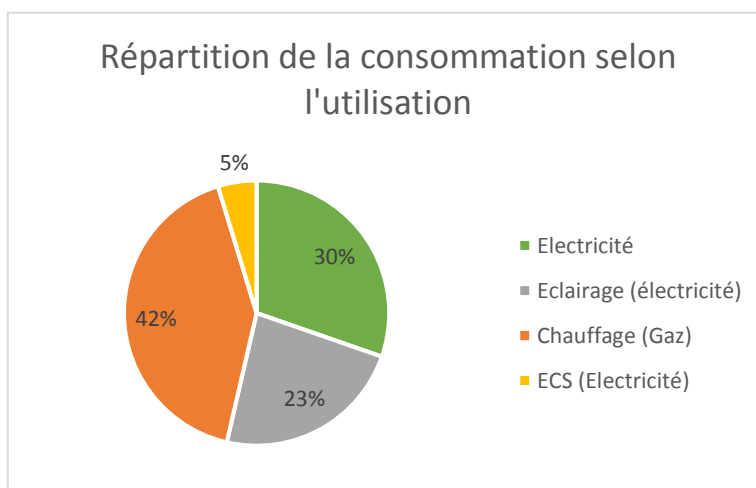


Figure 656 - Répartition de la consommation selon l'utilisation

¹⁸ Pour rappel, le bâtiment ne dispose pas d'un compteur électrique indépendant qui aurait permis de connaître la consommation annuelle exacte en électricité.

5.5.3. Surfaces déperditives

Dressons maintenant une comparaison entre les déperditions thermiques simulées des différentes parois du bâtiment. Cette comparaison est établie par l'intermédiaire du graphique représenté sur la Figure 67 ci-dessous.

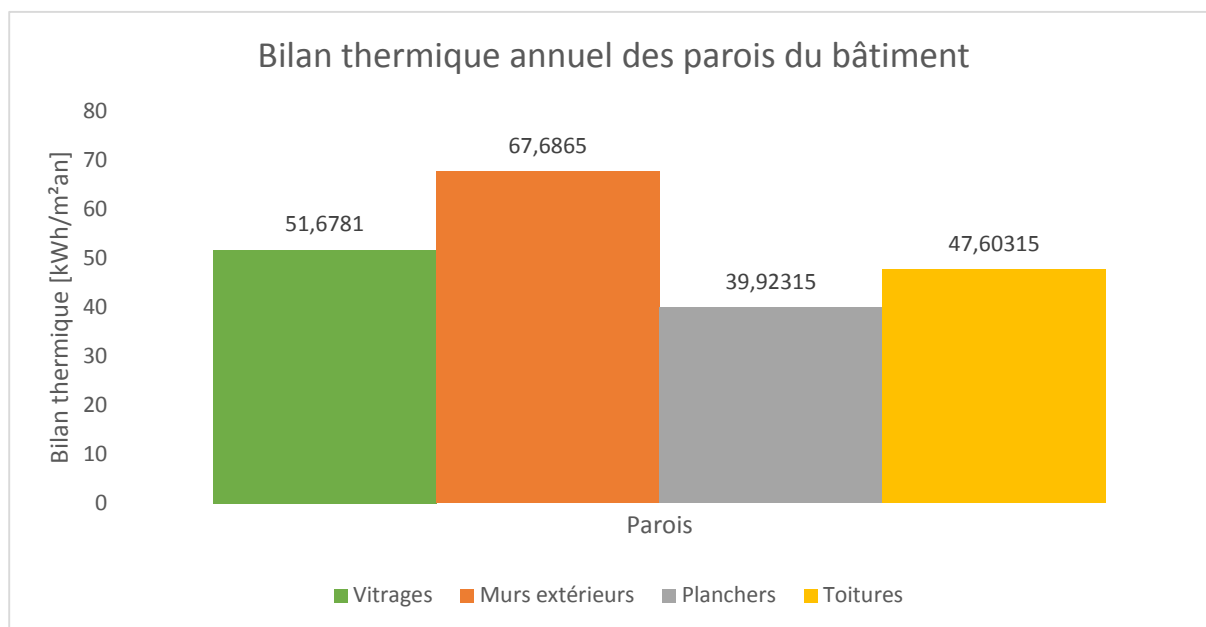


Figure 67 - Bilan thermique annuel des parois du bâtiment

Celui-ci permet de créer un classement par rapport aux parois déperditives de la construction. On voit que les murs extérieurs constituent les parois les plus problématiques. Dans l'ordre décroissant de déperditions thermiques, nous obtenons :

- 1- Les murs extérieurs ;
- 2- Les vitrages ;
- 3- Les toitures ;
- 4- Les planchers.

Ce résultat est intéressant pour l'établissement d'un projet de rénovation puisqu'il permet de hiérarchiser naturellement l'impact des performances des différentes parois. Ce résultat, simulé selon des valeurs horaires et mensuelles, permet aussi de vérifier les périodes les plus problématiques de l'année, qui correspondent bien à la période hivernale.

5.5.4. Apports internes et solaires

Dans la même logique que pour l'analyse des surfaces déperditives présentée précédemment, étudions l'impact des différentes sources d'énergie. Le graphique illustré sur la Figure 68 représente l'évolution mensuelle des différentes sources d'apports énergétiques.

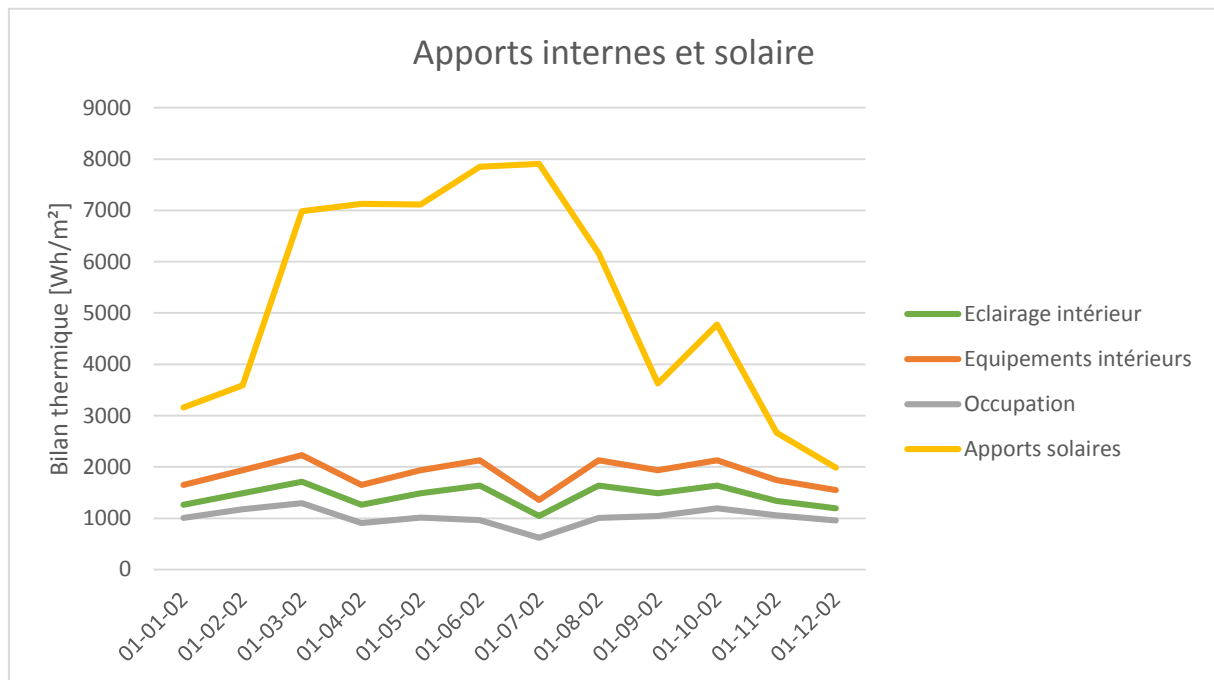


Figure 68 - Représentation des apports énergétiques internes et solaires

On voit directement l'impact du rayonnement solaire sur les apports énergétiques au sein du bâtiment. On observe également que, malgré l'influence de la végétation modélisée dans le logiciel, les apports restent importants en période estivale. Tout comme pour le point précédent, nous pouvons hiérarchiser les apports selon le classement suivant :

- 1- Apports solaires ;
- 2- Equipements intérieurs ;
- 3- Eclairage intérieur ;
- 4- Occupation du bâtiment.

Dans le cas présent, les profils de températures obtenus à l'intérieur des différentes zones thermiques ainsi que les indices de confort récoltés indiquent qu'il faut maximiser ces apports internes. En effet, la température de l'air extérieur ne dépasse que très ponctuellement 22 [°C] tandis qu'une température de 18 [°C] est très souvent rencontrée. Le PMV indique également une situation principalement orientée vers un sentiment de froid.

5.6. Limitations du modèle DesignBuilder

A travers le modèle réalisé, il convient de pointer certaines limitations qui peuvent être sources d'erreurs ou de pertes de précision.

Premièrement, le manque d'informations concernant la consommation en électricité du bâtiment empêche une calibration complète du modèle. Il est donc impossible de certifier que l'ensemble des résultats, bien que cohérents, ne collent parfaitement à la réalité physique. Comme déjà mentionné, il serait utile de placer un compteur temporaire de manière à obtenir, au minimum, un relevé concret de la consommation.

De plus, le logiciel ne permet pas de prendre en compte certains paramètres. L'impossibilité de modéliser un environnement parfaitement similaire à la réalité rend certaines mesures erronées. Dans ce cas, c'est la modélisation de la végétation qui rend le modèle imprécis. Celle-ci n'est modélisable que du point de vue de l'impact sur le rayonnement solaire et non sur l'impact hygrothermique que celle-ci opère sur le bâtiment. De la même façon, la définition du sol est uniquement précisée par l'encodage d'une température de surface et d'une température en profondeur mensuelle.

Enfin, précisons que certaines valeurs par défaut ont été utilisées, notamment pour les coefficients de performances des installations qui sont difficilement estimables in situ. Similairement, l'estimation des coefficients de transmission thermique se base essentiellement sur une comparaison avec des parois similaires, sans mesures réelles. La composition elle-même des parois est issue de la procédure d'audit réalisée dans le bâtiment où une erreur d'interprétation reste possible.

Chapitre 6 : Stratégies de rénovation

Ce chapitre détaille différents scénarios de rénovation pour le bâtiment étudié. Les critères pris en considération sont ceux qui définissent un bâtiment passif aujourd'hui en région wallonne. La Maison Strebelle ayant été réaffectée en bâtiment de bureaux, les critères fixés par la région wallonne pour la certification des bâtiments tertiaires passifs sont d'application. Ceux-ci sont définis comme suit (Service Public de Wallonie, 2011, p. 3):

- Besoins en énergie de chauffage inférieurs ou égaux à 15 [kWh/m².an] ;
- Besoins en énergie de refroidissement inférieurs ou égaux à 15 [kWh/m².an] ;
- Une étanchéité à l'air inférieure ou égale à 0,6 [vol/h] (sous 50 [Pa]) ;
- Des besoins en énergie primaire inférieurs ou égaux à 90 – 2,5 x Compacité¹⁹ ;
- Un confort intérieur estival vérifié par simulation dynamique (maximum 5 [%] du temps d'occupation au-delà de 25 [°C]).

De plus, les principes fondamentaux qui suivent sont recommandés (Passive House Institute, 2015) :

- Les parois opaques de l'enveloppe extérieure sont bien isolées, avec un coefficient de transmission thermique $U \leq 0,15$ [W/m².K] ;
- Les châssis sont performants thermiquement, avec un coefficient de transmission thermique $U \leq 0,8$ [W/m².K] et un facteur solaire g du vitrage proche de 0,5 ;
- Installation d'un système de ventilation performant comprenant un échangeur de chaleur qui permet de transférer au moins 75 % de la chaleur de l'air extrait à l'air neuf ;
- Un traitement particulier des nœuds constructifs.

6.1. Définition des scénarios de rénovation

Deux scénarios de rénovation sont étudiés et détaillés. Le premier est constitué d'une nouvelle isolation thermique appliquée par l'extérieur du bâtiment tandis que le deuxième se concentre sur une isolation par l'intérieur. Différents postes de la rénovation sont néanmoins similaires dans les deux cas de rénovation envisagés. Par exemple, les charges internes seront

¹⁹ Le calcul de la consommation en énergie primaire prend en compte les consommations liées au chauffage, au refroidissement, aux auxiliaires et à l'éclairage. Elle ne prend pas en compte les consommations liées à l'eau chaude sanitaire ou aux équipements (Plate-forme Maison Passive a.s.b.l., 2013).

définies de la même manière, des équipements identiques seront préconisés tandis que l'occupation du bâtiment reste identique à la situation actuelle. Pour chaque scénario, différentes propositions pour le chauffage seront comparées.

6.2. Scénario 1 : Isolation des murs par l'extérieur

Détaillons ce premier scénario de rénovation selon ses différentes composantes, à savoir : les charges internes, l'éclairage, la ventilation, l'enveloppe, la production d'eau chaude sanitaire ainsi que le système de chauffage.

6.2.1. Charges internes

Les charges internes des locaux restent identiques à celles mises en évidence dans la création de la situation initiale. Effectivement, nous considérons que l'occupation du bâtiment reste inchangée tant au niveau du nombre de personnes sur place qu'au niveau de l'horaire d'occupation annuel.

6.2.2. Eclairage

Nous avons pu démontrer, par la réalisation de l'audit énergétique, que l'éclairage intérieur du bâtiment est insuffisant pour répondre au niveau de confort minimum requis. Pour rappel, approximativement 200 [Lux] ont été mesurés sur l'ensemble des plans de travail alors qu'un éclairement de 500 [Lux] est conseillé pour un niveau de confort optimal (Institut Belge de l'éclairage, 2007). De manière à dimensionner l'éclairage à mettre en œuvre, une modélisation de chacun des bureaux dans le logiciel DIALux est réalisée. Précisons que seul le critère d'éclairement est vérifié de manière à simplifier la démarche mais que d'autres critères de confort existent pour l'éclairage. De plus, les ouvertures vers l'extérieur ne sont pas modélisées de manière à simplifier le dimensionnement.

Nous considérons que les éclairages mis en œuvre dans les espaces de circulation au moyen des tubes TL T8 peuvent être conservés (car ce sont des zones qui ne nécessitent qu'un éclairement de 100 [Lux]). Par



Figure 69 - Luminaire RIDI ABRF-R2X145/35ND-SM-Driver et

contre, tous les luminaires des bureaux doivent être remplacés. Le luminaire choisi est de type LED pour son aspect économique (du point de vue durée de vie et consommation électrique). La Figure 69 précédente illustre ce luminaire ainsi que sa courbe photométrique. Il intègre deux tubes LED de 35 [W]. Il est à noter que toutes les données sont disponibles sur le site internet du fabricant²⁰.

Un extrait des données détaillées est représenté dans le Tableau 9 suivant et montre des performances bien supérieures par rapport aux luminaires en place actuellement.

Tableau 9 - Propriétés du luminaire RIDI ABRF-R2X145/35ND-SM / 0650047

Puissance nominale	68 [W]
Efficacité lumineuse	115 [lm/W]
Indice de rendu des couleurs	> 80
Flux lumineux	7830 [lm]
Température de couleur	4000 [K]
Durée de vie	50000 [h]

La Figure 70 ci-dessous représente la dénomination adoptée pour localiser les différents locaux où le nouvel éclairage est mis en œuvre.

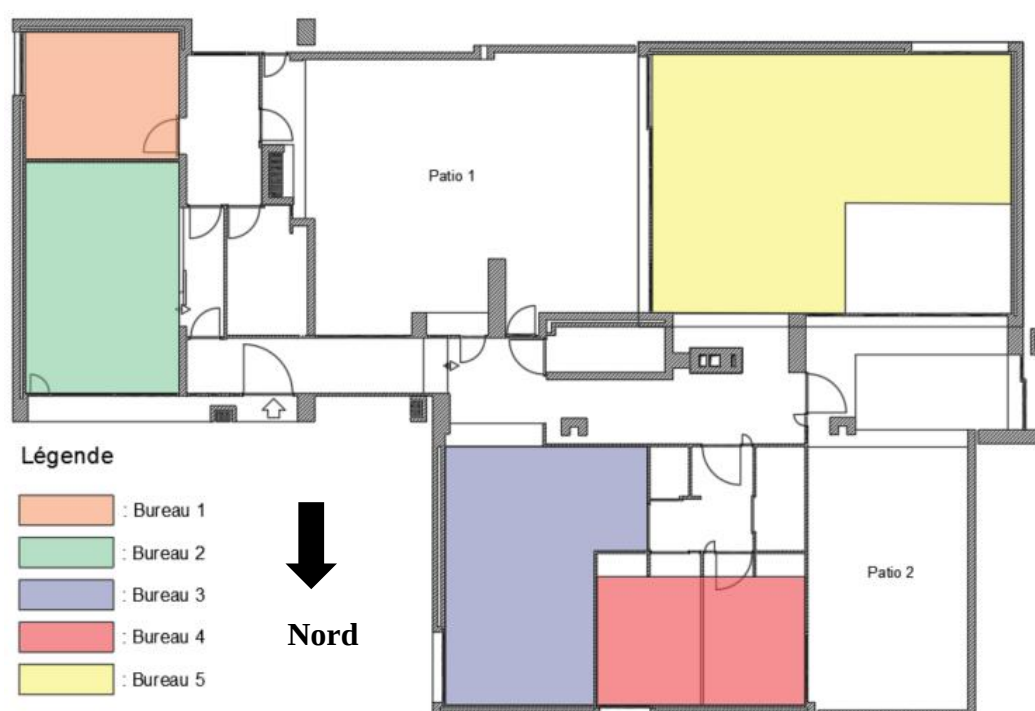


Figure 70 - Dénomination des locaux pour la rénovation de l'éclairage

²⁰ Disponible sur : <http://www.ridi.de/de/leuchten/abrfb-abrfbi-abrfbw/abrfb-r-/abrfb-r-sm/abrfb-r2x145-35nd-sm.html>

Décrivons désormais successivement les résultats obtenus pour chacun des bureaux. Notons que nous tentons de positionner les nouveaux luminaires à l'emplacement des anciens de manière à pouvoir récupérer les différents câblages en place. Si ceux-ci s'avéraient en trop mauvais état lors de la mise à nu du bâtiment, ils pourraient néanmoins servir de passe-câble pour la mise en œuvre du nouveau câblage.

Bureau 1

Pour ce bureau, le logiciel DIALux permet de modéliser la géométrie du local, telle que représentée sur la Figure 71 ci-contre. Un luminaire correspondant à la description précédente est installé. Après simulation, les résultats d'éclairement peuvent être obtenus visuellement selon une cartographie tridimensionnelle telle que présenté sur la Figure 72 ci-dessous. Le logiciel a permis de vérifier que le seul luminaire installé (positionné à l'emplacement du luminaire actuel) suffit pour atteindre un éclairage moyen sur le plan de travail (fixé à 85 [cm] du sol) de **596 [Lux]**.

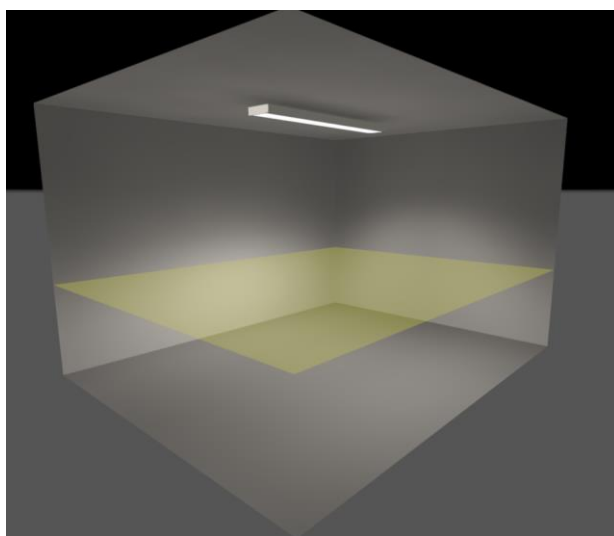


Figure 71 - Eclairage mis en place dans le bureau n°1

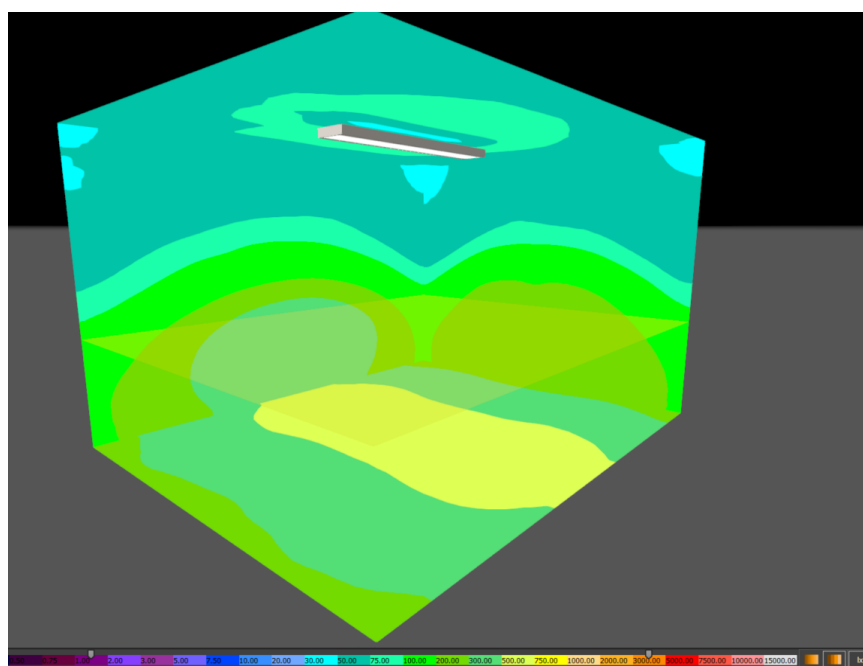


Figure 72 - Carte d'éclairement du bureau n°1 (DIALux)

Pour les résultats des autres locaux, ces cartographies d'éclairement sont placées dans la partie annexe de ce travail (voir Annexe 6).

Bureau 2

Pour le deuxième bureau, l'éclairement moyen sur le plan de travail est de **629 [Lux]** pour l'implantation de deux luminaires aux mêmes emplacements que les luminaires existants (voir Figure 73 ci-contre). Les courbes d'éclairements simulées pour ce local sont situées en partie annexe de ce travail (voir Annexe 6).

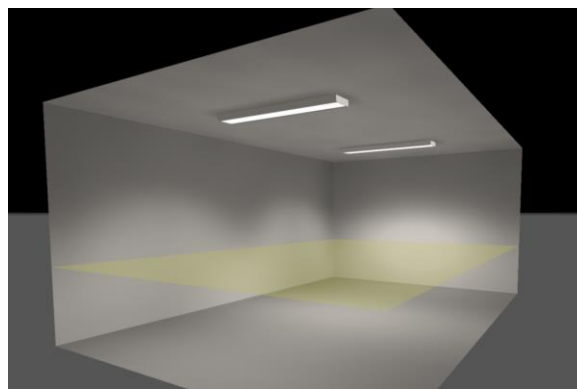


Figure 73 - Eclairage mis en place dans le bureau n°2

Bureau 3

Pour le bureau n°3, deux éclairages en ligne étaient en place dans la situation initiale et deux nouveaux éclairages les remplacent. Néanmoins, la disposition change légèrement pour optimiser le niveau d'éclairement sur le plan de travail. La simulation DIALux montre que la disposition optimale correspond à celle illustrée sur la Figure 74 ci-

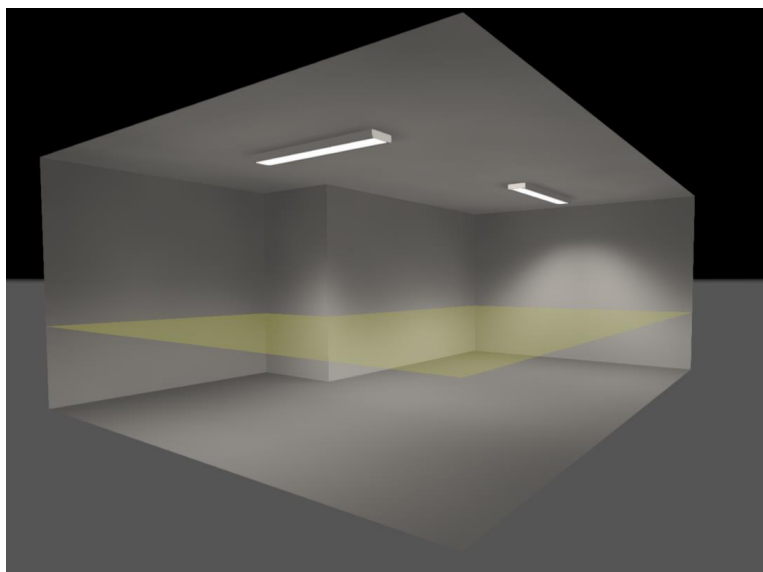


Figure 74 - Eclairage mis en place dans le bureau n°3

contre. La géométrie de la pièce et la position des bureaux favorisent une répartition perpendiculaire des deux luminaires. Les résultats d'éclairement moyen donnent un niveau de **515 [Lux]** sur le plan de travail (voir Annexe 6).

Bureau 4

Pour le bureau n°4, deux luminaires sont positionnés à l'emplacement des tubes lumineux actuels, tel que représenté sur la Figure 75 ci-contre. L'éclairement sur le plan de travail vaut **788 [Lux]** et la cartographie de l'éclairement est représentée dans l'annexe 6 du travail.

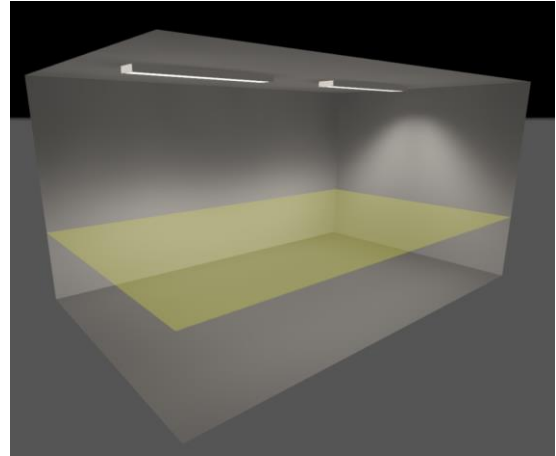


Figure 75 - Eclairage mis en place dans le bureau n°4

Bureau 5

Le dernier local simulé est représenté sur la Figure 76 ci-dessous. Le logiciel a permis de montrer que pour ce local, un luminaire supplémentaire doit être ajouté afin d'atteindre un minimum de 500 [Lux] sur le plan de travail. La disposition diffère donc légèrement de la situation actuelle bien que l'orientation des luminaires est conservée. L'éclairement moyen sur le plan de travail est de **613 [Lux]**. La cartographie est aussi représentée dans la partie annexe 6.

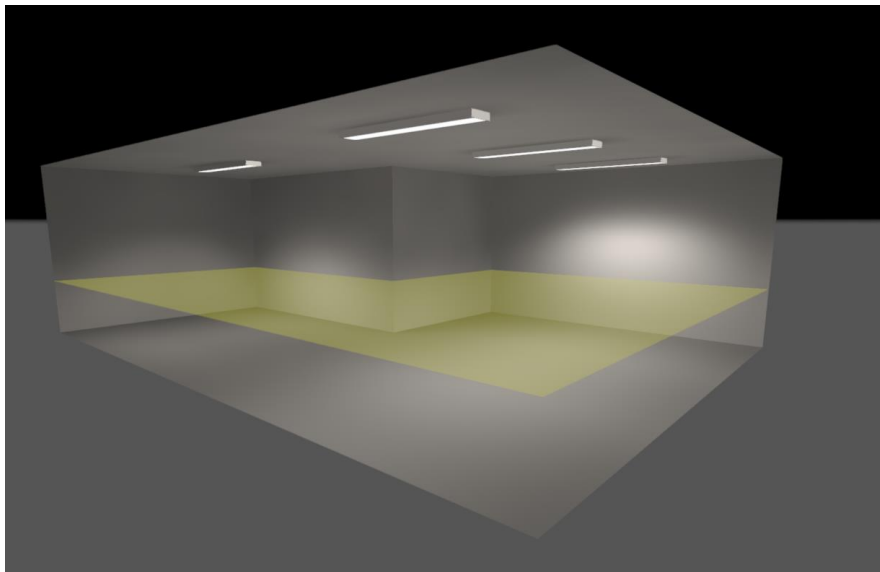


Figure 76 - Eclairage mis en place dans le bureau n°5

Au final, **11** nouveaux luminaires sont donc nécessaires dans le bâtiment. Le coût total de ces luminaires est estimé à **2277 euros**, selon les prix indiqués par le fabricant. Ils se positionnent un maximum aux emplacements originels bien que l'insuffisance d'éclairement montre la nécessité d'ajouter certains points lumineux supplémentaires.

6.2.3. Ventilation

Pour la ventilation, l'audit a montré qu'aucun système n'est actuellement en place au sein du bâtiment. L'objectif étant d'atteindre les performances d'un bâtiment passif, la recommandation relative à la ventilation doit être respectée. Pour rappel, le système de ventilation doit comprendre un échangeur de chaleur qui permet de transférer au moins 75 % de la chaleur de l'air extrait à l'air pulsé. En d'autres termes, une ventilation mécanique double flux récupérant la chaleur de l'air extrait doit être mise en place.

Pour la mise en œuvre d'une ventilation, les débits d'air à apporter doivent être calculés. Différentes normes et règlements précisent ces débits dans le cas de bâtiments non résidentiels. En région wallonne, l'annexe C3 de la PEB²¹ impose une qualité d'air au minimum égale à la catégorie INT3 (qualité d'air acceptable), qui correspond à un débit minimum de 22 [m³/h] par personne (Gouvernement Wallon, 2014). Cette annexe impose aussi un taux d'occupation défini pour les usages des locaux. Un débit minimal est fixé à 25 [m³/h] par wc. Le Règlement Général pour la Protection du Travail impose quant à lui un débit d'air minimal de 30 [m³/h] par personne (Lesage, 2009), valeur qui sera utilisée pour l'évaluation du débit nécessaire pour la Maison Strebelle.

La dénomination des locaux réalisée lors du dimensionnement de l'éclairage est toujours valable dans cette partie du travail. Le Tableau 10 ci-dessous reprend les différents débits calculés en fonction des débits d'air minimum décrits ci-avant. Le débit d'air est également converti en volume d'air par heure de manière à encoder ces changements dans DesignBuilder.

Tableau 10 - Débits d'air pour la ventilation mécanique

Local	Nombre d'occupants	Débit d'air total [m ³ /h]	Débit d'air total [Vol/h]
Bureau 1	2	60	2,93
Bureau 2	3	90	2,41
Bureau 3	3	90	1,56
Bureau 4	2	60	1,23
Bureau 5	4	120	1,173
WC 1	/	25	8,65
WC 2	/	25	3,8
Cuisine	/	75	3,33

Une fois ces débits d'air fixés, l'étape suivante consiste à penser le réseau de ventilation en tenant compte des caractéristiques géométriques du bâtiment. Une fois ce réseau établi, les

²¹ Cette annexe est elle-même basée sur la norme européenne EN 13779 : « Ventilation dans les bâtiments non résidentiels – Spécifications des performances pour les systèmes de ventilation et de climatisation ».

pertes de charges dans les conduites peuvent être évaluées. La machine, nécessaire pour respecter les débits d'air, peut être choisie selon un point de fonctionnement proche du couple « pertes de charges du réseau/débit d'air ».

Une simple réflexion sur le positionnement des gaines de ventilation a permis de mettre en lumière la difficulté de mettre en place un nouveau système de ventilation mécanique. Les hauteurs sous plafond des différents locaux sont faibles (de 2 mètres dans le couloir central à 2,5 mètres dans certains bureaux), ce qui rend la construction d'un faux-plafond intégrant les gaines difficiles à imaginer. De même, l'adjonction d'un système permettant l'intégration des gaines dans une chape de sol par exemple est aussi difficile. C'est donc l'implantation des conduites (et pas tellement celle du groupe de ventilation centralisé) qui pose problème. Il semble possible de trouver une solution dans ce sens par l'adjonction de gaines particulières, qui pourraient se placer dans certains angles (comme des gaines en caisson), mais cette solution ne paraît pas optimale d'un point de vue de l'espace intérieur généré.

La solution envisagée consiste à utiliser une technologie relativement récente pour ventiler le bâtiment : la ventilation décentralisée. Celle-ci consiste à installer, pour chaque local, un appareil qui permet à la fois d'extraire et d'insuffler l'air, en transférant la chaleur de l'air extrait à l'air insufflé. Différents fabricants proposent des solutions de plus en plus performantes et relativement discrètes. Les appareils peuvent être inclus soit au niveau des parois des locaux (parois extérieures) ou encore intégrés en partie haute des châssis de fenêtres, comme sur la Figure 77 ci-dessous²².

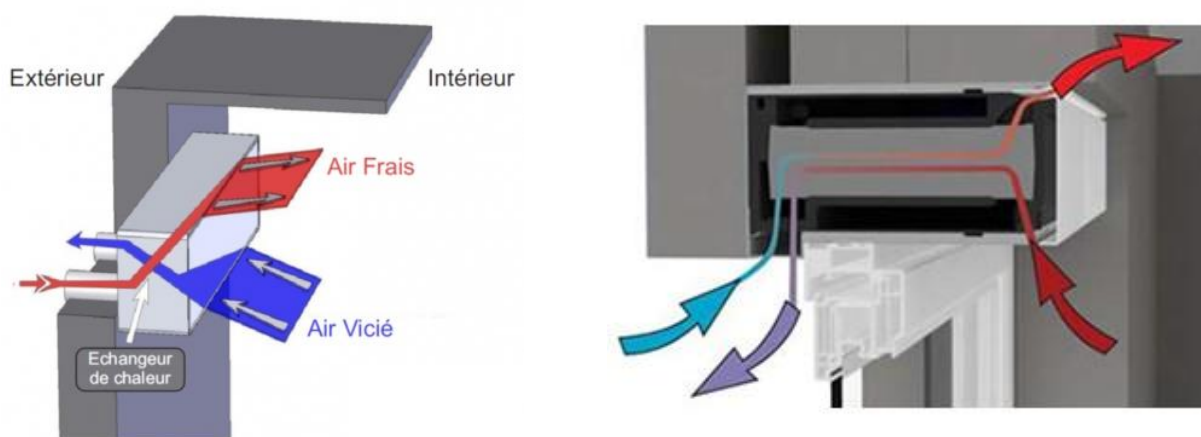


Figure 77 - Type de ventilation décentralisée (source : Airria)

²² Les appareils représentés sont créés par l'entreprise Airria, entreprise locale (située à Ans) et spécialisée dans la fabrication de ventilation double flux décentralisée.

Les fiches techniques de ces équipements montrent qu'il est possible d'atteindre des débits de l'ordre de 15 à 75 [m³/h]. L'idée est donc de coupler les deux installations pour atteindre les débits calculés pour chaque local. Un point d'attention doit être porté sur le niveau sonore de ce système de ventilation ainsi que sur l'efficacité thermique du récupérateur de chaleur. Le fabricant indique une efficacité thermique de 68-80 [%] (ce qui peut correspondre au critère passif), un niveau sonore de 25-56 [dBA] à 1 mètre (qui peut être acceptable pour l'occupation des locaux²³) et une puissance électrique allant de 7 à 45 [W].

Dans le cas de la Maison Strebelle, ces équipements semblent adaptés pour différentes raisons. Le manque d'espace dans les locaux intérieurs pose des problèmes pour dimensionner un réseau plus classique. En outre, le système de convecteurs à gaz présent actuellement pour le chauffage devant être remplacé (faible efficacité énergétique), certains percements des façades pourraient être réutilisés pour l'introduction de ce système de ventilation. Une attention particulière doit néanmoins être portée sur la mise en œuvre d'une étanchéité à l'air correcte autour des dispositifs. Enfin, l'avantage majeur réside dans l'individualisation des équipements (si une panne survient, cela n'impacte pas l'ensemble des locaux et occupants).

6.2.4. L'enveloppe

L'enveloppe constitue un point particulier à traiter dans le cadre de la rénovation de la Maison Strebelle. Les caractéristiques architecturales et patrimoniales du bâtiment doivent être respectées. L'isolation par l'extérieur induit une modification de l'apparence initiale du bâtiment puisque son enveloppe est, en tout ou en partie, recouverte. Un travail de recherche sur les matériaux qui ne dénaturent pas les intentions originelles de l'architecte doit être effectué. L'intégration de la construction à la nature immédiate doit être respectée mais surtout traduite par l'intermédiaire de ce revêtement extérieur. Décrivons successivement les différentes parois imaginées dans le cadre de ce projet de rénovation.

6.2.4.1. Murs extérieurs

Pour les parois constituées de deux couches de blocs de béton englobant une coulisse ventilée, notre choix s'est naturellement porté vers l'étude d'un revêtement en béton. En effet, ce dernier reste le matériau de prédilection utilisé au départ sur l'ensemble du site du Sart

²³ La norme « NBN EN 13779 : Les systèmes de ventilation pour les bâtiments – critères de conception de l'ambiance intérieure » fixe un niveau sonore maximal de 35 [dBA] pour un bâtiment de bureau.

Tilman. Même si la majorité des derniers bâtiments implantés possèdent des parements métalliques, la Maison Strebelle reste le témoin de la première période d'édification du site, où l'emploi du béton était caractéristique. En outre, la vie de la Maison Strebelle et des autres bâtiments du campus universitaire ont permis de montrer que la nature laisse sa trace sur ce matériau. Le but de ce parement n'est pas d'obtenir un fini de surface parfait en façade, mais bien de conserver un aspect brut et minéral qui pourrait même évoluer visuellement (teinte, verdure, ...). Ceci permet de se raccrocher à l'idée d'insertion du bâtiment dans son contexte. Le choix du béton de parement s'est porté vers un béton matricé. Cette technologie offre une large gamme de textures, teintes et reliefs. Le principe est relativement simple : marquer un matériau plastique avec une structure de surface choisie afin de créer une matrice. Cette matrice est alors placée contre les panneaux de coffrages qui servent à fabriquer le panneau de parement (Syndicat Français de l'Industrie Cimentaire (SFIC), 2016) de manière à littéralement imprimer la surface vue.

La Figure 78 ci-dessus illustre quelques exemples de textures réalisées selon le principe du béton matricé (fabricant RECKLI).



Figure 78 - Exemples d'éléments de façade réalisés par "béton matricé" (RECKLI)

Pour la Maison Strebelle, la texture représentée sur la Figure 79 a été sélectionnée pour différentes raisons. Sa verticalité permet de souligner la verticalité de la végétation aux alentours, tout en utilisant un langage similaire aux travées « creusées » dans la maçonnerie de blocs pour y insérer les baies vitrées. De plus, les stries verticales facilitent l'écoulement de l'eau dans cet environnement humide, élément primordial pour assurer la durabilité du parement. L'irrégularité de ces stries induit aussi une certaine forme d'organisation hasardeuse, typique des environnements boisés.

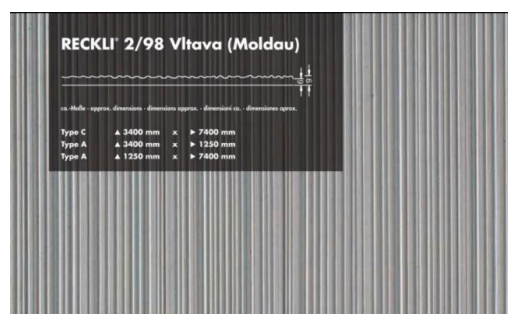


Figure 79 - Texture béton matricé choisi comme revêtement de

Outre ses caractéristiques esthétiques, la façade doit atteindre les performances recommandées pour un bâtiment passif. La valeur du coefficient U originellement égale à 2,5 [W/m².K] doit être abaissée à une valeur de 0,15 [W/m².K]. Pour atteindre cette valeur, la composition suivante est adoptée, de l'intérieur vers l'extérieur :

- Bloc de béton L : 39 x l : 9 x h : 19 cm (existant) ;
- Bille de polystyrène insufflées dans l'ancienne coulisserie ;
- Bloc de béton L : 39 x l : 19 x h : 19 cm (existant) ;
- Isolation en laine de verre Multimax 30 : 15 cm ;
- Vide ventilé : 4 cm ;
- Panneau de finition en béton matricé : 2,5 cm.

$$U = 0,144 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

La Figure 80 suivante, issue de DesignBuilder, illustre l'évolution de la paroi telle que décrite précédemment.

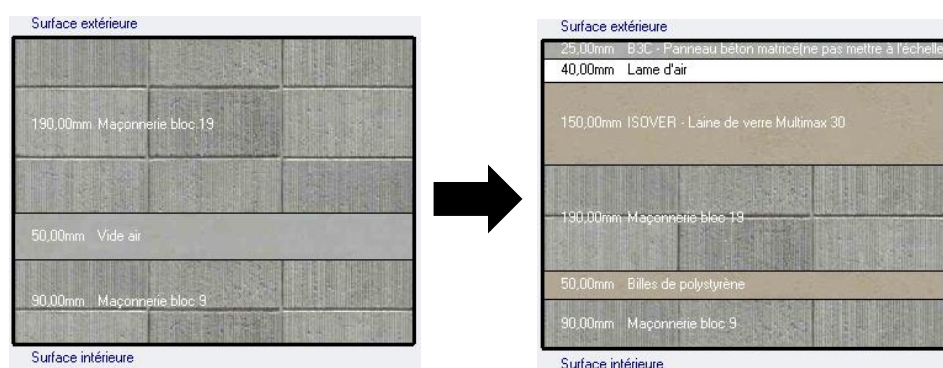


Figure 80 - DesignBuilder : modification de la paroi existante en béton

Terminons la caractérisation de cette paroi par préciser une propriété intéressante du béton matricé. La matrice utilisée pour créer chaque panneau est réutilisable entre 50 et 100 fois (selon la fiche technique d'un fabricant). Si celle-ci est conservée après la réalisation de l'ensemble des panneaux, elle peut servir à reproduire des éléments en cas de défaut ou de dégradations. Il est difficile d'obtenir un ordre de prix pour la réalisation de ces panneaux préfabriqués en béton matricé. Néanmoins, il est clair que le processus de fabrication peut engendrer un surcout de l'opération. En plus du coût de la matière première, il faut compter le prix de la matrice mais aussi et surtout la mise en œuvre sur site. Un calepinage précis doit être réalisé de manière à répartir uniformément les panneaux et ainsi éviter de multiplier les découpes. Si ce supplément probable de coût ne peut être supporté, il est tout à fait possible d'obtenir un fini de surface semblable avec d'autres matériaux. Le crépis constitue un exemple couramment utilisé. Des fabricants et entreprises proposent des textures variées qui permettent d'obtenir le fini de surface souhaité. La Figure 81 ci-contre illustre une texture striée produite par un fabricant²⁴. Cette solution est bien moins onéreuse que la fabrication des panneaux de béton matricé pour un fini de surface assez semblable. Néanmoins, la question de la durabilité est probablement à approfondir pour effectuer un choix définitif.

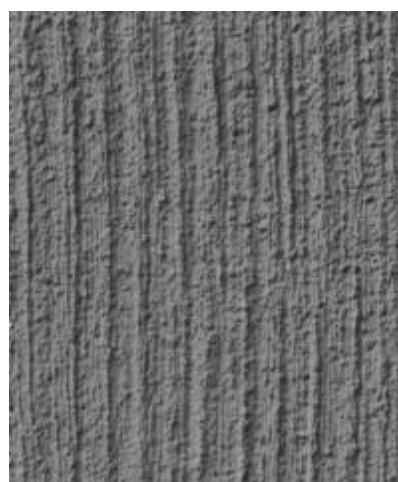


Figure 81 - Exemple de texture réalisable par enduit de surface

Un second type de paroi est rencontré dans la Maison Strebelle : les murs à ossature légère en bois. Ces fins murs de 6 [cm] se trouvent au niveau des façades non porteuses du bâtiment. Nous avons obtenu une valeur U de 0,9 [W/m²K]. Ces murs étant relativement étroits, il semble difficile de leur adjoindre une isolation et un parement supplémentaire par l'extérieur. De plus, pour des raisons d'étanchéité à l'air, nous choisissons de les remplacer par une ossature bois plus épaisse. Nous envisageons ainsi une structure porteuse en bois classique avec, de l'intérieur vers l'extérieur :

- Lambris intérieur semblable aux panneaux actuels ;
- Isolation de laine de verre 60 [mm] dans structure bois horizontale 60x38 [mm] ;
- Structure primaire en bois 150x50 [mm] et isolation laine de verre 150 [mm] ;
- Panneaux de contreventement en OSB 18 [mm] ;

²⁴ Produit disponible sur le site : <http://www.stoag.ch/fr/produits/guide-produits/facade/enduits-de-facade/enduits-de-facade.html>

- Pare-pluie ;
- Lattage et contre-lattage ;
- Bardage bois vertical ajouré.

Cette composition de paroi permet d'atteindre un coefficient de transmission thermique U de 0,15 [W/m^2K] comme préconisé. Notons que nous gardons la même logique que la composition initiale. Nous avons néanmoins choisi un bardage bois en remplacement de l'actuelle finition en panneaux de bois. Il est important que les planches de bardage vertical aient des largeurs différentes de manière à reproduire l'effet actuel, tendant à dynamiser ces parois.

La dernière paroi de l'enveloppe à traiter est le mur en bloc de béton recouvert d'ardoise. Cette dernière suit exactement la même logique que le mur en bloc de béton décrit plus haut. Du côté extérieur du mur, un lattage et un contre-lattage supportent des ardoises en fibres-ciment. Cette couche rapportée sur le mur en béton ne possède ni isolation, ni étanchéité à l'eau supplémentaire. Pour améliorer les performances thermiques de cette paroi, nous envisageons une isolation de la coulisse par insufflation de billes de polystyrène, une isolation du mur extérieur par une couche de 15 [cm] de laine de verre. Un pare-pluie, un lattage et un contre-lattage sont remontés sur l'isolation de manière à pouvoir reproduire le parement en ardoises. La valeur U obtenue est identique à la valeur du mur de béton matricé (0,144 [W/m^2K]).

6.2.4.2. Toitures

Pour rappel, deux types de structure de toiture coexistent dans le bâtiment. Pour la toiture en structure bois, il est préférable de remplacer l'ensemble de l'étanchéité ainsi que l'isolation entre structure. Des pièces de bois dégradées ainsi que le support d'étanchéité en multiplex doivent également être remplacés mais il est difficile de chiffrer exactement la quantité. Nous avons constaté qu'une isolation thermique en laine de verre de 20 [cm] était déjà présente dans la composition de paroi pour un U calculé de **0,23** [W/m^2K]. Dans le scénario rénové, nous remplaçons cette laine par une laine de verre très performante actuelle ($\lambda =$ **0,032** [W/mK]) sur une épaisseur totale de 30 [cm]. La valeur U de la situation rénovée est de **0,131** [W/m^2K], ce qui correspond bien aux recommandations du passif.

Pour les toitures en béton, une simple isolation rigide est placée en partie supérieure de manière à atteindre la valeur U recommandée (valeur initiale de 3 [W/m²K]). Deux épaisseurs de 12 [cm] de panneaux rigides en polyuréthane (Recticel Eurothane Bi-4) sont mises en œuvre pour une valeur U finale de 0,105 [W/m²K]. La Figure 82 ci-dessous représente les modifications effectuées dans DesignBuilder.

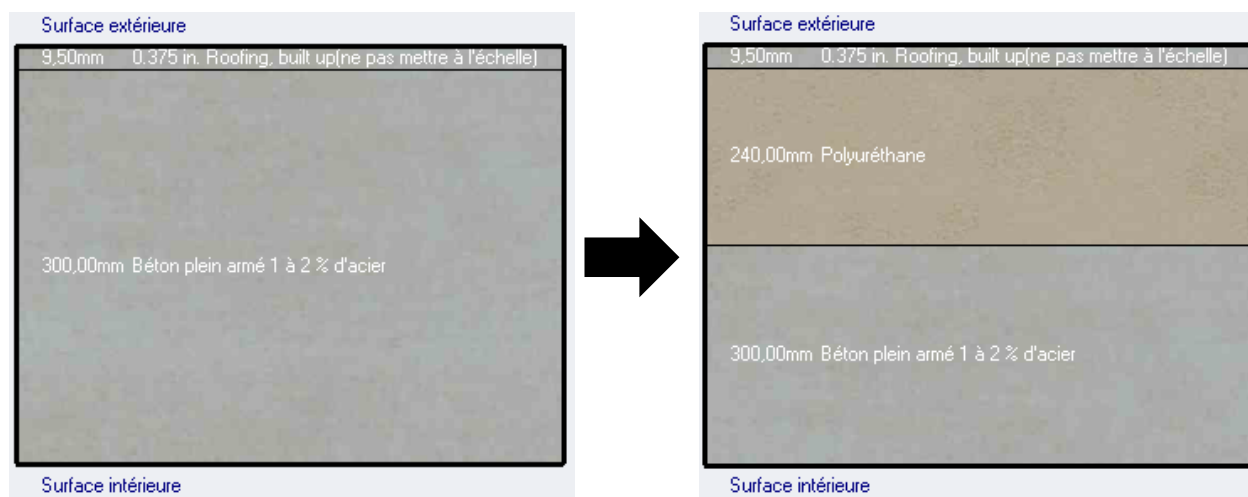


Figure 82 - DesignBuilder : modification de la toiture en béton

6.2.4.3. Châssis et vitrages

Abordons désormais les différentes ouvertures de la Maison Strebelle. Nous avons pu constater, à travers l’audit réalisé, que l’ensemble des châssis de la construction sont en bois massif, assortis de simples ou de doubles vitrages. Rappelons les valeurs U évaluées pour les différentes baies. Pour les châssis à vitrage simple, le U_w de la fenêtre vaut 5 [W/m².K], tandis que les châssis à double vitrage ont une valeur U de 2,6 [W/m²K]. Le standard passif recommande une valeur U inférieure à 0,8 [W/m²K] (et un facteur solaire du vitrage de 0,5), valeur difficilement atteignable sans triple vitrage. Les châssis en place dans le bâtiment ne respectent donc pas ces critères. Une solution pourrait être de modifier les châssis existants pour en améliorer les performances. Pratiquement, cette proposition semble compliquée à mettre en place dans le cas de ce bâtiment. Premièrement, la dimension des profilés en eux-mêmes rend leur adaptation pour du triple vitrage impossible. De plus, la mauvaise qualité de l’étanchéité des châssis induirait une remise à niveau de tous les joints. Une étude plus approfondie de chacun des châssis permettrait de confirmer ou non cette hypothèse. Cette étude pourrait consister à analyser la qualité du bois par poinçonnement manuel, à vérifier la rectitude et l’équerrage des châssis, à s’assurer de la qualité des assemblages, des quincailleries et des joints.

Dans cette optique, nous choisissons la solution d'un remplacement complet des châssis et vitrages. Le choix des profilés doit néanmoins respecter la même logique de composition que les châssis d'origine, à savoir des profilés en bois formellement simples et discrets, sans moulures et ornements. Les profilés choisis pour atteindre les performances recommandées sont en bois, mais nous choisissons un profilé recouvert d'un capot en aluminium du côté extérieur (voir Figure 83). La finition bois intérieure permet de respecter le style intérieur de la construction tandis que le capot en aluminium assure la durabilité des cadres et peut permettre d'intégrer une couche de polyuréthane, augmentant davantage les performances thermiques. Notons que le positionnement des différentes traverses des châssis fixes et ouvrants doit respecter au maximum la configuration actuelle. Pour le choix des vitrages, nous suivons les recommandations du passif et optons pour un triple vitrage à haute performance (voir Figure 84 ci-après).

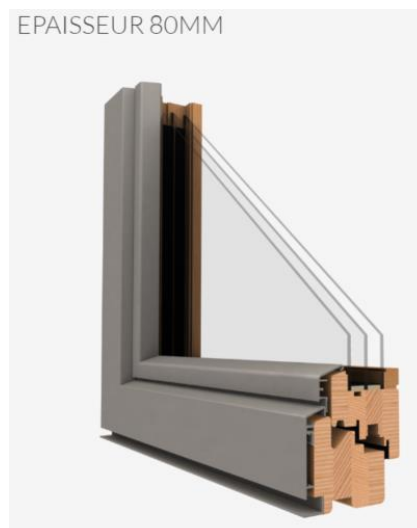


Figure 83 - Châssis bois et capot en aluminium (source ; Fabricant Riche)

Les performances obtenues avec le cadre et vitrage respectent les recommandations et sont :

- $U_g = 0,6 \text{ [W/m}^2\text{.K]} ;$
- $U_f = 0,8-1,04 \text{ (avec ou sans coupure en liège) [W/m}^2\text{.K]} ;$
- Facteur solaire $g = 0,5 [-].$

→ $U_w \text{ (fenêtre)} = 0,77$

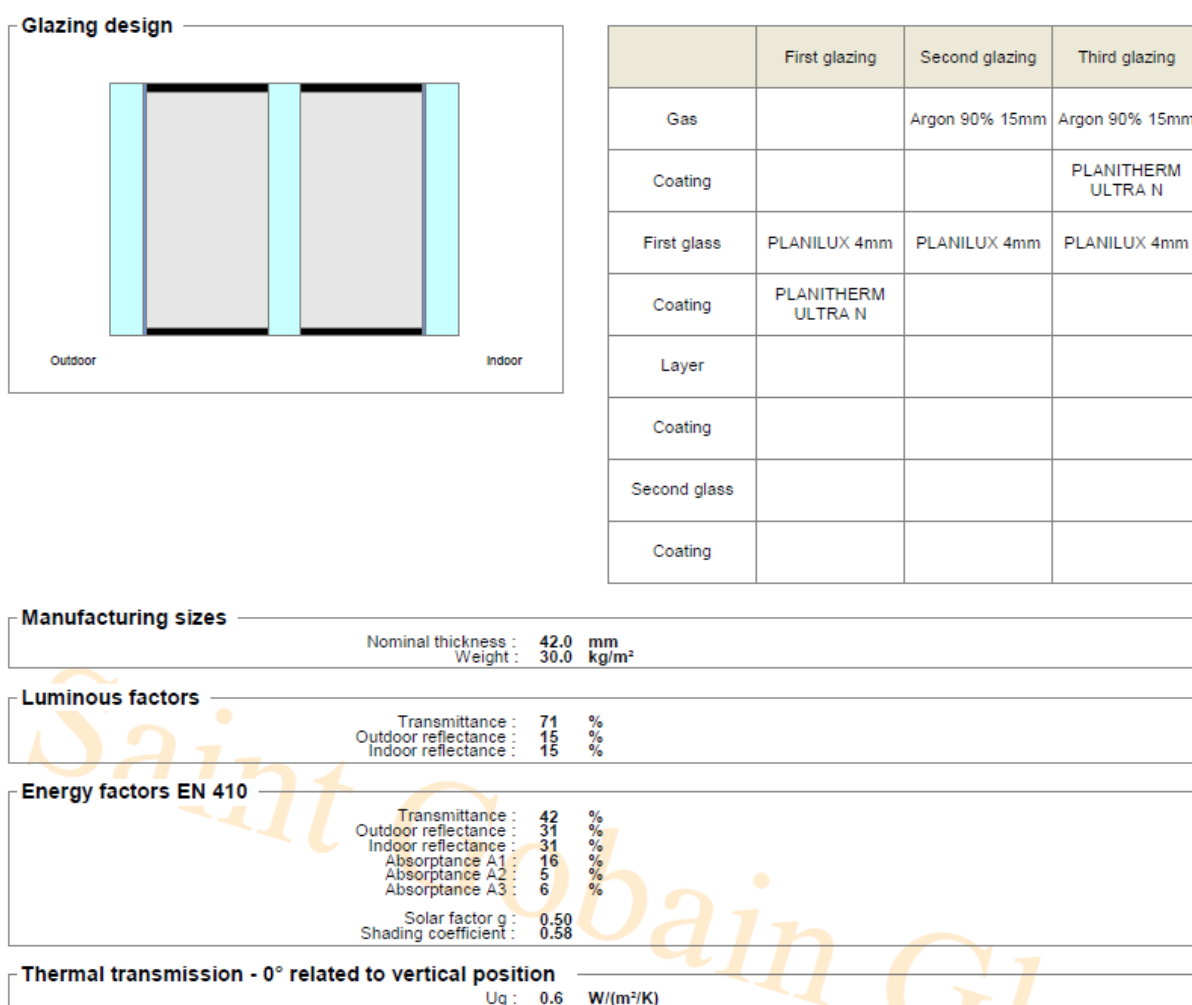


Figure 84 - Triple vitrage (source : Saint-Gobain)

6.2.4.4. Dalles de sol

Les dalles de sol de la construction ont montré des températures faibles durant la phase de mesure de l'audit. Néanmoins, la simulation thermique dynamique a permis de montrer qu'il s'agissait de la typologie de parois la moins problématique du point de vue des déperditions thermiques. Il est clair qu'une isolation doit être réalisée de manière à assurer un confort intérieur optimal. La configuration des lieux limite cependant le nombre de possibilités. Des vides ventilés sont bien présents sous les dalles de béton mais ceux-ci sont d'une faible hauteur. Il serait néanmoins intéressant de vérifier cette hauteur de manière à confirmer l'impossibilité d'isoler les dalles de sol par la face inférieure. Nous choisissons donc, dans ce scénario de rénovation, de supposer l'isolation impossible par la face inférieure et tentons d'isoler les différents planchers par leurs faces supérieures.

Vu la faible hauteur sous plafond des différents locaux du bâtiment, la hauteur rajoutée

sur la structure existante doit être limitée. Une surélévation du niveau de sol intérieur entraîne aussi une attention particulière à apporter aux appuis des châssis. Dans le cas d'un remplacement complet des châssis, les hauteurs de ceux-ci seront modifiées et l'appui repensé. La solution envisagée consiste à utiliser une technique sèche par l'adjonction d'un panneau d'isolation rigide en polyuréthane ($\lambda = 0,022$ [W/mK]) de 60 [mm], d'un panneau OSB de 18 [mm] et d'un revêtement de sol en linoleum. Le revêtement de sol influence peu la performance thermique de la paroi et le choix du linoleum est uniquement dû à sa facilité d'entretien. Il est important de préciser que ce choix induit des modifications à l'intérieur de la construction. En effet, cette surélévation du niveau fini suppose que l'ensemble des portes intérieures doivent être démontées, raccourcies en partie inférieure et remontées. Avec cette composition, le coefficient de transmission thermique U passe de 2,17 [W/m²K] à une valeur de 0,31 [W/m²K]. Notons que cette valeur ne respecte pas les recommandations du passif mais permet tout de même d'obtenir un bâtiment respectant les critères globaux.

6.2.5. Eau chaude sanitaire

Pour l'eau chaude sanitaire, la faible consommation du bâtiment permet de conserver le réseau en place actuellement. Il est toutefois nécessaire d'inspecter l'ensemble des conduites de distribution en cuivre et de les remplacer en cas de dégradations majeures.

6.2.6. Système de chauffage

L'audit réalisé sur le bâtiment a permis de mettre en évidence les mauvaises performances du système de chauffage en place actuellement. Pour rappel, l'installation est composée de différents convecteurs à gaz qui chauffent les locaux de manière localisée. De façon à optimiser le choix du système à installer, comparons différentes technologies de chauffage existantes. Celles-ci peuvent être catégorisées en fonction de la source d'énergie utilisée mais aussi en fonction du type de générateur de chaleur choisi. Il existe bon nombre de technologies de chauffage mais nous nous limitons, dans ce travail, à comparer deux systèmes différents, usuellement employés dans les bâtiments à faibles consommations énergétiques : la chaudière à condensation au gaz et la pompe à chaleur. Ceux-ci induisent également un choix sur les équipements d'émission de chaleur possibles à mettre en œuvre.

6.2.6.1. Systèmes envisagés

Le premier système de production de chaleur envisagé est constitué d'une chaudière à condensation au gaz. Cette source énergétique apparaît naturellement pour ce projet de rénovation puisque l'énergie est déjà présente sur le site actuellement. En ce qui concerne le fonctionnement, la chaudière à condensation possède un principe de base identique aux chaudières traditionnelles. La chaleur issue de la combustion du gaz permet de chauffer de l'eau qui alimente les différents émetteurs de chaleur. La différence réside dans le fait que la chaudière à condensation permet de récupérer la chaleur latente contenue dans les vapeurs de la combustion, en les condensant. Les rendements obtenus avec ce type de chaudière peuvent donc dépasser 100 [%] (De Keyser, Laureysens, Polfliet, & Possemiers, 2012, p. 63). Des conditions doivent néanmoins être réunies pour favoriser la condensation. Le choix du gaz par rapport au gasoil se justifie par rapport à la température à laquelle la condensation a lieu. Pour une chaudière gaz à condensation, la température de rosée est plus importante (55 [°C]) que celle correspondant à une chaudière au gasoil (46 [°C]). La condensation surviendra donc plus rapidement dans le cas du gaz (De Cuyper, 2006). Cette température de rosée induit de travailler avec des systèmes d'émissions à basse température. En effet, si la température de retour du circuit de chauffage est trop importante, la condensation ne se produira pas et l'énergie contenue dans les vapeurs de combustion sera perdue (comme dans une chaudière dite classique). Si la température de retour de l'eau est suffisamment faible, la condensation permettra de préchauffer l'eau qui pourra ensuite être amenée à la température de départ du circuit au niveau de l'échangeur de chaleur primaire de la chaudière. Par rapport aux émetteurs de chaleur compatibles avec ce type de chaudière, des radiateurs, voire des planchers chauffants peuvent être utilisés. Dans ce scénario de rénovation, nous pensons que les radiateurs classiques sont plus adaptés mais un dimensionnement permettra de le vérifier. La raison majeure est que le système de plancher chauffant est limité en puissance de chauffe. La valeur maximale de 100 [W/m²] de puissance est souvent retenue comme limite pour ne pas engendrer une température de surface au sol devenant inconfortable. En outre, comme précisé dans le point traitant de la rénovation de l'enveloppe (point 6.2.4), nous avons mis en évidence la problématique d'un rehaussement éventuel du niveau de sol fini. Le plancher chauffant classique induit une isolation en partie inférieure, qui permet d'éviter les déperditions vers le sol, et une chape de béton en partie supérieure. La composition totale d'un plancher chauffant aurait donc tendance à augmenter significativement le niveau fini du sol. Une raison supplémentaire, pouvant favoriser le choix des radiateurs, est simplement définie par l'occupation actuelle du bâtiment.

Il s'agit d'un bâtiment de bureau caractérisé par une certaine intermittence de l'occupation. Le plancher chauffant est un système plus inertiel qui correspond davantage à une demande de chauffage constante. La solution d'un plancher chauffant à faible inertie est quant à elle envisageable dans le seul cas où ce dernier permet de répondre à la demande de chauffage des différents locaux. Cette demande sera calculée sur base des déperditions des locaux dans le modèle DesignBuilder.

La seconde possibilité correspond à l'utilisation d'une pompe à chaleur. Celle-ci utilise un principe simple : extraire la chaleur dans l'environnement (dans l'air, le sol voire même dans les nappes phréatiques) pour la céder à un système d'émission de chaleur (De Keyser, Laureysens, Polfliet, & Possemiers, 2012, p. 66). Des échangeurs de chaleur permettent ce transfert. Il en existe de différents types en fonction de la source retenue. Sans entrer dans les détails de fonctionnement des différents modèles de pompes à chaleur, mettons en évidence certaines caractéristiques. Le coefficient de performance, qui représente le rapport entre la quantité de chaleur émise et la quantité d'énergie dont la pompe a besoin (électricité pour le compresseur), peut atteindre plus de 300 [%] (De Keyser, Laureysens, Polfliet, & Possemiers, 2012, p. 67). Ceci signifie donc que pour 1 [kWh] d'électricité consommée, la pompe à chaleur fournit 3 [kWh] d'énergie sous la forme de chaleur. Ce coefficient de performance est malheureusement variable en fonction des conditions de travail de la pompe à chaleur. Dans le cas où l'écart entre la température disponible et la température souhaitée est trop important, le compresseur devra fournir un travail plus important et la performance de la machine diminuera (plus grande consommation électrique). Le meilleur rendement est donc obtenu en minimisant la différence de température entre source (haute température) et émetteur (basse température) (De Keyser, Laureysens, Polfliet, & Possemiers, 2012, p. 68). Ceci représente un inconvénient de la pompe à chaleur qui ne peut, dès lors, travailler qu'à très basse température. Si les déperditions sont trop importantes, ce système ne peut pas convenir. De plus, si la température de la source varie, la performance de la machine varie également. La performance diminue davantage que la température extérieure diminue dans le cas des pompes à chaleur air-air. C'est aussi la raison pour laquelle les performances des pompes à chaleur de type eau-eau et sol-eau sont plus constantes. Elles sont aussi plus onéreuses de par les coûts des installations qu'elles engendrent. Un échangeur horizontal fonctionnant dans le sol nécessite une grande surface extérieure pour son installation (ou un forage profond dans le cas d'un échangeur vertical). Les coûts et la réglementation pour utiliser une nappe phréatique dans le cas d'une pompe à chaleur eau-eau limitent également son utilisation. La pompe à chaleur air-air est, quant à elle, très

souvent couplée aux conduites de ventilation de manière à introduire de l'air chaud dans les locaux. Dans le cas qui nous préoccupe ici, l'utilisation de ce genre de pompe à chaleur est limitée. La ventilation mécanique choisie étant décentralisée, il n'est pas possible d'intégrer une pompe air-air. Pour les autres types de pompes à chaleur, l'investissement²⁵ important qu'elles représentent ne justifie pas forcément ce choix par rapport à d'autres systèmes. La surface aux alentours de la construction et la disponibilité d'une source d'eau limitent l'utilisation des pompes eau-eau et sol-eau. La pompe à chaleur air-eau peut quant à elle être envisagée dans la Maison Strebelle. Il est également important de préciser que les pompes à chaleur utilisent de l'électricité (pour le compresseur) qui reste la source énergétique impactant le plus la consommation en énergie primaire du bâtiment. Un couplage avec des panneaux photovoltaïques pourrait rendre l'investissement plus intéressant. Dans le cas présent, l'adjonction de ce type de source renouvelable semble difficile à imaginer, au vu de la végétation abondante avoisinante.

Il est intéressant d'ajouter que l'Université de Liège dispose d'une centrale de cogénération biomasse. Celle-ci alimente actuellement 60 bâtiments du campus et permet de couvrir 70 [%] des besoins en chaleur du site du Sart Tilman (ULg Presse-Communication, 2011). Comme précisé dans le premier chapitre de ce travail, l'Université de Liège, et plus particulièrement l'Administration des Ressources Immobilières, organise un vaste programme de rénovation du campus. Ce programme de rénovation va permettre de réduire l'ensemble des demandes de chauffage des bâtiments les plus énergivores. Il est donc envisageable que ce réseau de chaleur puisse également être utilisé pour la production de chaleur de la Maison Strebelle. Dans ce cas, un simple échangeur de chaleur permettrait de transférer l'énergie du réseau de chaleur à une boucle sanitaire dans la maison, pour assurer la fonction de chauffage. Cette perspective est difficilement quantifiable et modélisable dans le cadre de ce travail mais il serait intéressant de la développer.

6.2.6.2. Calcul des déperditions

Nous l'avons vu précédemment, l'élément majeur permettant de choisir un type d'émetteur de chaleur est directement tributaire des déperditions des différents locaux. Il est donc nécessaire de connaître celles-ci, à la fois pour choisir les émetteurs et pour dimensionner l'organe de production de chaleur. Le logiciel DesignBuilder inclut une option permettant de

²⁵ Il faut compter (source : Chauffage-info) :

- PAC air-air et air-eau : 4000-7000 € ; PAC sol-eau : > 10000 € ; PAC eau-eau : 15000 €

calculer directement ces déperditions. Il fournit la puissance de chauffe à installer dans chacune des zones thermiques et la puissance totale nécessaire du générateur de chaleur.

Pour pouvoir obtenir ces résultats, l'ensemble des postes de rénovation de ce scénario présentés ci-dessus doivent être encodés dans le logiciel DesignBuilder. Notons que ce calcul est réalisé selon une température extérieure de -10 [°C] en période hivernale. En outre, DesignBuilder tient compte d'un facteur de dimensionnement de 1,25. Ceci signifie qu'il considère un surdimensionnement sécuritaire de 25 [%]. Rappelons également que les zones chauffées dans ce scénario de rénovation correspondent aux espaces chauffés de la situation actuelle (soit 4 zones thermiques du modèle DesignBuilder).

Le logiciel fournit les résultats de puissance à installer repris dans le Tableau 11 ci-dessous. Les zones thermiques correspondent à la numérotation représentée sur la Figure 60 (page 75) du modèle DesignBuilder.

Tableau 11 - Calcul des puissances de chauffe nécessaire

Zone thermique	Pertes thermiques en régime permanent [W]	Puissance de dimensionnement [W]	Puissance de dimensionnement [W/m ²]
Zone 1	4980	6220	49,49
Zone 2	1300	1620	96,58
Zone 3	960	1210	141,62
Zone 6	920	1150	63,66

La puissance de dimensionnement du chauffage totale est quant à elle de **10,2 [kW]**. Le choix du système de production de chaleur doit donc fournir, au minimum, cette puissance



Figure 865 - Chaudière gaz à condensation (Viessmann Vitodens 300-W)



Figure 86 - Pompe à chaleur air-eau (Vaillant VWL 115/2)

calculée. Les Figures 85 et 86 représentent des équipements qui fournissent cette puissance de chauffage. La chaudière gaz à condensation de la Figure 85 développe une puissance thermique nominale de 1,9 à 11 [kW] pour une plage de température optimale d'entrée et de sortie de

50/30 [°C]. La pompe à chaleur illustrée sur la Figure 86 développe quant à elle une puissance de chauffage de 10,5 [kW] avec un coefficient de performance de 4,2 dans des conditions optimales.

En retraduisant les puissances de dimensionnement selon les bureaux à chauffer, nous obtenons les résultats du Tableau 12. Ces puissances pour les différents bureaux permettent de vérifier la faisabilité des installations d'émission de chaleur envisagées. Vérifions successivement le dimensionnement des radiateurs ainsi que le dimensionnement d'un système à planchers chauffants. La méthode de dimensionnement est issue du cours de Physique du bâtiment dispensé par le professeur Philippe André à l'Université de Liège.

Tableau 12 - Puissance de chauffe nécessaire par bureau

Zone thermique	Puissance de dimensionnement [W]
Bureau 1	960
Bureau 2	1300
Bureau 3	1188
Bureau 4	920
Bureau 5	1337

Dimensionnement de la solution « radiateurs »

Les puissances de dimensionnement fournies dans le Tableau 12 correspondent aux puissances des radiateurs à installer au sein des différents bureaux. Les constructeurs fournissent quant à eux les puissances des émetteurs en fonction d'un régime de température de fonctionnement généralement égal à 75/65 [°C]. Dans le cas qui nous préoccupe, les sources de chaleur travaillent à basse voire très basse température (50/30 [°C]). Ces températures plus faibles induisent un surdimensionnement des émetteurs. La formule permettant de calculer la puissance nécessaire en fonction de la puissance du régime nominal utilisé par les constructeurs est donné par :

$$\dot{Q} = \dot{Q}_N \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_N}\right)^n, \text{ où}$$

- $\dot{Q}$ = Puissance de l'émetteur (régime autre que nominal) [W] ;
- $\dot{Q}_N$ = Puissance de l'émetteur en régime nominal (75/65 [°C]) [W] ;
- $\Delta T = \frac{(T_{\text{entrée}} + T_{\text{sortie}})}{2} - T_{\text{air}} \text{ [°C]} ;$

- $\Delta T_N = \frac{(T_{entrée} + T_{sortie})}{2} - T_{air} = \frac{(75 + 65)}{2} - 20 = 50 \text{ [}^\circ\text{C]} ;$
- $n =$ coefficient issu de la loi d'émission ($\cong 1,3$).

Cette formule utilise une température intérieure de 20 [°C] que nous considérons également pour ce dimensionnement. Les puissances à installer, calculées suivant la formule précédente, sont représentées dans le Tableau 13.

Tableau 13 - Dimensionnement des radiateurs (calcul des puissances nécessaires)

Zone thermique	Puissance de dimensionnement [W]	ΔT [°C]	ΔT_N [°C]	$\dot{Q}$ [W]
Bureau 1	960	$\frac{(50 + 30)}{2} - 20 = 20$	50	3160
Bureau 2	1300	20	50	4279
Bureau 3	1188	20	50	3909
Bureau 4	920	20	50	3028
Bureau 5	1337	20	50	4398

Ces valeurs nous permettent donc de choisir les dimensions nécessaires des radiateurs pour atteindre ces niveaux de puissance. Notons également l'impact de l'utilisation d'un système à basse température sur la puissance de chauffage à installer. Les radiateurs choisis sont les moins imposants possibles pour ne pas encombrer la surface au sol intérieure. La Figure 87 représente l'implantation des radiateurs en fonction des puissances calculées.

Des radiateurs à panneaux Radson Compact²⁶ ont été choisis ; d'autres radiateurs peuvent être choisis à condition de respecter les puissances minimum. Notons également que la chaudière à condensation peut travailler à un régime de température légèrement plus important (maximum 70/50 pour que la condensation ait lieu) et qu'il est dès lors tout à fait envisageable de réduire les dimensions des émetteurs en recalculant les puissances adéquates. La pompe à chaleur ne permet pas ce changement et doit obligatoirement travailler à basse température.

La régulation des radiateurs peut être simplement réalisée avec l'aide de vannes thermostatiques.

²⁶ La fiche technique utilisée est disponible en ligne sur : <http://www.radson.com/docs/FICHE-TECHNIQUE-COMPACT-BF.pdf>

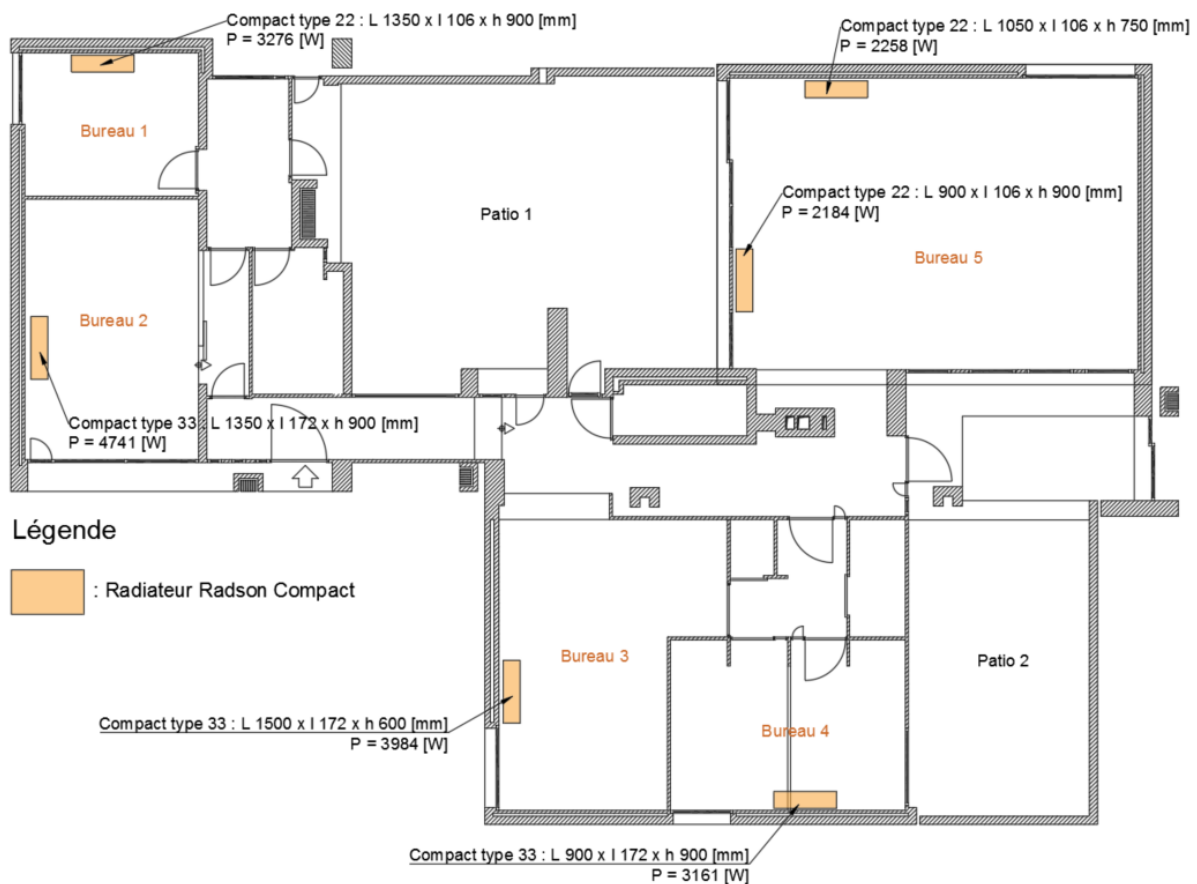


Figure 87 - Positionnement des radiateurs issus du dimensionnement

Dimensionnement de la solution « planchers chauffants »

La méthode de dimensionnement des planchers chauffants est basée sur la loi d'émission d'un système radiant suivante :

$$\dot{Q} = A \cdot h_g \cdot (\Delta T) , \text{ où}$$

- $\dot{Q}$ = Puissance du plancher chauffant [W] ;
- A = Surface de plancher [m²] ;
- h_g = Coefficient d'échange global [W/m²K] ;
- $\Delta T = T_{surface} - T_{air}$ [K].

Dans cette équation, la puissance du plancher chauffant correspond à la puissance de dimensionnement calculée précédemment. Le coefficient d'échange exprime l'efficacité du transfert de chaleur de la surface. Il globalise les composantes convectives et radiatives. Ce coefficient augmente quand le différentiel de température entre la surface et l'air intérieur augmente. Généralement, ce coefficient peut être pris égal à 11,6 [W/m²K]. ΔT correspond à la différence de température entre la surface du plancher et celle de l'air. Pour des questions de

confort thermique, la température de surface du sol ne peut excéder 27 [°C]. La température de l'air est quant à elle fixée à 20 [°C]. Cette équation traduit donc la limite de puissance de cette typologie d'installation. La surface nécessaire peut être calculée en inversant l'équation et il faut vérifier que cette superficie est disponible dans les locaux du bâtiment. Plaçons-nous dans ce cas optimal pour calculer les surfaces chauffantes nécessaires pour la Maison Strebelle.

Le Tableau 14 ci-dessous représente les résultats obtenus. L'objectif est donc de vérifier que la surface de plancher chauffant nécessaire pour atteindre la puissance de dimensionnement est inférieure à la surface disponible dans les locaux. Notons que les surfaces des locaux sont réduites de manière à prendre en compte des différents obstacles en présence. Une valeur de 80 [%] de la surface disponible a été retenue.

Tableau 14 - Dimensionnement des planchers chauffants

Zone thermique	Puissance de dimensionnement [W]	h_g [W/m²K]	ΔT [°C]	A calculé [m²]	A disponible [m²]	A disponible réduite [m²]
Bureau 1	960	11,6	7	11,82	10,44	8,35
Bureau 2	1300	11,6	7	16	19,44	15,55
Bureau 3	1188	11,6	7	14,62	24	19,2
Bureau 4	920	11,6	7	11,33	14,4	11,52
Bureau 5	1337	11,6	7	16,45	27	21,6

Nous voyons donc que l'ensemble des surfaces chauffantes nécessaires sont inférieures aux surfaces disponibles réduites, sauf pour les bureaux 1 et 2. Il est néanmoins possible pour le bureau 2 d'envisager l'émission par plancher chauffant si on réduit le facteur d'encombrement au sol. Il n'est par contre pas possible de l'envisager dans le bureau 1 où la surface nécessaire est directement inférieure à la surface disponible (sans application de coefficient réducteur). Ceci induit que le plancher chauffant peut être envisagé pour les bureaux 2 à 5 (pour autant qu'il s'agisse d'un plancher à faible épaisseur de manière à limiter l'inertie de la structure ainsi que son épaisseur) tandis qu'un radiateur doit être placé dans le bureau 1 pour satisfaire les besoins de chauffage.

Finalement, les deux technologies peuvent fonctionner dans le cas de la Maison Strebelle. Le dernier critère qui n'a pas encore été abordé est celui du coût de l'installation. De manière simplifiée, le Tableau 15 suivant correspond au prix des installations des émetteurs et des sources de chaleur. Les prix utilisés sont issus soit des fabricants eux-mêmes, soit du bordereau des prix unitaires édité par l'ABEX (Association Belge des Experts).

Tableau 15 - Comparaison des estimations de prix pour les systèmes de chauffage étudiés

	Production par chaudière à gaz	Production par pompe à chaleur
Emission par radiateur	5696,4 € HTVA	6759,4 € HTVA
Emission par plancher chauffant	7900,3 € HTVA	8963,3 € HTVA

La solution la plus avantageuse d'un point de vue de l'investissement initial correspond à la chaudière gaz à condensation couplée aux radiateurs. De façon générale, la pompe à chaleur est plus onéreuse à l'investissement mais une étude sur le temps de retour permettrait de connaître le réel avantage de ce type de système. La littérature sur le sujet énonce un temps de retour sur investissement d'environ 20 ans pour un bâtiment classique, selon une comparaison des deux installations précitées (Acket & Vaillant, 2011, p. 180). Ce temps de retour important est principalement dû à la différence de prix entre les deux combustibles, ce qui peut dissuader d'investir dans une pompe à chaleur. En outre, l'énergie électrique possède un coefficient de conversion en énergie primaire de 2,5 alors que pour le gaz, ce coefficient vaut 1. Le gaz est donc une source énergétique qui permet de réduire ces consommations en énergie primaire comparativement à l'énergie électrique. Certains professionnels du secteurs précisent que la chaudière gaz à condensation constitue la meilleure option pour atteindre des performances passives (Kaiser, 2016, p. 60).

6.2.7. Vérifications des critères du « passif » dans DesignBuilder

La création de ce premier scénario de rénovation permet d'encoder tous les paramètres décrits précédemment afin de vérifier que cette proposition répond aux 5 exigences des bâtiments passifs.

Les besoins en énergie de chauffage constituent le premier critère. Ceux-ci ne peuvent excéder 15 [kWh/m²an]. Une simulation annuelle dans Designbuilder permet d'obtenir la valeur de 5,2 [kWh/m²an], ce qui valide le premier critère. Les besoins en énergie de refroidissement sont quant à eux nuls puisqu'aucun système de refroidissement n'a été mis en œuvre dans ce scénario de rénovation. En effet, les résultats des paramètres de confort de Fanger montrent que l'indice PMV est proche de 0 durant l'ensemble de la période estivale. De plus, il ne devient positif que très ponctuellement durant l'année, ce qui traduit une configuration intérieure plutôt fraîche.

Le troisième critère traite de l'étanchéité à l'air qui ne peut excéder 0,6 [vol/h] sous 50 [Pa]. Notons que ce critère a été encodé comme acquis dans DesignBuilder et qu'il doit être

vérifié par un « Blower Door Test » après rénovation du bâtiment.

Le quatrième critère consiste à vérifier les besoins en énergie primaire du bâtiment. Pour rappel, la formule suivante doit être vérifiée :

$$\text{Besoin en EP} \leq 90 - 2,5 \cdot \text{Compacité} = 90 - 2,5 \cdot \frac{V}{A} = 90 - 2,5 \cdot \frac{380}{190}, \text{ soit}$$

$$\text{Besoin en EP} \leq 77,1 \text{ [kWh/m}^2\text{an]}$$

DesignBuilder fournit les consommations énergétiques annuelles suivantes :

- Gaz : 9,4 [kWh/m²an] ;
- Electricité : 16,81 [kWh/m²an]²⁷.

Ces valeurs correspondent aux consommations pour le bâtiment et doivent être converties en énergie primaire. En multipliant ces valeurs par les coefficients de conversion en énergie primaire (2,5 pour l'électricité et 1 pour le gaz) et en sommant le résultat, nous obtenons une consommation en énergie primaire totale de 51,42 [kWh/m²an]. Ce critère est donc bien respecté dans la configuration simulée.

Le confort intérieur estival doit être également vérifié par simulation thermique dynamique. Ce dernier se traduit concrètement en vérifiant que la température de 25 [°C] n'est pas dépassée pendant plus de 5 [%] du temps d'occupation du bâtiment. Dans le cas qui nous occupe, nous obtenons une valeur d'environ 10 [%]. Néanmoins, les observations faites sur le PMV précédemment ainsi que l'incertitude relative au fichier météorologique utilisé (par rapport à la prise en compte des conditions hygrothermiques locales) nous conduisent à ne pas prendre ce résultat comme pertinent.

Terminons par préciser que les différentes recommandations à suivre pour atteindre des performances passives ont déjà été traitées au fur et à mesure de la description des postes de rénovation. Les valeurs des coefficients de transmission thermique ont été diminuées au maximum pour les différentes parois du bâtiment. Un système de ventilation comprenant un échangeur de chaleur permettant le transfert de 75 [%] de la chaleur a été implanté. La dernière recommandation concerne le traitement particulier des différents nœuds constructifs. Ceux-ci sont décrits dans le point suivant.

²⁷ Rappelons que la consommation électrique des équipements est déduite de la consommation finale pour le calcul de la consommation en énergie primaire.

6.2.8. Gestion des nœuds constructifs

Les critères qui définissent un bâtiment passif mentionnent également une réflexion sur les différents nœuds constructifs du bâtiment. Sans définir l'ensemble des nœuds problématiques de la construction, détaillons deux exemples qui respectent les compositions de parois décrites précédemment. La Figure 88 ci-contre localise les deux détails constructifs choisis. Un détail en coupe verticale (nœud 1) ainsi qu'un détail en coupe horizontale (nœud 2) ont été sélectionnés.

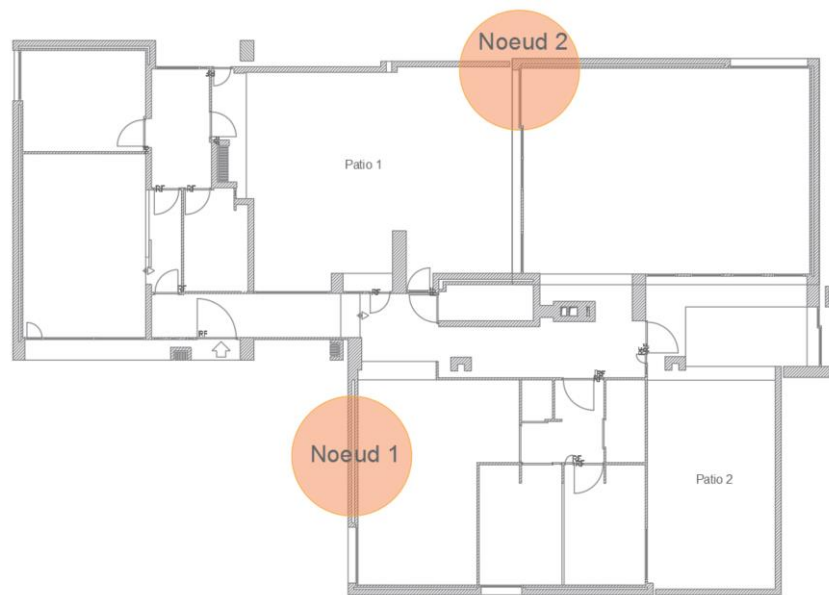


Figure 88 - Localisation des nœuds constructifs sélectionnés

Les Figure 89 et 90 des pages suivantes représentent les configurations envisagées pour les deux nœuds constructifs sélectionnés. Notons que dans ce scénario, c'est la représentation du panneautage en béton matricé qui apparaît mais que les détails sont adaptables à d'autres choix de revêtements de surface. La faisabilité des autres nœuds constructifs a été vérifiée avec cette composition de paroi mais ceux-ci n'apparaissent pas dans ce travail.

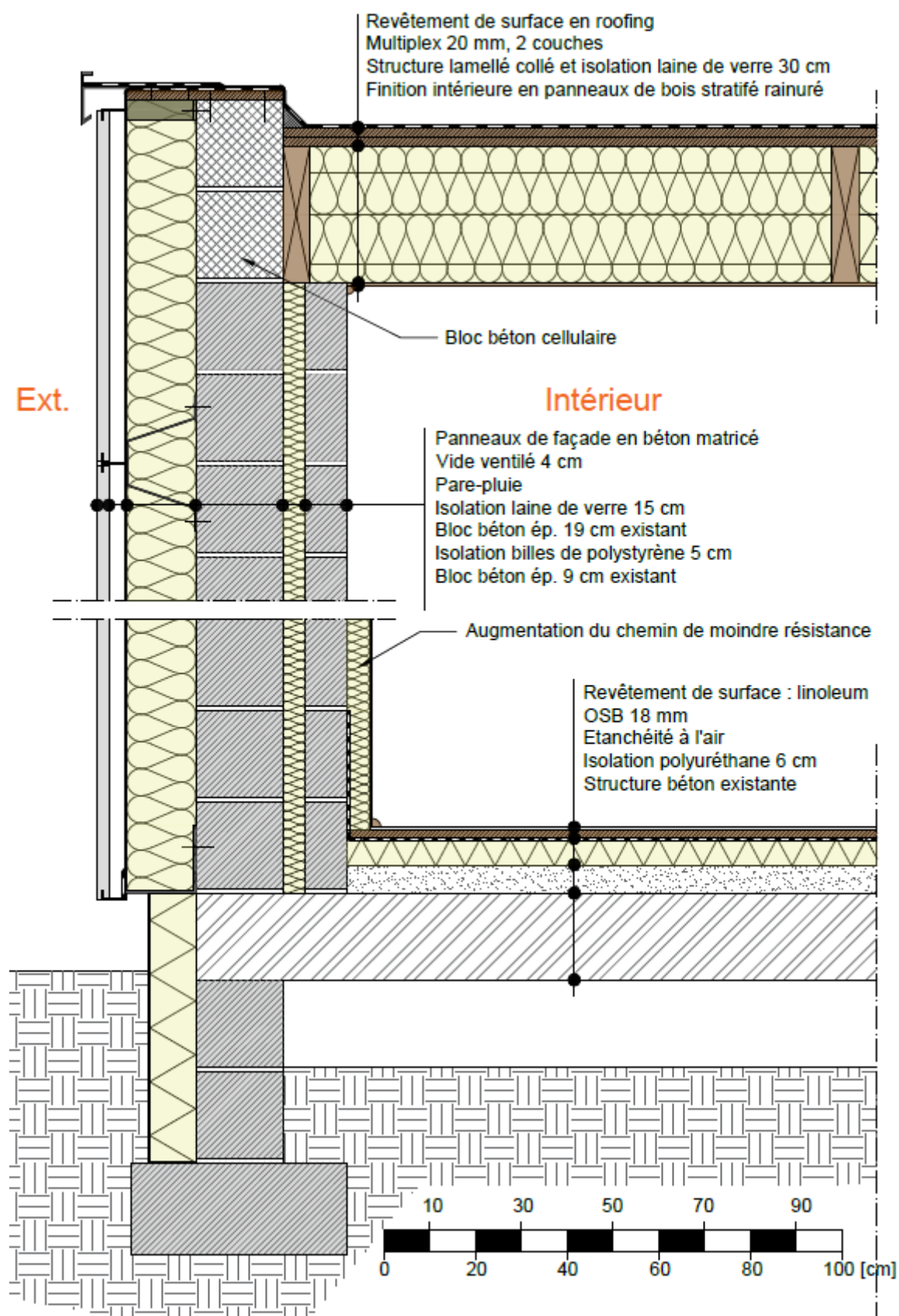


Figure 89 - Coupe verticale : jonction plancher/façade et façade/toiture (scénario 1)

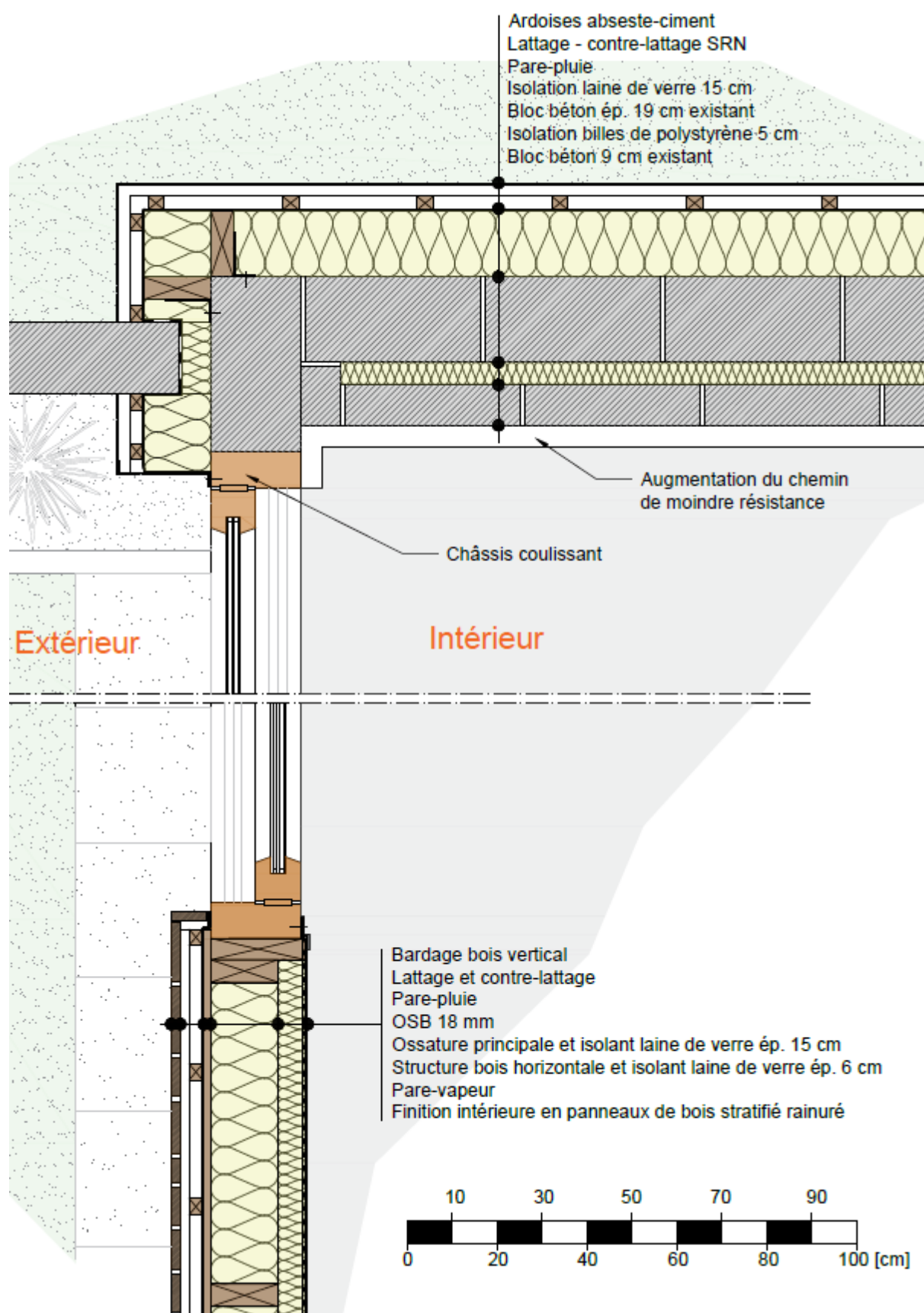


Figure 90 - Coupe horizontale : jonction châssis et angle (scénario 1)

Notons que le pont thermique existant entre le vide ventilé sous la dalle de sol et la façade est traité en augmentant le chemin de moindre résistance thermique du côté intérieur. Ceci suppose le placement d'une isolation intérieure (surmontée d'une tablette) de 1 [m] de hauteur en pieds de murs. De la même façon, l'isolation extérieure est poursuivie en pieds de murs extérieurs pour annihiler le pont thermique avec l'intérieur. Ceci induit un terrassement relativement important en pourtour de construction. Cette fouille permettrait aussi une mise à niveau de l'étanchéité des murs porteurs inférieurs, voir la mise en place d'un drain.

6.3. Scénario 2 : Isolation des murs par l'intérieur

Décrivons désormais un scénario de rénovation alternatif. Celui-ci est basé sur une isolation de l'enveloppe par l'intérieur du bâtiment. Nous ne décrivons ainsi que les éléments qui varient par rapport à la configuration du scénario d'isolation par l'extérieur. Les charges internes décrites dans le point précédent tout comme le dimensionnement de l'éclairage, la ventilation ou encore le dispositif de production d'eau chaude sanitaire restent inchangés par rapport au premier scénario.

Le changement majeur provient de la composition des parois en contact avec l'extérieur. Détaillons successivement les changements opérés sur celles-ci.

6.3.1. Enveloppe

Pour l'ensemble des planchers intérieurs, la composition détaillée précédemment peut être utilisée dans ce cas de rénovation. Effectivement, le choix de poser une isolation par l'intérieur avait déjà été pensé en raison de la hauteur insuffisante de vide ventilé. Une couche de 60 [mm] de polyuréthane en panneau, surmontée d'un OSB de 18 [mm] et d'une finition en linoleum constituent la structure du plancher rénové.

Les châssis et vitrages sont remplacés de la même manière que pour le premier scénario de rénovation. Au même titre, les murs des façades en ossature légère sont remplacés selon les mêmes caractéristiques. Enfin, la rénovation des toitures en structure bois suit la même logique.

Les différences proviennent majoritairement des murs extérieurs et des toitures aux structures de béton. Les murs extérieurs sont isolés par l'intérieur grâce à une épaisseur de 15 [cm] de laine de verre. Cette laine de verre est intégrée à une structure rapportée en bois de section 150x50 [mm]. Un pare-vapeur et un panneau de finition terminent l'ensemble. Notons

que la coulisse du mur originel est également isolée par insufflation de billes de polystyrène. Deux revêtements de surfaces différents apparaissent de manière à respecter la logique de composition intérieure du bâtiment. Actuellement, une finition en panneau stratifié décoratif en bois et une finition en blocs de béton peints en blanc coexistent. En fonction de cette configuration initiale, la couche de finition choisie peut être soit un panneau stratifié bois semblable à l'original, soit une finition en plaque de plâtre.

Abordons désormais l'isolation thermique des différentes toitures. Les toitures en structure bois sont isolées de la même manière que pour le premier scénario. Le remplacement de l'étanchéité bitumineuse (en mauvais état) induit la dépose de la face supérieure des toits et donc une possibilité de combler l'intérieur de la structure par 30 [cm] d'isolation thermique (laine de verre). Pour les toitures en structure béton du premier scénario, une isolation par l'extérieur permettait de gérer la continuité de la jonction avec l'isolation des murs extérieurs. Dans le cas d'une isolation par l'intérieur, deux configurations apparaissent comme réalisables. La Figure 91 ci-dessous représente très schématiquement ces deux configurations.

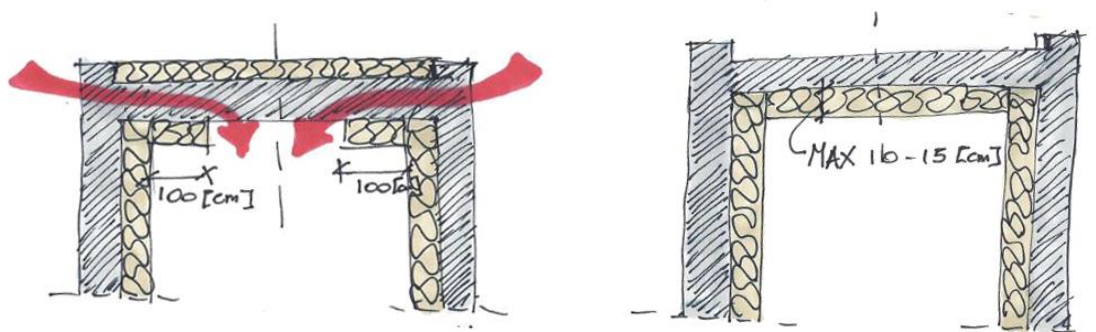


Figure 91 - Configurations d'isolation de la toiture par l'intérieur

Pour assurer la continuité de l'isolation au niveau des toitures, la première configuration consiste à conserver une isolation de 24 [cm] de polyuréthane placée en partie supérieure de la structure. Le nœud constructif peut alors être géré en augmentant le chemin de moindre résistance sur la face inférieure de la structure (sur au moins 1 [m]). Cette solution tend à annihiler l'effet du pont thermique dans le cas où un recouvrement suffisant est prévu à l'intérieur des locaux. La seconde possibilité consiste à isoler ces toitures depuis l'intérieur du bâtiment. Le problème qui apparaît est donc la réduction de la hauteur sous plafond disponible à l'intérieur de la construction. Les 24 [cm] qui pouvaient être posés dans le cas de l'isolation par l'extérieur semblent difficiles à installer dans cette configuration. Afin de garantir une hauteur sous plafond d'au minimum 210 [cm], l'isolation ne peut excéder 12 [cm] de polyuréthane. Cette solution, bien qu'engendrant un problème au niveau des conditions intérieures des locaux, permet de garantir la continuité de l'isolation thermique. De manière à

garantir une valeur U inférieure à $0,15 \text{ [W/m}^2\text{K]}$, la solution modélisée combine les deux propositions. Ainsi, 12 [cm] de polyuréthane sont placés en partie supérieure et inférieure de la structure.

6.3.2. Vérifications des critères du « passif » dans DesignBuilder

Tout comme le premier scénario, les différents critères qui définissent un bâtiment passif sont vérifiés dans cette configuration, excepté le critère de surchauffe. En raison de ce que nous avons vu précédemment, nous ne tenons pas compte de la pertinence de ce dernier. Afin de ne pas surcharger le travail d'une analyse très proche du scénario précédent, apportons simplement quelques précisions sur les différences remarquables.

La première différence émergente de la simulation DesignBuilder réside dans le calcul de la puissance de chauffe nécessaire pour le bâtiment. Dans cette configuration, elle descend à une valeur de **9,9 [kW]** contre **10,2 [kW]** précédemment. Cette légère différence peut être expliquée par la réduction du volume chauffé et de la surface au sol dans le deuxième scénario (l'isolation par l'intérieur étant davantage consommatrice d'espace au sol). Une quinzaine de mètres carrés sont ainsi perdus dans ce scénario. Le dimensionnement des émetteurs de chaleur réalisé dans le cas précédent est néanmoins applicable pour ce scénario moyennant quelques adaptations.

Pour les mêmes raisons, la consommation en énergie primaire est également plus faible. Elle est de **48 [kWh/m²an]** contre **51,42 [kWh/m²an]** précédemment. La demande en chauffage est aussi inférieure à la configuration du premier scénario de rénovation.

6.3.3. Gestion des nœuds constructifs

Au même titre que pour le premier scénario, décrivons succinctement la manière dont les nœuds constructifs sont gérés dans cette configuration. L'isolation des murs d'un bâtiment par l'intérieur induit naturellement certains nœuds particuliers. Les intersections des cloisons avec les murs extérieurs créent des ponts thermiques qu'il s'agit de traiter. Parmi les possibilités envisageables pour résoudre cette typologie de nœuds, nous pensons que la solution la plus adéquate consiste à prolonger le chemin de moindre résistance thermique à chacune des intersections. Il s'agit effectivement d'une méthode non destructrice qui permet d'annihiler l'effet de pont thermique. La Figure 92 ci-dessous illustre, en plan, les nœuds où ce prolongement doit être effectué dans le cas de la Maison Strebelle. Ces derniers sont tous,

moyennant adaptation de certaines portes intérieures, réalisables pratiquement.

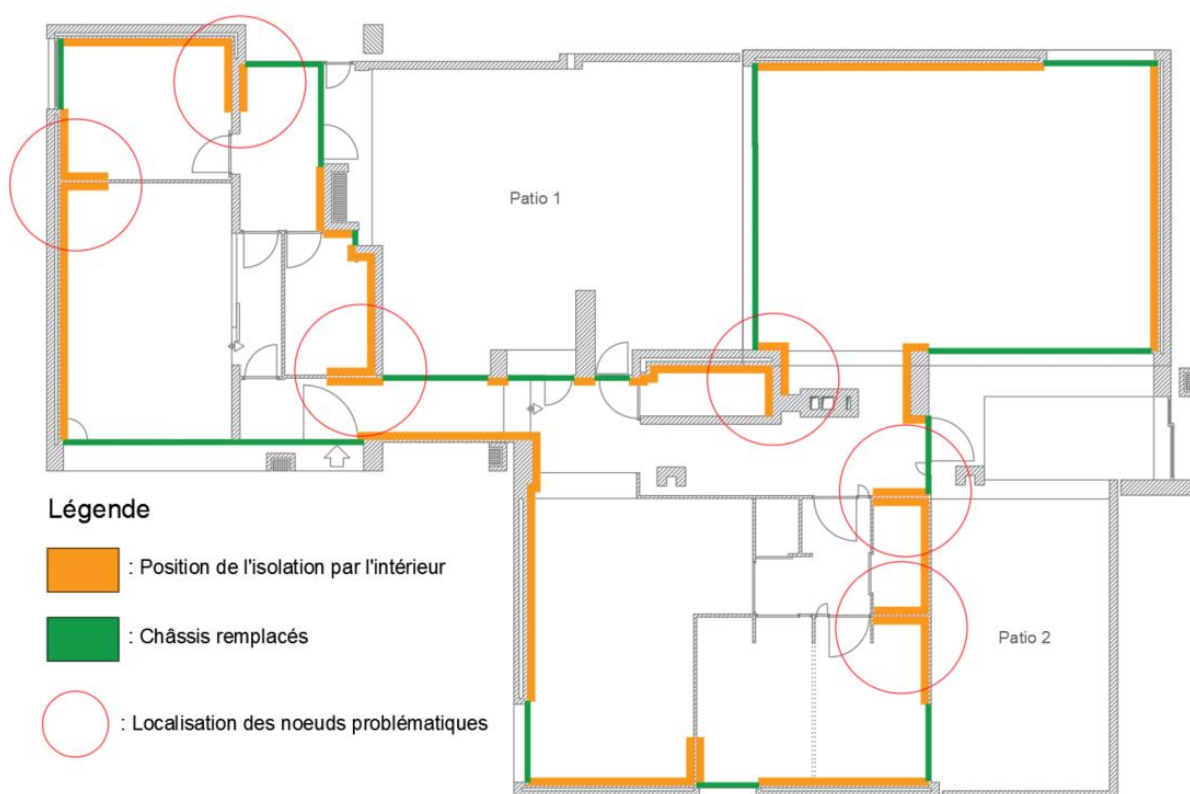


Figure 92 - Positionnement des nœuds problématiques (isolation par l'intérieur)

De la même manière que pour le premier scénario de rénovation, présentons deux détails techniques sélectionnés pour représenter certaines jonctions intéressantes. Ceux-ci représentent les mêmes nœuds de manière à visualiser les différences entre configurations. Le premier détail représente la jonction entre plancher et façade ainsi que celle reliant la façade à la toiture. Il est représenté sur la Figure 93 ci-après. Comparativement à la configuration du scénario précédent, nous voyons donc que le terrassement n'est pas indispensable. Il est toutefois intéressant afin de vérifier l'état des murs porteur et le cas échéant, de leur apporter une étanchéification parfaite. Nous voyons aussi que la remontée d'isolation intérieure nécessaire pour limiter le pont thermique dans la première configuration n'est plus nécessaire ici. Néanmoins, la surface au sol intérieure est réduite par l'adjonction d'isolant sur chacune des parois des locaux. De plus, même si la surface extérieure n'est pas recouverte d'un parement, un nettoyage de l'écaillage de peinture en façade et un traitement hydrofuge adéquat sont recommandés pour limiter les venues d'eau.

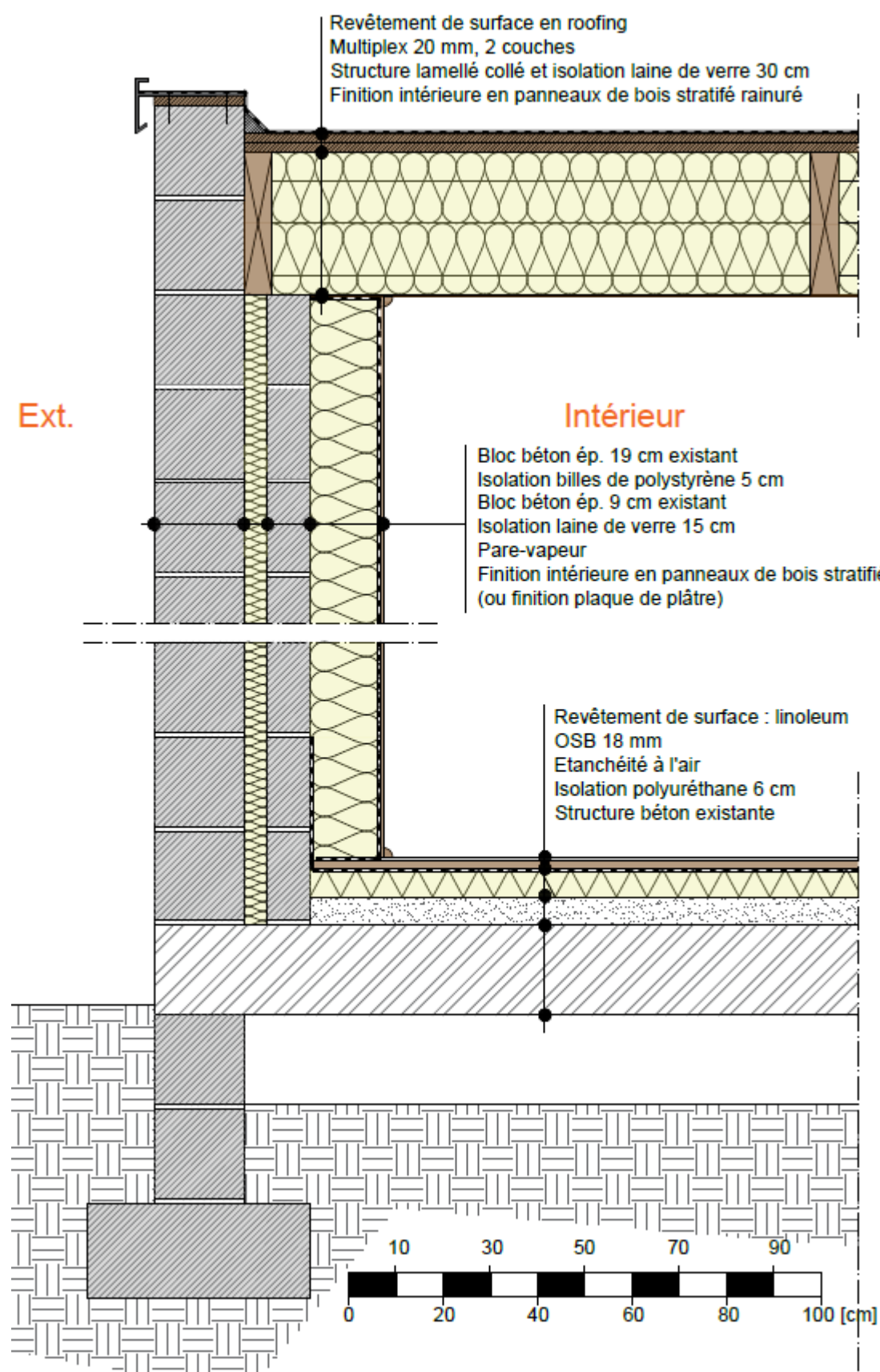


Figure 93 - Coupe verticale : jonction plancher/façade et façade/toiture (scénario 2)

Le second nœud de la Figure 94 représente quant à lui le raccord entre le châssis et la nouvelle isolation intérieure.

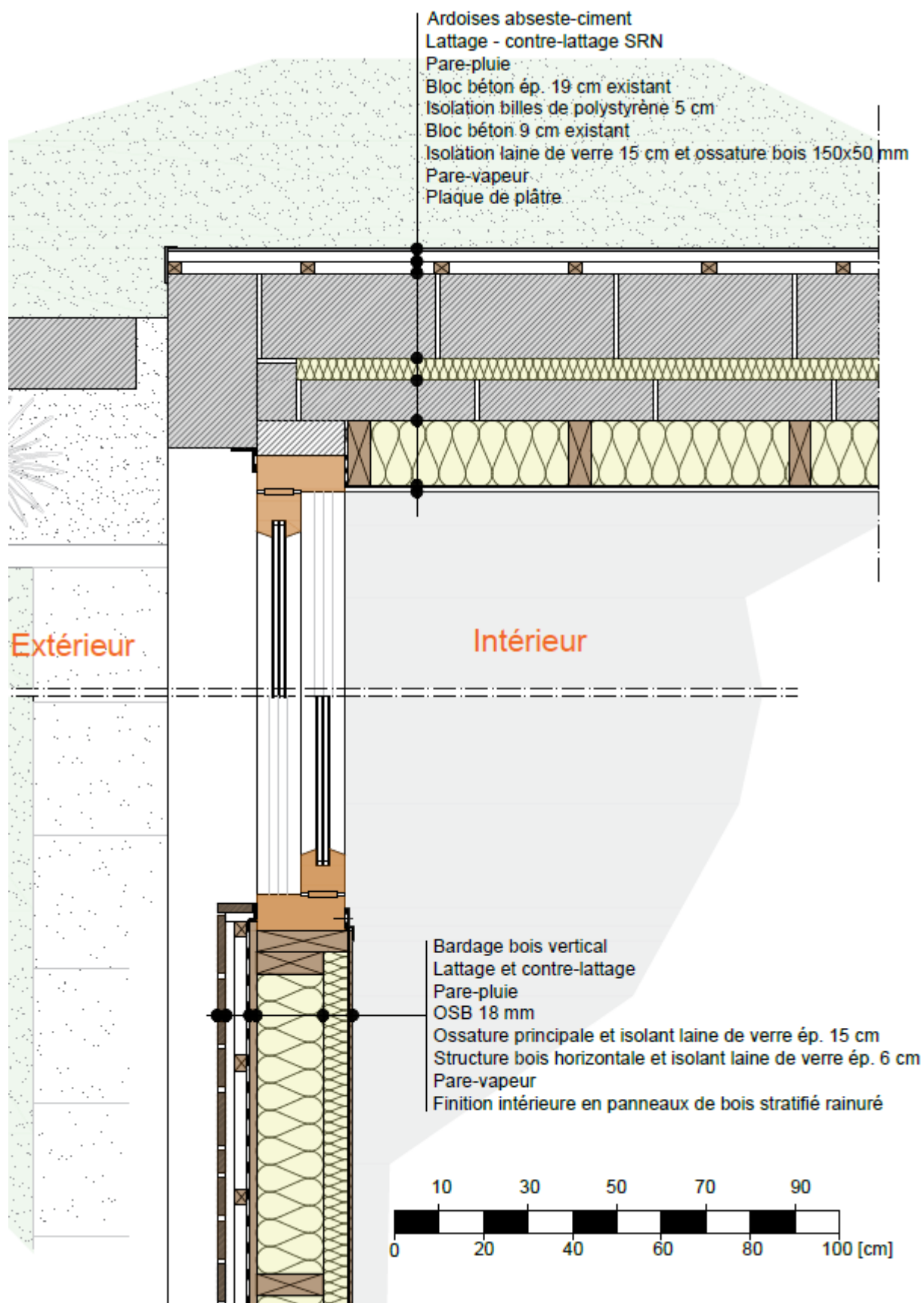


Figure 94 - Coupe horizontale : jonction châssis et angle (scénario 2)

6.4. Comparaison des deux scénarios avec la situation initiale

Attardons-nous, pour cette dernière partie du travail, à comparer les scénarios de rénovation créés avec la situation initiale du bâtiment. Le modèle DesignBuilder a permis de simuler des résultats pour chacun des cas et servira de base comme premier élément de comparaison. Enfin, une évaluation approximative des coûts de rénovation sera abordée et clôturera la comparaison.

6.4.1. Résultats DesignBuilder

Le premier élément important réside dans l'évaluation du confort des occupants. Le premier graphique, représenté sur la Figure 95, compare l'évolution mensuelle de l'indice PMV de la théorie de Fanger. Les courbes qui correspondent aux deux scénarios de rénovation sont très proches l'une de l'autre mais sont très au-dessus de la courbe représentant la situation initiale. Le confort est donc nettement amélioré dans tous les cas même si la tendance reste négative (traduisant un inconfort par le froid en hiver). Les valeurs sont tout à fait acceptables.

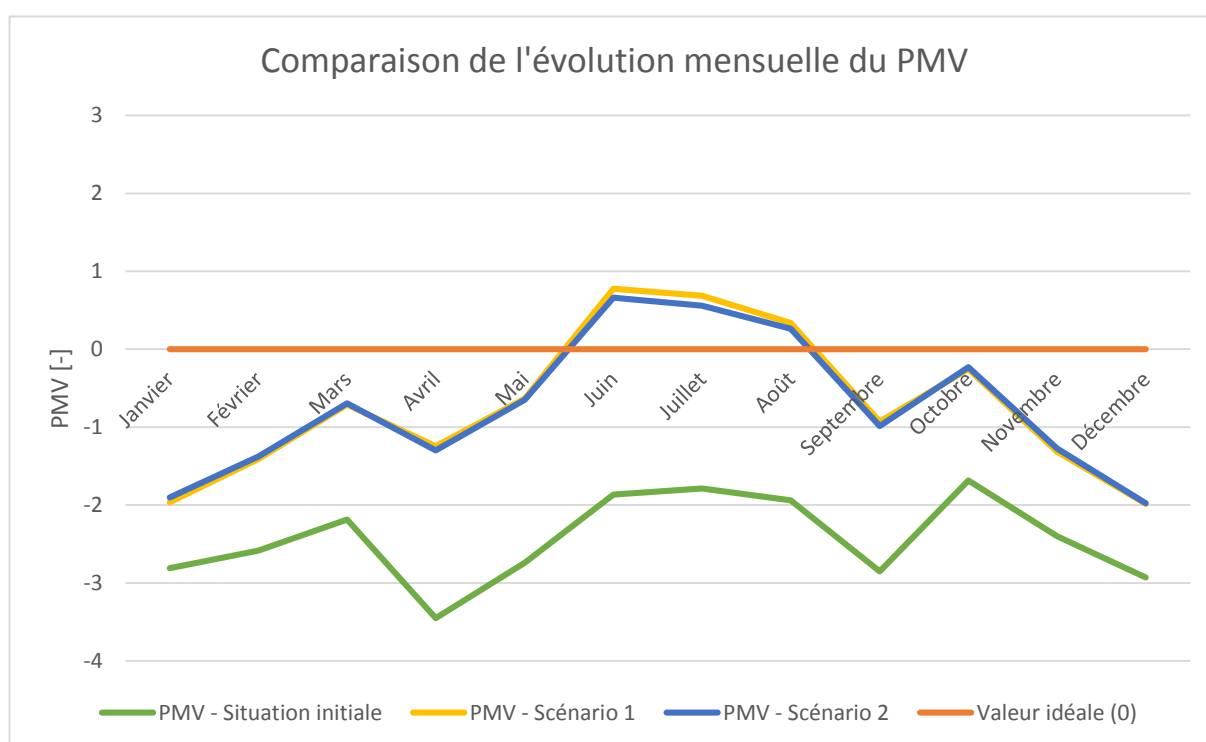


Figure 95 - Comparaison de l'évolution mensuelle du PMV pour les différents scénarios

Un second élément intéressant est la comparaison des déperditions par l'enveloppe pour les différents scénarios. La Figure 96 ci-dessous représente ces déperditions pour les parois constitutives.

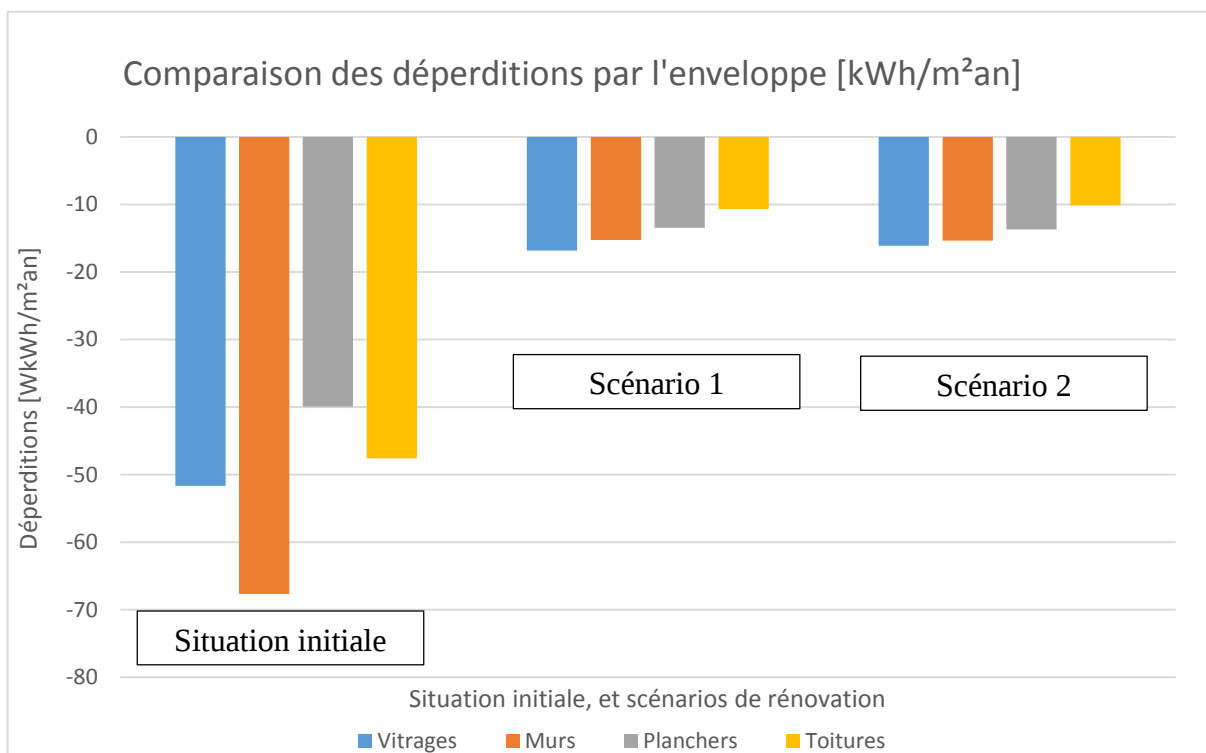


Figure 96 - Comparaison des déperditions des parois constitutives de l'enveloppe

Logiquement, les deux scénarios de rénovation donnent des résultats de déperditions identiques. Ceci est dû au fait que les parois possèdent approximativement les mêmes propriétés thermiques. On voit également que les performances des parois ont pu être largement améliorées par rapport à la situation initiale. Ainsi, on assiste à une amélioration de près de 69 [%] pour les vitrages, 77 [%] pour les murs, 67 [%] pour les planchers et 78 [%] pour les toitures. Ces résultats montrent aussi que l'ordre hiérarchique de performance est modifié entre la situation initiale et les scénarios de rénovation. Les vitrages deviennent les parois les plus déperditives dans le cas des rénovations alors que les murs étaient davantage problématiques dans la configuration de départ.

Comparons, pour terminer, le résultat de l'évolution des consommations énergétiques. Les consommations électriques sont très semblables avant et après rénovation car l'ensemble des équipements du bâtiment est conservé dans les propositions de scénario. Les consommations pour le chauffage (gaz) sont quant à elles bien différentes. La Figure 97 illustre ces changements.

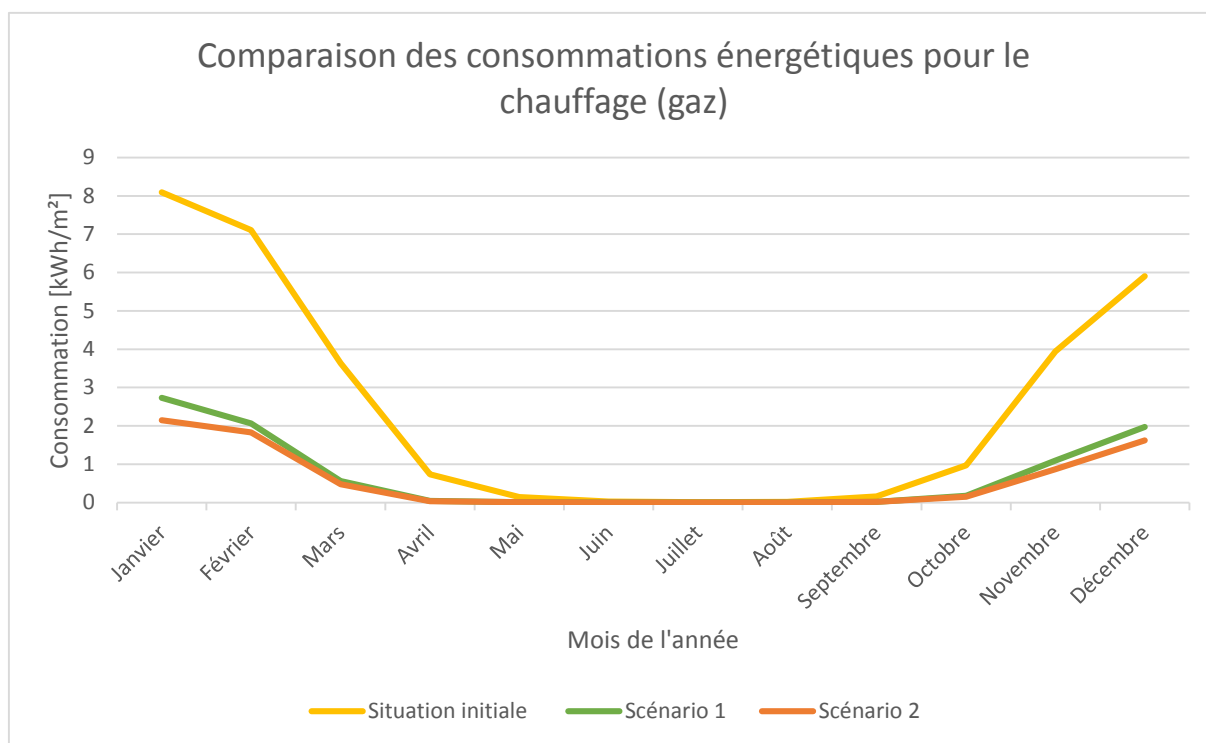


Figure 97 - Comparaison des consommations énergétiques pour le chauffage (gaz) avant et après rénovation

La courbe jaune correspond à la situation initiale tandis que les courbes en vert et orange représentent respectivement les scénarios 1 et 2. Le changement de l'installation de chauffage permet de diminuer drastiquement les consommations énergétiques à ce niveau. La différence entre scénarios est quant à elle beaucoup plus ténue. Comme décrit précédemment, cette différence est probablement issue du changement de surface et volume chauffé dans le cas du deuxième scénario de rénovation. Cette constatation ne privilégie donc aucun des deux scénarios puisque le cas où la consommation est plus faible correspond aussi à la surface intérieure minimale.

La mise en avant d'un scénario ou l'autre est difficilement réalisable par l'analyse des résultats de la simulation thermique dynamique réalisée. Effectivement, les mêmes bases de conception sont utilisées dans les deux cas. La seule différence majeure est la manière dont l'enveloppe est traitée. D'autres critères de comparaison doivent donc être pris en compte. Le respect de l'essence architecturale du bâtiment est un aspect très important. Tandis que le premier scénario tente de respecter au maximum les valeurs architecturales mises en évidence dans ce travail, le second permet de rester davantage fidèle à l'aspect visuel extérieur actuel de la Maison Strebelle. Du point de vue de l'intérieur de la construction, le premier scénario permet de conserver l'apparence générale des parois tandis que le deuxième recouvre l'intégralité des murs (et cloisons) intérieurs. Le premier scénario étudié impacte toutefois quelques éléments mis en évidence dans la description architecturale du bâtiment. L'apparence extérieure de

certaines nœuds particuliers doivent être modifiés. Par exemple, nous avons pointé les décrochements de colonnes de descente d'eau en « U » par rapport à la peau du bâtiment. Ceux-ci ont l'avantage de permettre une isolation entre la paroi et les colonnes sans les dénaturer, mais induisent aussi une suppression du décrochement. De même, certaines percées verticales des murs cloisonnant les patios (voir détail en plan du scénario 1 p. 116) doivent être comblées pour garantir la continuité de l'isolation thermique en pourtour de l'enveloppe. L'aperçu de la volumétrie depuis l'extérieur de la construction reste néanmoins peu impacté dans les deux scénarios de rénovation.

Une étude sur les coûts de rénovation peut être réalisée de manière à apporter un critère de comparaison supplémentaire pour les deux scénarios. Celle-ci est décrite dans le point suivant.

6.4.2. Calcul des coûts globaux de la rénovation

Pour le calcul des coûts de rénovation des deux scénarios envisagés, nous effectuons quelques simplifications. D'abord, le calcul effectué ne prend pas en compte la totalité des postes de rénovation. Effectivement, des éléments sont difficilement chiffrables sans développer davantage le projet. Par exemple, le câblage électrique éventuel, les raccordements nécessaires ou encore les frais d'installation de chantier nécessitent une étude plus détaillée. Seuls les éléments connus sont budgétisés et sous-estiment ainsi le coût réel de l'opération. Néanmoins, cela permet de comparer les prix des deux configurations retenues. Pour l'évaluation des coûts unitaires, nous nous basons principalement sur les derniers prix publiés en juillet 2015 par l'ABEX (Association Belge des Experts). Certains coûts proviennent aussi des prix proposés par des entreprises spécialisées, des fabricants des produits utilisés ou encore d'estimations personnelles pour certains postes difficilement disponibles. Cette évaluation est donc bien une estimation destinée uniquement à comparer les scénarios, qu'il convient de revoir en fonction des prix réels, dans un cadre concret. Notons également que les travaux d'aménagements extérieurs sont importants mais non pris en considération dans ce calcul.

Les tableaux d'estimations des coûts sont fournis dans la partie annexe (voir Annexe 7).

Pour le premier scénario, le prix de rénovation normalisé par la surface au sol de la Maison Strebelle est de **766,86 [€/m²]**. Il est **669,13 [€/m²]** pour le second scénario. Ce calcul montre donc qu'une isolation par l'intérieur est moins onéreuse dans ce projet de rénovation. Dans cette estimation très globale, le coût de rénovation des façades en blocs de béton est près

de deux fois plus important dans le premier scénario. La solution en crépis permet de rééquilibrer les prix des deux scénarios mais la solution d'isolation par l'intérieur reste la moins onéreuse.

Nous pouvons donc affirmer, pour conclure cette comparaison, que la solution d'isolation par l'intérieur semble plus intéressante du point de vue des coûts, de l'aspect extérieur de la construction, de la mise en œuvre de la rénovation mais apparaît moins avantageuse pour l'intérieur de la Maison Strebelle. Dans ce cas, c'est le premier scénario qui semble s'imposer. Même si une isolation doit être posée aux pieds de certains murs intérieurs pour compenser les ponts thermiques entre dalles et vides ventilés, l'impact sur l'aspect intérieur reste minime. D'un point de vue durabilité, ce premier scénario permet aussi de protéger davantage les éléments structurels de la maison mais induit des postes supplémentaires. Par exemple, le terrassement en pourtour de la construction n'est pas forcément nécessaire dans le cas d'une isolation par l'intérieur tandis qu'il est indispensable pour une isolation par l'extérieur.

Terminons par préciser que cette brève comparaison n'a pas pour but de faire émerger un seul scénario plausible mais bien de permettre au lecteur de pouvoir se forger son opinion, tout en utilisant l'ensemble des documents, mesures et calculs réalisés au travers de ce travail.

Chapitre 7 : Conclusions

A travers ce travail, nous avons abordé la question de la rénovation de la Maison Strebelle, un bâtiment aux qualités architecturales et patrimoniales indéniables. L'objectif initial consistait à fournir un document qui puisse montrer comment il est possible de rénover énergétiquement ce bâtiment. Pour ce faire, différentes étapes ont été suivies. Nous avons commencé par analyser la construction en profondeur. Des visites, des relevés et des mesures ont permis de bien comprendre la structure du bâtiment, son fonctionnement ainsi que l'évolution qu'il a pu connaître depuis sa construction dans les années 1960. Une phase de recherche portant sur l'édification du site du Sart Tilman a permis de mettre en avant le contexte socio-économique et architectural de l'époque, se traduisant indirectement dans l'architecture de la maison étudiée. L'issue de cette première étape de compréhension du bâtiment et de son environnement fût la mise en évidence des caractéristiques architecturales propres à la Maison Strebelle. L'identification de ces caractéristiques est une étape primordiale dans tout processus de rénovation, mais elle prend un sens particulier pour les bâtiments d'intérêt patrimonial. Ils sont témoins d'une époque de notre histoire de l'architecture, de la manière dont les constructions prenaient formes à une époque et qu'il convient de respecter, notamment pour l'enseignement qu'ils peuvent apporter.

La phase d'audit ultérieure avait pour but de décrire le plus précisément possible l'état actuel de la construction. Nous avons pu mettre en avant les défauts apparents au même titre que les défaillances invisibles. La thermographie infrarouge a principalement mis en évidence les mauvaises performances de l'enveloppe et de l'étanchéité à l'air de la construction. En outre, la caméra thermique s'est révélée importante dans la compréhension des structures sous-jacentes. Même si les résultats issus de la thermographie sont davantage qualitatifs, ceux-ci ont l'avantage d'informer l'auditeur rapidement sur les problèmes du bâtiment. Une analyse des systèmes en place, y compris l'installation de l'éclairage, a été réalisée et a montré que ceux-ci devaient être améliorés pour assurer une situation de confort intérieur minimal. Au même titre, les émetteurs de chaleur actuels sont peu performants et les déperditions engendrées au niveau des parois ont pu être visualisées.

La modélisation thermique dynamique s'est révélée être un outil très intéressant pour développer des solutions de rénovation. Après calibration du modèle avec les consommations réelles, elle a permis de simuler les options de rénovation choisies. Elle a d'ailleurs été utile pour hiérarchiser les défaillances de la construction. On a pu voir que dans la situation initiale,

les murs extérieurs et les vitrages installés constituaient les défauts les plus importants de l'enveloppe. Une attention particulière doit donc être apportée sur ces éléments dans le développement d'une solution de rénovation réelle. Bien que moins problématique initialement, les toitures et planchers montrent aussi des performances moindres.

Les scénarios de rénovation choisis sont naturellement nés d'un questionnement sur la meilleure manière de rénover énergétiquement le bâtiment. Les deux scénarios peuvent prétendre à une certification passive ; si bien sûr les mêmes hypothèses de modélisation et de simulation sont respectées. Des choix ont été effectués. Ils ont pour but de mettre en évidence une certaine suite logique dans les opérations de rénovation. Ils servent à montrer les exigences minimales à respecter afin d'obtenir une rénovation jusqu'à un niveau passif. Ils participent ainsi à prouver qu'il existe des solutions pour faire entrer les bâtiments d'intérêt patrimonial dans les défis énergétiques de la société actuelle.

Les résultats de ce travail montrent qu'une diminution de la consommation en énergie primaire de plus de 63 [%] est possible. De même, les performances des parois peuvent être améliorées de près de 80 [%], selon les cas. Le confort intérieur peut être optimisé et le dimensionnement réalisé pour l'éclairage montre qu'il est nécessaire d'installer onze nouveaux points lumineux performants. L'étude comparative entre systèmes de chauffage et le dimensionnement des émetteurs a montré que la solution optimale pour ce bâtiment n'est pas unique, mais tout de même orientée vers une chaudière gaz à condensation assortie de radiateurs. Les détails techniques dessinés pour les configurations retenues permettent de comprendre la manière dont la rénovation de l'enveloppe peut prendre place. Les coûts calculés sont inférieurs à 800 [€/m²] et prouvent que la rénovation envisagée est réellement envisageable.

La comparaison des résultats des deux scénarios permet difficilement de faire un choix entre eux. Le premier scénario permet de répondre aux exigences passives au prix d'une modification de l'aspect visuel du bâtiment. Le choix des matériaux de revêtement est personnel et il est clair que d'autres revêtements peuvent être employés, mais il traduit la manière dont nous avons perçu le bâtiment. Il respecte la logique qui s'applique dans cette troisième phase d'édification du site du Sart Tilman, à savoir, une recherche de durabilité des bâtiments. Il permet donc d'assurer une protection optimale de la construction par l'adjonction d'un nouveau revêtement de surface. Le second scénario envisagé, prônant une isolation thermique par l'intérieur du bâtiment possède lui aussi des avantages et des désavantages. Le premier avantage est d'ordre esthétique. Effectivement, il permet de conserver presque intégralement l'aspect

visuel de la construction. Cet avantage peut également être perçu comme un désavantage du point de vue de la durabilité. Les maçonneries extérieures ont souffert à travers les dernières décennies : elles sont davantage poreuses et peuvent être une source de désagrément si aucune intervention n'est prévue. Même si l'essentiel de la rénovation des parois se concentre sur l'intérieur de la construction, des études sur les parois existantes extérieures doivent être réalisées. Celles-ci n'ont pas été traitées dans le cadre de ce travail mais il est clair qu'un respect du scénario envisagé n'est pas suffisant. La porosité des matériaux devrait être vérifiée et, le cas échéant, améliorée par un traitement de surface pour assurer le caractère durable recherché aujourd'hui.

Au même titre et de façon globale, les pathologies de la construction n'ont pas été analysées en détail mais des défauts tels que fissures, écaillages de peinture ou encore désordres esthétiques sont présents au sein du bâtiment. L'aménagement des espaces extérieurs devrait être traité pour faire également partie du projet de rénovation global. Ce dernier a visiblement été étudié et travaillé en détail lors de la construction de la Maison Strebelle dans les années 1960. Par exemple, le mobilier extérieur est en béton, complètement intégré à l'espace mais dans un état assez dégradé qu'il conviendrait de rénover adéquatement.

La question de la reproductibilité a été abordée au sein des différents chapitres de ce travail. Rappelons que cette étude est reproductible si l'ensemble des hypothèses et les choix de départ sont identiques. Dans tout projet architectural, une part subjective apparaît. La pertinence de certains choix peut être discutée selon la sensibilité, l'interprétation ou encore l'expérience personnelle. Par contre, les résultats issus de mesures objectives, basées sur une méthodologie scientifique adaptée et validée, doivent être identiques dans les mêmes conditions.

Ce travail a donc permis de montrer qu'il est possible, en appliquant une démarche définie préalablement, de rénover un bâtiment patrimonial jusqu'à obtenir des critères énergétiques performants. Le contenu des scénarios ne prend pas en compte tous les aspects à considérer dans une situation réelle mais permet de livrer les grandes lignes directrices. Pour aller plus loin, il serait nécessaire d'investiguer en profondeur chacun des postes. De vérifier certaines données par sondage, comme la profondeur des vides ventilés (qui peuvent avoir une grande influence sur la performance des planchers), la composition exacte de certaines parois (telles que les toitures en structure bois) ou encore la pertinence du fichier météorologique créé (en installant une campagne de monitoring in situ à l'extérieur du bâtiment).

Bibliographie

- Acket, C., & Vaillant, J. (2011). *Les énergies renouvelables : Etat des lieux et perspectives*. Paris: Editions Technip.
- ADEME. (2014). *Cahier des charges, Audit énergétique dans les bâtiments*. En ligne sur ADEME : <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/cdc-ademe-audit-energetique-dans-les-batiments-17-12-2014.pdf>, consulté le 22 Février 2016.
- Architecture et climat - Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme UCL. (s.d.). *Energie +, Efficacité énergétique des bâtiments tertiaires*. En ligne sur Energie + : <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11314>, consulté le 12 Avril 2016.
- Architecture et climat - Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme UCL. (s.d.). *Le confort thermique.*, En ligne sur Energie +, Efficacité énergétique des bâtiments tertiaires : <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10250>, consulté le 22 Avril 2016.
- ASHRAE. (2004). *Procedures for Commercial Building Energy Audits*. (M. Geshwiler, Éd.) Atlanta.
- Association Belge des Experts. (2015). *Bordereau des prix unitaires*. Bruxelles: ABEX.
- Association internationale R.E.D. (s.d.). *Projet B.A.P.E.*, En ligne sur Ruralité-Environnement-Développement : <http://www.ruraleurope.org/content/view/140/4/lang,french/>, Consulté le 19 Février 2016.
- Association internationale R.E.D. (s.d.). *Projet ERFIN*. En ligne sur Ruralité-Environnement-Développement : <http://www.ruraleurope.org/content/view/177/4/lang,french/>, Consulté le 19 Février 2016.
- Association internationale R.E.D. (s.d.). *Projet PAGE45+*. En ligne sur Ruralité-Environnement-Développement: <http://www.ruraleurope.org/content/view/206/4/lang,french/>, consulté le 19 Février 2016.
- Association Internationale R.E.D. (s.d.). *Des territoires ruraux dans la dynamique européenne*. En ligne sur Ruralité-Environnement-Développement:

- http://www.ruraleurope.org/component/option,com_frontpage/Itemid,1/lang,french/, consulté le Février 19, 2016
- Atelier d'architecture du Sart Tilman. (1984). *Urbanisme et architecture d'ensemble*.
- Attia, S. (2011). *State of the Art of Existing Early Design Simulation Tools for Net Zero Energy Buildings : A Comparison of Ten Tools*.
- Batisim. (2013). *Pourquoi choisir le logiciel DesignBuilder*. En ligne sur Batisim, simulation thermique du bâtiment : <http://www.batisim.net/index.php/designbuilder.html>, consulté le Mai 1, 2016,
- Charlier, S., & Moor, T. (2014). *Guide architecture moderne et contemporaine 1895-2014 Liège*. Bruxelles: Mardaga.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Glazer, J. (2001). EnergyPlus : creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, vol. 33, pp. 319-331.
- Dall'O', G. (2013). *Green Energy Audit of Buildings, A Guide for a Sustainable Energy Audit of Buildings*. Londres: Springer, p. 16 et 23.
- De Cuyper, K. (2006). *Economiser l'énergie grâce aux chaudières à condensation*. Récupéré sur CSTC - Publications: <http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact9&art=143>
- De Keyser, W., Laureysens, I., Polfliet, A., & Possemiers, T. (2012). *Energies renouvelables : produire et économiser*. Waterloo: Wolters Kluwer Belgium SA.
- Delmotte, C. (2011, Décembre). *La thermographie infrarouge*. En ligne sur CSTC - Centre Scientifique et Technique de la Construction : http://www.cstc.be/homepage/download.cfm?dtype=na_energy&doc=La%20thermographie%20infrarouge.201112.pdf&lang=fr, consulté le 26 avril 2016.
- Direction générale Statistique - Statistics Belgium. (2015). *Le parc de bâtiments*. En ligne sur Economie. Statistics Belgium : http://statbel.fgov.be/fr/statistiques/chiffres/economie/construction_industrie/parc/, consulté le 25 Février 2016.

- European Energy Efficiency Fund (EEEF). (2014). *Conférence de presse 18 juin 2014*. En ligne sur <https://www.ulg.ac.be/upload/docs/application/pdf/2014-06/eeef-slides-90.pdf>, consulté le 23 Février 2016
- European Energy Efficiency Fund. (2014). *Annual Report*. En ligne sur http://www.eeef.lu/tl_files/downloads/Annual_Reports/EEEF_Annual_Report_2014.pdf, consulté le 23 Février 2016.
- Frankignoulle, P. (2014). Le domaine universitaire de Liège et son patrimoine architectural. Dans *Les campus universitaires 1945-1975. Architecture et urbanisme, histoire et sociologie, état des lieux et perspectives* (pp. 261-269). Perpignan, France: Presses Universitaires de Perpignan.
- Giebeler, G., Fisch, R., Krause, H., Musso, F., Petzinka, K.-H., & Rudolphi, A. (2012). *Rénover le bâti*. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR).
- Gouvernement Wallon. (2014). Annexe C3 de l'Arrêté du Gouvernement wallon du 15 mai 2014 relatif à la performance énergétique des bâtiments. En ligne sur <https://wallex.wallonie.be/index.php?doc=28448>, consulté le 14 Mai 2016.
- Gouvernement wallon. (2014). *Déclaration de Politique Régionale 2014-2019 : Oser, innover, rassembler*. En ligne sur Gouvernement wallon : <http://gouvernement.wallonie.be/sites/default/files/nodes/story/6371-dpr2014-2019.pdf>, consulté le 18 Février 2016.
- Henrion, P. (2009, Mars). *Claude Strebelle, architecte urbaniste, du Sart Tilman à Calvi*. En ligne sur Culture, le magazine culturel de l'Université de Liège : http://culture.ulg.ac.be/jcms/c_12972/fr/claude-strebelle-architecte-urbaniste-du-sart-tilman-a-calvi, consulté le 12 Mars 2016.
- Institut Belge de l'éclairage. (2007). *Code de Bonne Pratique en Eclairage Intérieur*. Récupéré sur IBE-BIV: http://www.ibe-biv.be/media/pdf/IBE-BIV_Code_de_bonne_pratique_12464_1__FR__2007.pdf
- Janssens, P. (2014). Diminuer la facture d'énergie. *15e Mensuel de l'Université de Liège*, p. 2.
- Jedidi, M., & Benjeddou, O. (2016). *La thermique du bâtiment*. Paris: Dunod.

- Journal officiel de l'Union européenne. (2012). *Directive 2012/27/UE du Parlement européen*. En ligne sur <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32012L0027>, consulté le 23 Février 2016.
- Kaiser, G. (2016). Quel chauffage pour les maisons passives et basse énergie ? Dans *Je vais Construire & Rénover*, pp. 51-60.
- Legros, W. (2005). Le Sart Tilman, source d'espoir. Dans *Les cahiers de l'urbanisme* n°54-55, p. 6.
- Lesage, O. (2009). *La ventilation des bâtiments non résidentiels - Aperçu réglementaire et normatif*. En ligne sur Centre Scientifique et Technique de la Construction: <http://www.confederatiebouw.be/UserFiles/File/1%20LESAGE%20FR%20-%2027%20mai%202009.pdf>, consulté le 14 Mai 2016.
- López, M., Yáñez, A., Gomes da Costa, S., & Avellà, L. (2014). Proceedings of the International Conference on Energy Efficiency and Historic Buildings. Madrid: Fundación de Casas Históricas y Singulares y Fundación Ars Civilis.
- Marchesani, F. (2014). Institut d'électricité "Montefiore" (B28). Dans S. Charlier, & T. Moor, *Guide architecture moderne et contemporaine 1885-2014 Liège* (pp. 286-287). Bruxelles: Mardaga.
- Meteotest. (s.d.). *List of all Meteororm Features*. En ligne sur Meteororm : <http://www.meteororm.com/en/features>, consulté le 1 Mai 2016.
- Micha, E. (2005). Un patrimoine architectural. Dans *Les cahiers de l'urbanisme* n°54-55, pp. 70-77.
- Passive House Institute. (2015). *Passive House requirements*. En ligne sur Passive House Institute - The independent institute for outstanding energy efficiency in buildings: http://passivehouse.com/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm, consulté le 1 Mai 2016.
- Plate-forme Maison Passive a.s.b.l. (2013). *Les critères passifs pour le TERTIAIRE*. En ligne sur PMP : <http://www.maisonpassive.be/?Les-criteres-38>, consulté le 15 Mai 2016.
- Ré-Emploi. (2010). *Le projet RE-Emploi en quelques mots*. En ligne sur Ré-emploi - Rénovation durable et Emploi : <http://www.renovationdurable.eu/Le-projet-RE-Emploi-en-quelques.html>, consulté le 25 Janvier 2016.

- Rojey, A. (2008). *Energie & Climat, Réussir la transition énergétique*. Paris: Technip.
- Roulet, C.-A. (2004). *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Service Public de Wallonie. (2011). Passif et basse énergie dans les bâtiments industriels et tertiaires. *Réactif - Le point énergie de la Wallonie pour les professionnels et décideurs*, p. 3.
- Strebel, C. (2005). Urbanisme et architecture au Sart-Tilman. Dans *Les cahiers de l'urbanisme* n°54-55, pp. 25-32.
- Syndicat Français de l'Industrie Cimentaire (SFIC). (2016). *Le béton soigne son apparence*. En ligne sur InfoCiments : La base documentaire de référence sur les ciments et les bétons: <http://www.infociments.fr/betons/matiere-creation/texture>, consulté le 14 Mai 2016.
- ULg Presse-Communication. (2011, Novembre 14). *Le campus du Sart Tilman chauffé grâce à la cogénération biomasse*. En ligne sur Université de Liège : https://www.ulg.ac.be/cms/c_1383226/fr/le-campus-du-sart-tilman-chauffe-grace-a-la-cogeneration-biomasse, consulté le 21 Mai 2016.
- Université de Liège. (2014). *Levée de 1,5 million d'euro auprès de EEEF*. En ligne sur Université de Liège : https://www.ulg.ac.be/cms/c_4534990/fr/levee-de-1-5-million-deuros-aupres-de-leeef, consulté le 15 Novembre 2016.
- Vrijders, J., & Loncour, X. (2016). La rénovation énergétique : un défi et une opportunité. *CSTC-Contact. Edition spéciale : La rénovation énergétique des bâtiments*, p. 3.

Table des figures

Figure 1 - Répartition des constructions belges en fonction de leur date de construction (source : Direction générale Statistique - Statistics Belgium, 2015).....	12
Figure 2 - B3c : Maison Strebelle	14
Figure 3 - Méthodologie globale	23
Figure 4 - Méthodologie détaillée	25
Figure 5 - Localisation du Sart Tilman (source : WalOnMap)	27
Figure 6 - Claude Strebelle (Henrion, 2009).....	28
Figure 7 - Plan directeur (Atelier d'architecture du Sart Tilman, 1984)	29
Figure 8 - Pavillon D des Urbanistes et maison Strebelle (ULg-Houet).....	30
Figure 9 - Institut Montefiore (ULg-Houet).....	31
Figure 10 - Amphithéâtres de l'Europe (B4), Génie Civil (B52), Institut de mathématique (B37).....	32
Figure 11 - Localisation de la Maison Strebelle (ULg)	33
Figure 12 - Plan d'exécution du rez-de-chaussée : Avril 1962 (ARI)	34
Figure 13 - Plan du rez-de-chaussée : Juin 1969 (ARI)	35
Figure 14 - Position du mur cloisonnant le patio de 1962 (ARI).....	36
Figure 15 - Façade Nord (à gauche) et façade Ouest (à droite), vue de colonnes en forme de "U"	37
Figure 16 - Vue de la façade sud.....	38
Figure 17 - Utilisation du bois à l'intérieur : revêtement et mobilier	39
Figure 18 - Détail de porte intérieure pivotante	39
Figure 19 - Configuration spatiale actuelle	42
Figure 20 - Schéma structurel de la maison Strebelle	43
Figure 21 – Coupe verticale : composition des murs de façade	45
Figure 22 - Exemple de façade en structure bois et coupe horizontale.....	45
Figure 23 - Coupe verticale : détail des toitures en pente	46
Figure 24 - Vue d'une poutre à inertie variable sur la façade est côté intérieur du patio 1	46
Figure 25 - About de poutre de toiture en lamellé-collé	47
Figure 26 - Convecteur à gaz	49
Figure 27 - Ventouse de convecteur à gaz	49
Figure 28 - Schéma d'implantation des convecteurs à gaz.....	50

Figure 29 - Consommation de gaz pour le B3C	52
Figure 30 - Data logger Hobo	53
Figure 31 - Positionnement des capteurs "data logger"	53
Figure 32 - Evolution de l'éclairage sur le plan de travail : Bureau 1	54
Figure 33 - Zone de confort hygrothermique (source : Jedidi & Benjeddou, 2016, p.17).....	55
Figure 34 - Représentation des points de mesures sur le diagramme psychrométrique (bureau 1).....	56
Figure 35 - Thermomètre infrarouge Testo 830-T1	59
Figure 36 - 6 in 1 Multi-functional Environmental Meter MS6300.....	59
Figure 37 - Résultats du calcul de PMV et PPD - Comfort Calculator.....	60
Figure 38 - Résultats du calcul de PMV et PPD après modification des paramètres - Comfort Calculator	60
Figure 39 - Caméra thermique Flir I7	61
Figure 40 - Repérage des points de vue de photographie thermique extérieurs.....	62
Figure 41 - Photographie thermique extérieure n°1	62
Figure 42 - Photographie thermique extérieure n°2	63
Figure 43 - Photographie thermique extérieure n°3	63
Figure 44 - Photographie thermique extérieure n°4	64
Figure 45 - Photographie thermique extérieure n°5	64
Figure 46 - Photographie thermique extérieure n°6	65
Figure 47 - Photographie thermique extérieure n°7	65
Figure 48 - Photographie thermique extérieure n°8	66
Figure 49 - Photographie thermique extérieure n°9	66
Figure 50 - Repérage des points de vue de photographie thermique intérieurs	67
Figure 51 - Photographie thermique intérieure n°1.....	67
Figure 52 - Photographie thermique intérieure n°2.....	68
Figure 53 - Photographie thermique intérieure n°3.....	68
Figure 54 - Photographie thermique intérieure n°4.....	69
Figure 55 - Photographie thermique intérieure n°5.....	69
Figure 56 - Photographie thermique intérieure n°6.....	70
Figure 57 - Volumétrie simplifiée de la Maison Strebelle	73
Figure 58 - Modèle DesignBuilder de la Maison Strebelle.....	73
Figure 59 - Modélisation de la végétation avoisinante.....	74
Figure 60 - Zonage thermique du B3C.....	75

Figure 61 - Calibration : comparaison des consommations de gaz réelles et simulées.....	80
Figure 62 - Pourcentage de différence entre données réelles et résultats simulés (consommation de gaz)	80
Figure 63 - Evolution du PMV pour la zone thermique n°1 au cours de l'année.....	81
Figure 64 - Consommations énergétiques (gaz et électricité) : Evolution annuelle.....	82
Figure 65 - Répartition de la consommation selon la source énergétique	83
Figure 66 - Répartition de la consommation selon l'utilisation.....	83
Figure 67 - Bilan thermique annuel des parois du bâtiment	84
Figure 68 - Représentation des apports énergétiques internes et solaires	85
Figure 69 - Luminaire RIDI ABRF-R2X145/35ND-SM-Driver et courbe photométrique	88
Figure 70 - Dénomination des locaux pour la rénovation de l'éclairage	89
Figure 71 - Eclairage mis en place dans le bureau n°1	90
Figure 72 - Carte d'éclairement du bureau n°1 (DIALux)	90
Figure 73 - Eclairage mis en place dans le bureau n°2	91
Figure 74 - Eclairage mis en place dans le bureau n°3	91
Figure 75 - Eclairage mis en place dans le bureau n°4	92
Figure 76 - Eclairage mis en place dans le bureau n°5	92
Figure 77 - Type de ventilation décentralisée (source : Airria)	94
Figure 78 - Exemples d'éléments de façade réalisés par "béton matricé" (RECKLI).....	96
Figure 79 - Texture béton matricé choisi comme revêtement de façade.....	97
Figure 80 - DesignBuilder : modification de la paroi existante en béton.....	97
Figure 81 - Exemple de texture réalisable par enduit de surface	98
Figure 82 - DesignBuilder : modification de la toiture en béton.....	100
Figure 83 - Châssis bois et capot en aluminium (source ; Fabricant Riche).....	101
Figure 84 - Triple vitrage (source : Saint-Gobain).....	102
Figure 85 - Chaudière gaz à condensation (Viessmann Vitodens 300-W)	107
Figure 86 - Pompe à chaleur air-eau (Vaillant VWL 115/2).....	107
Figure 87 - Positionnement des radiateurs issus du dimensionnement.....	110
Figure 88 - Localisation des nœuds constructifs sélectionnés	114
Figure 89 - Coupe verticale : jonction plancher/façade et façade/toiture (scénario 1).....	115
Figure 90 - Coupe horizontale : jonction châssis et angle (scénario 1).....	116
Figure 91 - Configurations d'isolation de la toiture par l'intérieur	118
Figure 92 - Positionnement des nœuds problématiques (isolation par l'intérieur).....	120
Figure 93 - Coupe verticale : jonction plancher/façade et façade/toiture (scénario 2).....	121

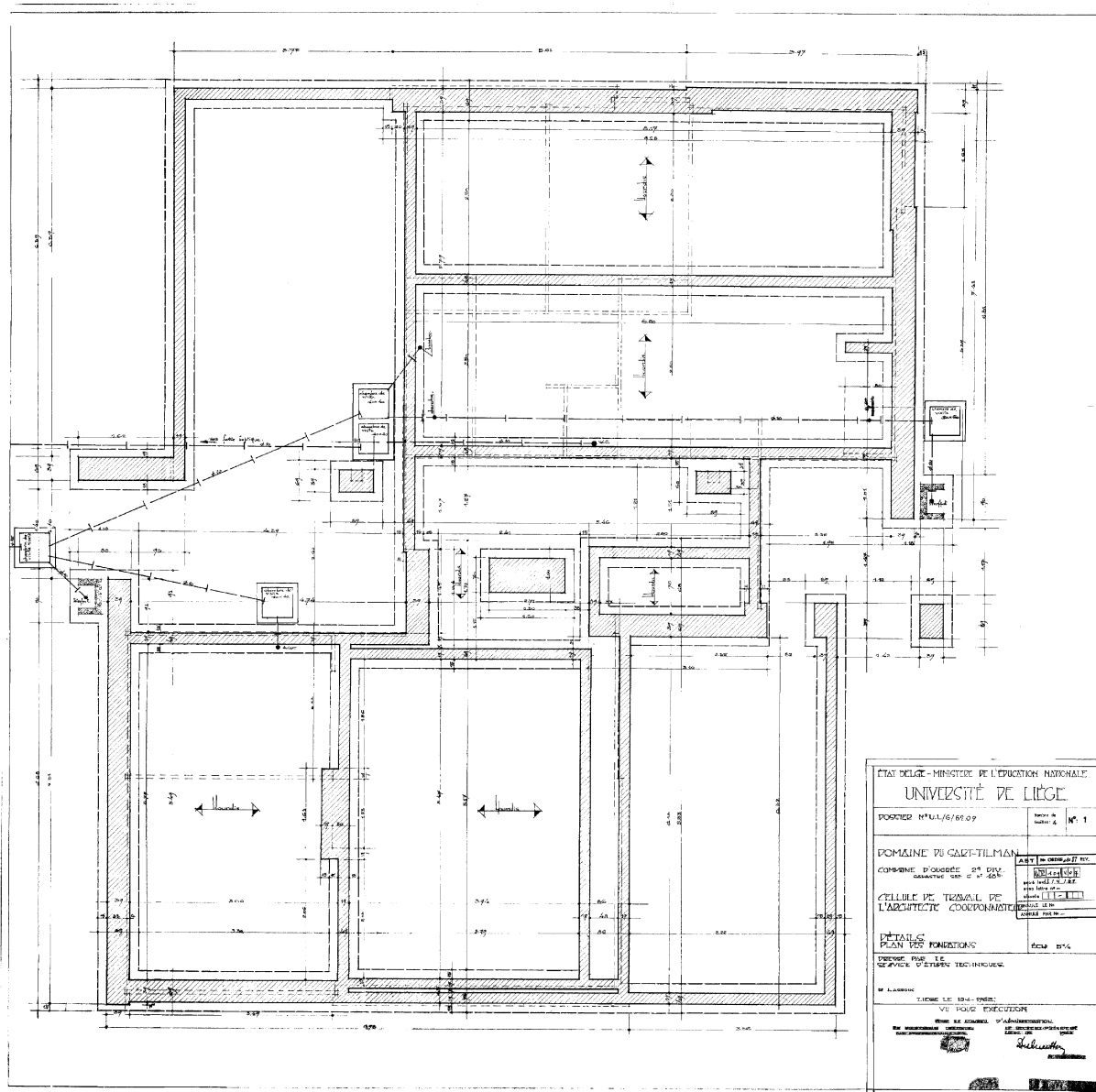
Figure 94 - Coupe horizontale : jonction châssis et angle (scénario 2).....	122
Figure 95 - Comparaison de l'évolution mensuelle du PMV pour les différents scénarios ...	123
Figure 96 - Comparaison des déperditions des parois constitutives de l'enveloppe	124
Figure 97 - Comparaison des consommations énergétiques pour le chauffage (gaz) avant et après rénovation	125

Liste des tableaux

Tableau 1 - Features, instruments and procedures for three operational levels (walkthrough, standard, simulation) of green energy audit (Dall'O', Green Energy Audit of Buildings, A Guide for a Sustainable Energy Audit of Buildings, 2013, p. 23)	21
Tableau 2 - Performances énergétiques des fenêtres et dates de construction (Giebler, et al., 2012).....	48
Tableau 3 - Données des TL T8 en place dans le bâtiment.....	51
Tableau 4 - Consommations de gaz (ARI).....	51
Tableau 5 - Classification de la qualité de l'air (NBN EN 13779 : la ventilation des bâtiments)	57
Tableau 6 - Planning d'occupation (DesignBuilder)	76
Tableau 7 - Liste des éclairages et puissances installées	78
Tableau 8 - Puissance de chauffe installée	79
Tableau 9 - Propriétés du luminaire RIDI ABRF-R2X145/35ND-SM / 0650047	89
Tableau 10 - Débits d'air pour la ventilation mécanique.....	93
Tableau 11 - Calcul des puissances de chauffe nécessaire.....	107
Tableau 12 - Puissance de chauffe nécessaire par bureau.....	108
Tableau 13 - Dimensionnement des radiateurs (calcul des puissances nécessaires).....	109
Tableau 14 - Dimensionnement des planchers chauffants	111
Tableau 15 - Comparaison des estimations de prix pour les systèmes de chauffage étudiés	112

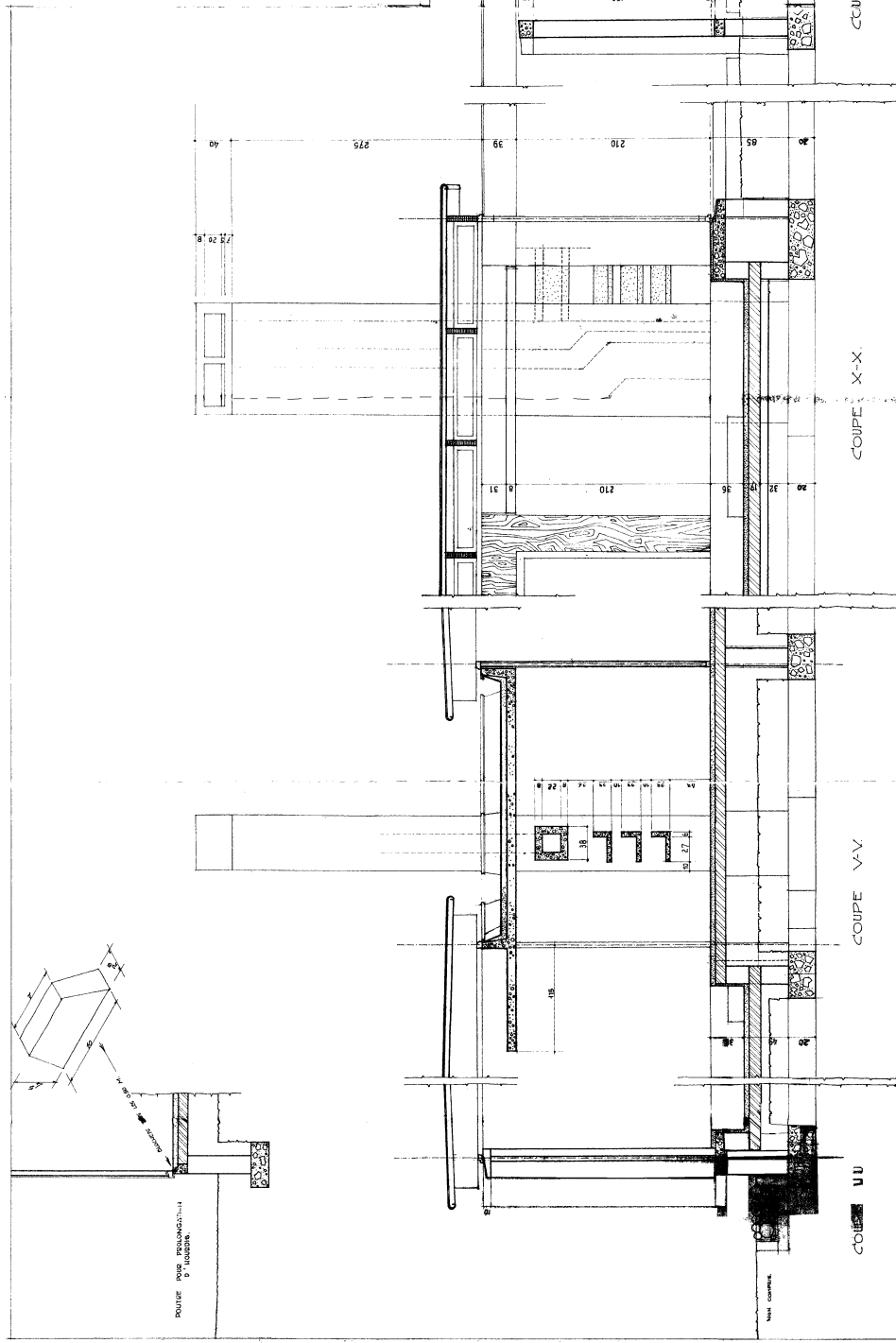
Annexes

Annexe 1 : Plans d'exécution (avril 1962)



Annexe - 1 : Plan des fondations



[illegible]

Annexe 2 : Reportage photographique



Photographie 1



Photographie 2



Photographie 3



Photographie 4



Photographie 5



Photographie 6



Photographie 7



Photographie 8



Photographie 9



Photographie 10



Photographie 11



Photographie 12



Photographie 5



Photographie 6



Photographie 7



Photographie 8

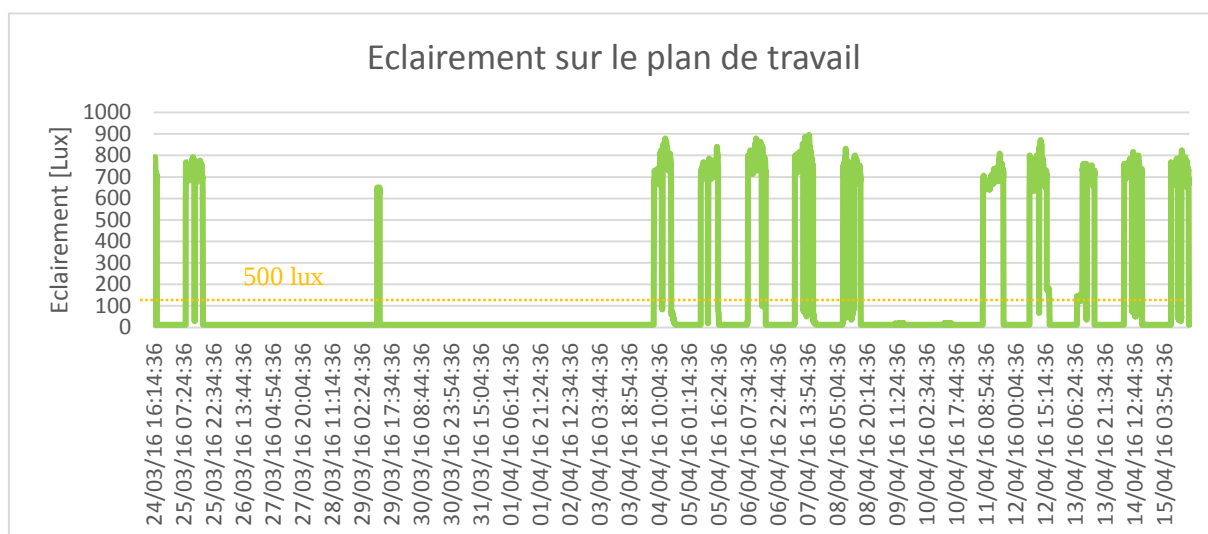


Photographie 9

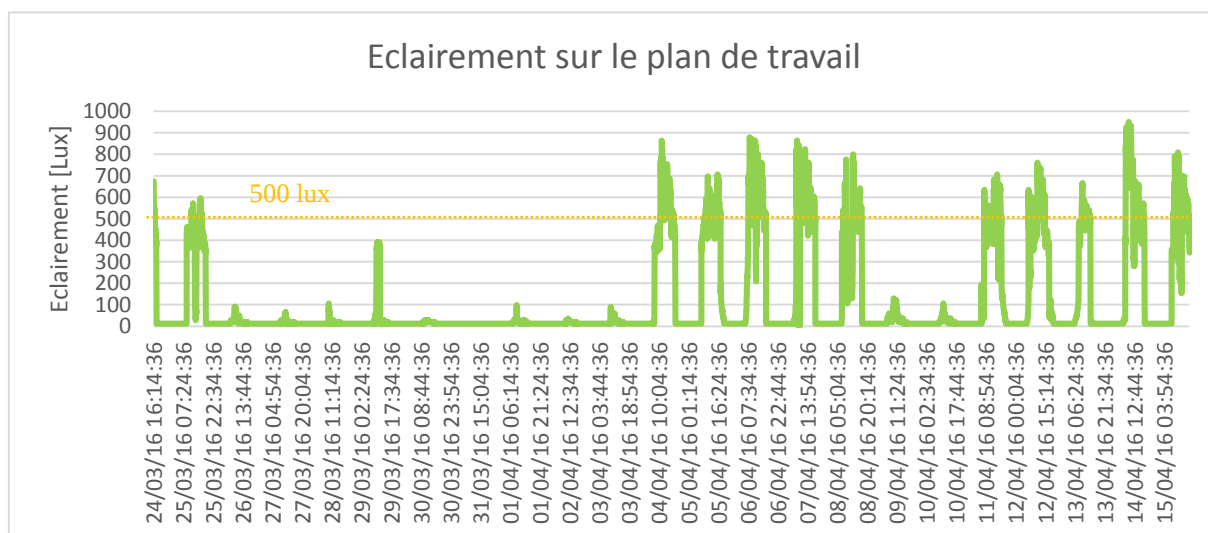


Photographie 10

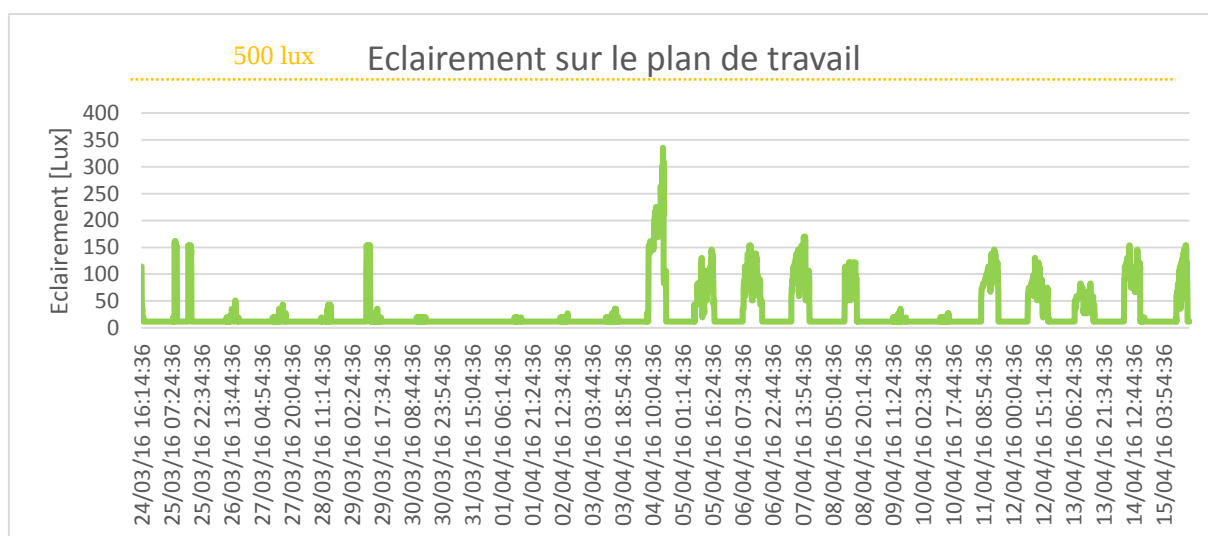
Annexe 3 : Analyse sur le confort



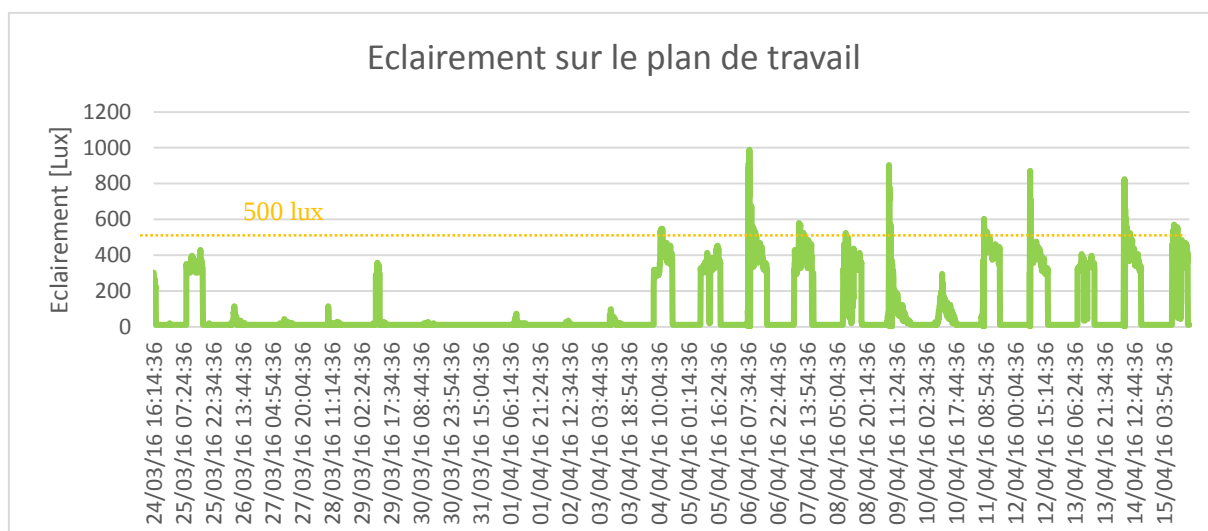
Annexe - 3 : Evolution de l'éclairage sur le plan de travail : Bureau 2



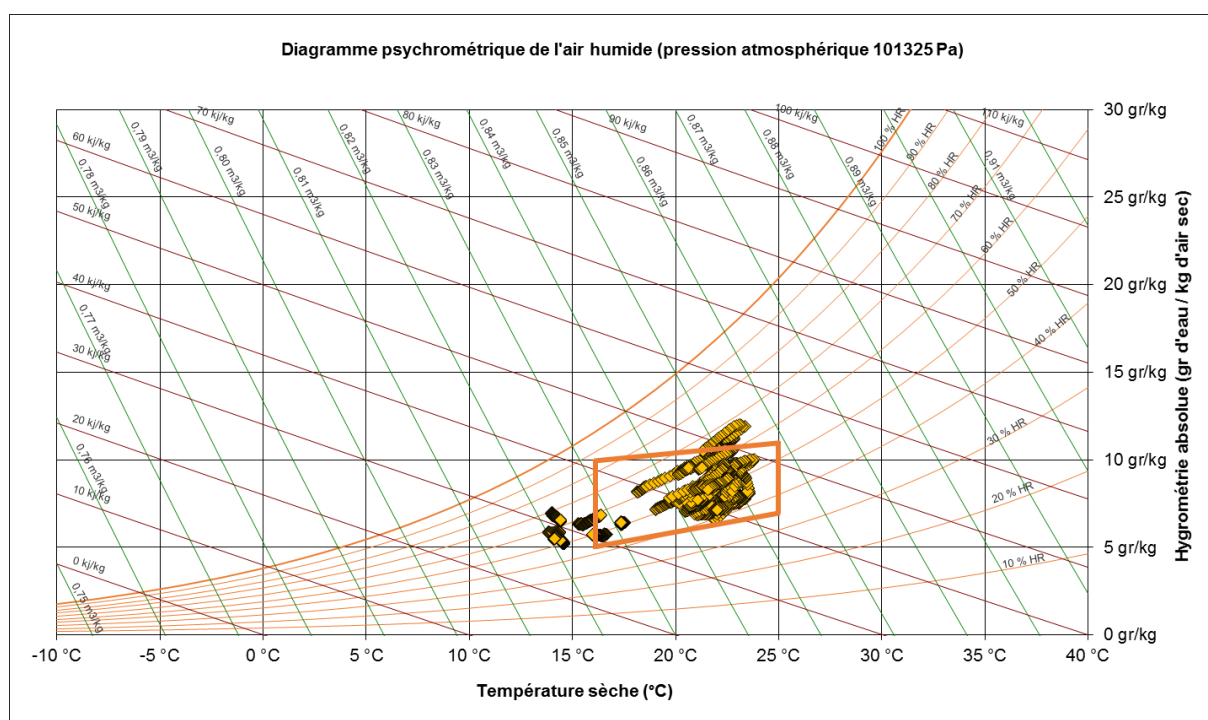
Annexe - 3 : Evolution de l'éclairage sur le plan de travail : Bureau 3



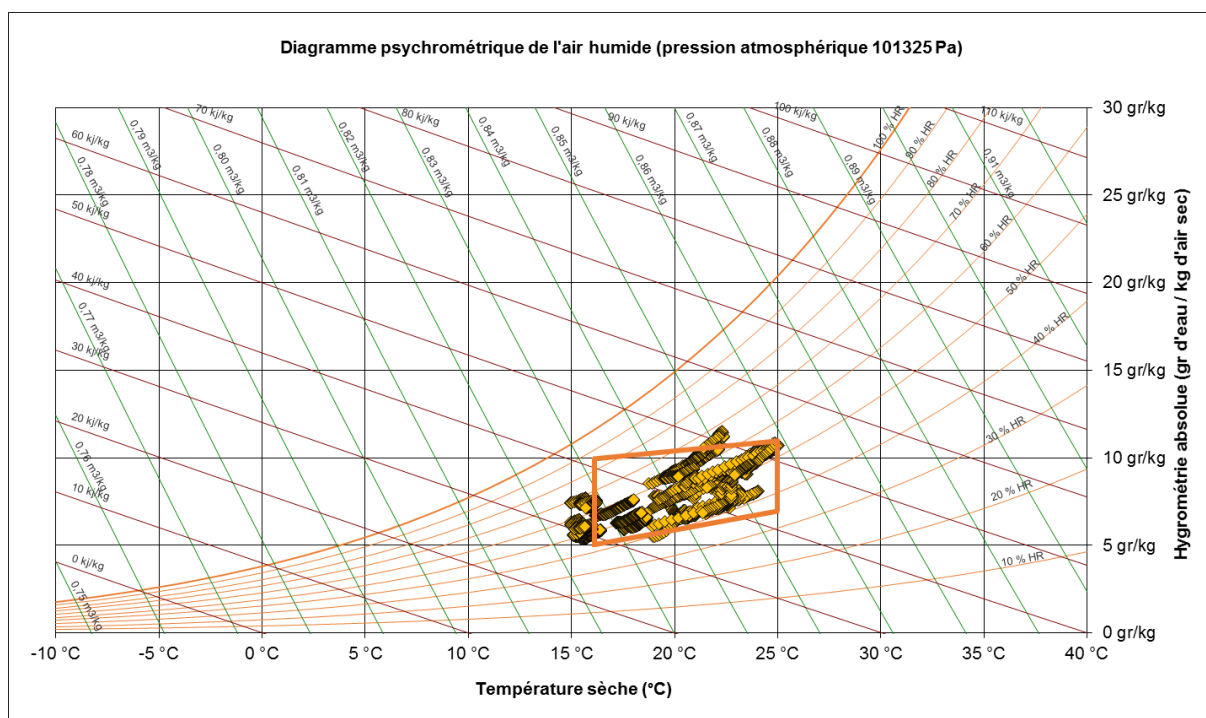
Annexe - 3 : Evolution de l'éclairage sur le plan de travail : Bureau 4



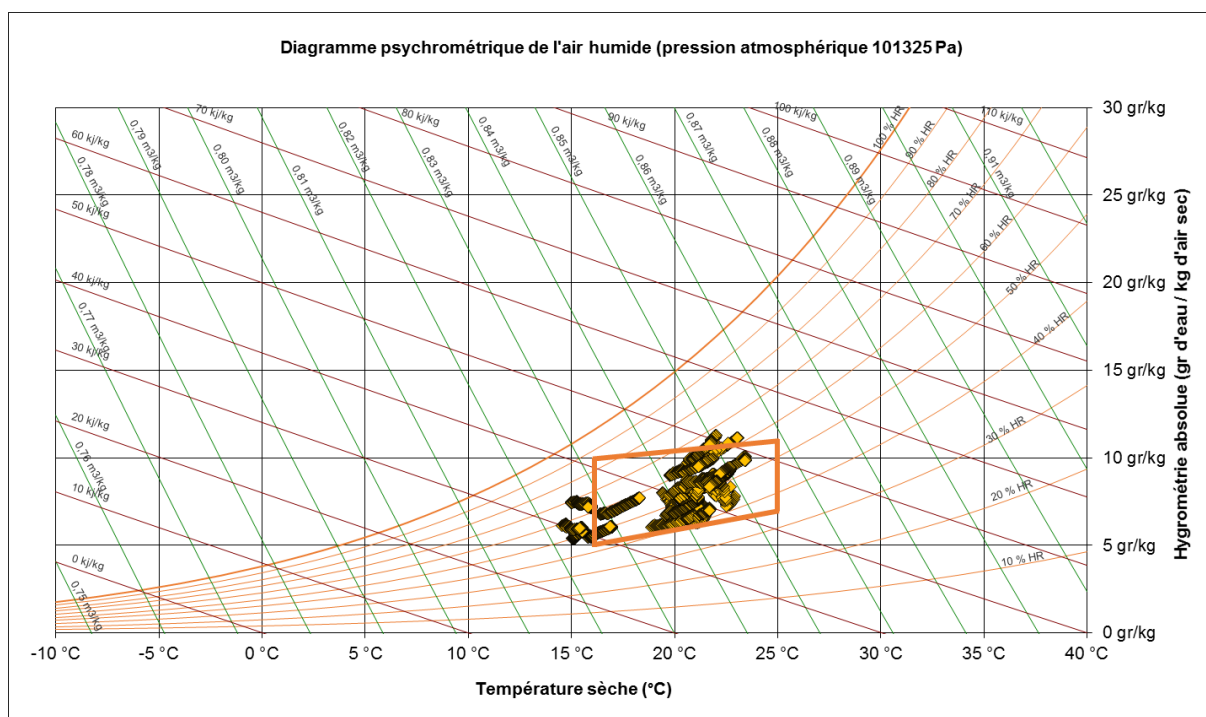
Annexe - 3 : Evolution de l'éclairement sur le plan de travail : Bureau 5



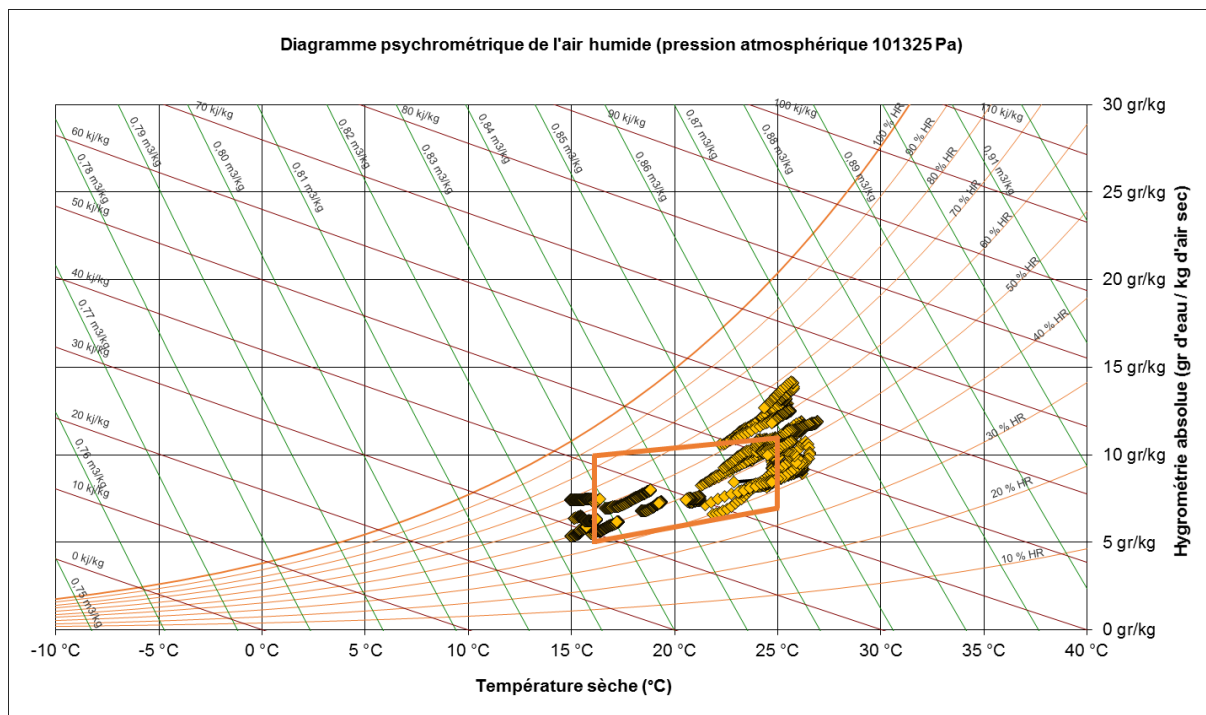
Annexe - 3 : Représentation des points de mesures sur le diagramme psychrométrique (bureau 2)



Annexe - 3 : Représentation des points de mesures sur le diagramme psychrométrique (bureau 3)

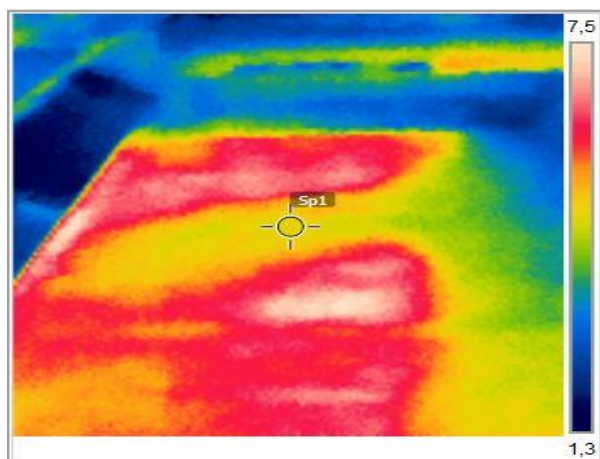


Annexe - 3 : Représentation des points de mesures sur le diagramme psychrométrique (bureau 4)

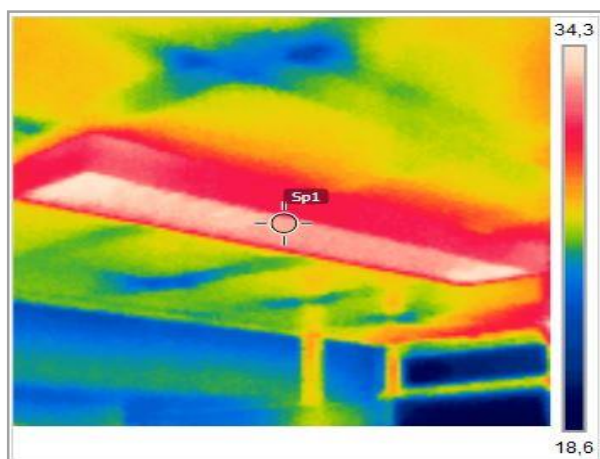


Annexe - 3 : Représentation des points de mesures sur le diagramme psychrométrique (bureau 5)

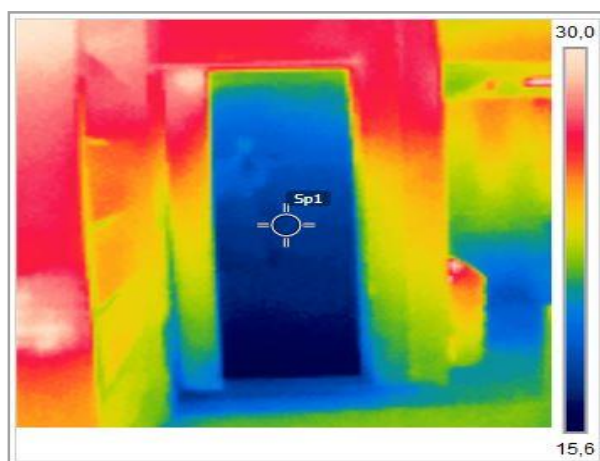
Annexe 4 : Audit thermographique



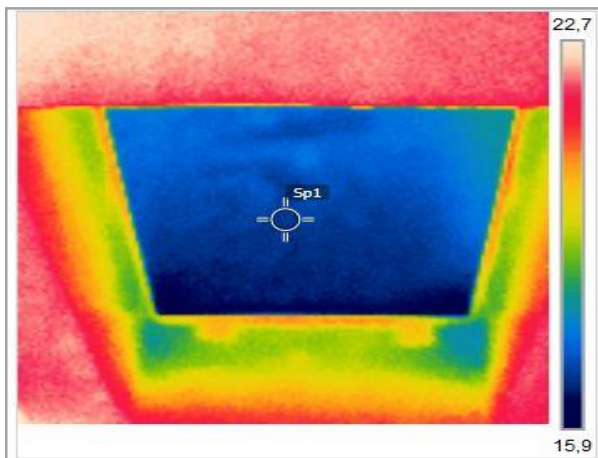
Annexe 4 : Photographie thermique 1



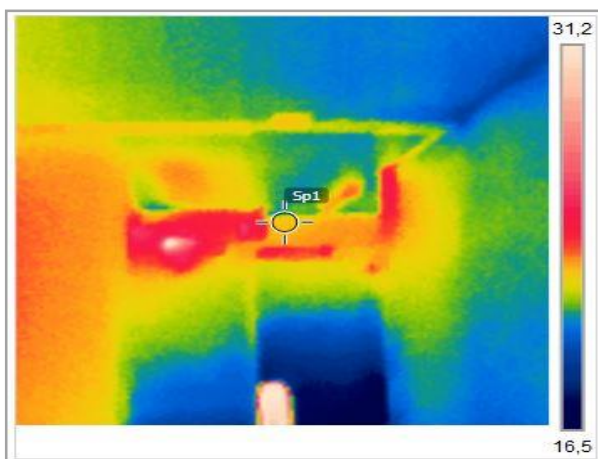
Annexe 4 : Photographie thermique 2



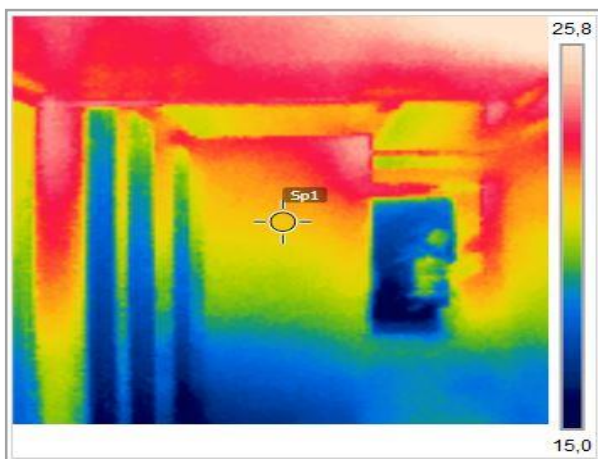
Annexe 4 : Photographie thermique 3



Annexe 4 : Photographie thermique 4

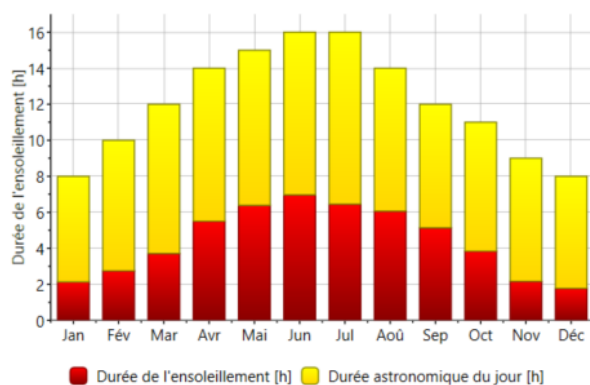


Annexe 4 : Photographie thermique 5

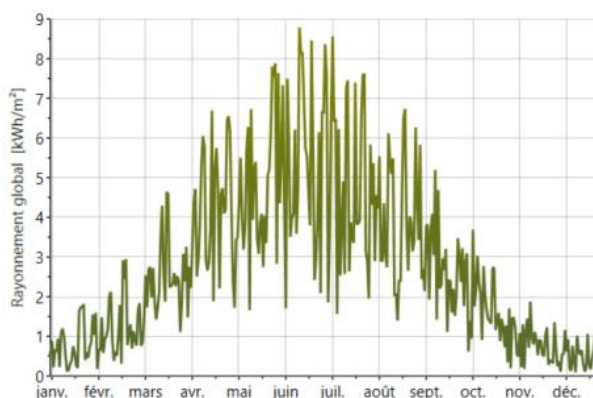


Annexe 4 : Photographie thermique 6

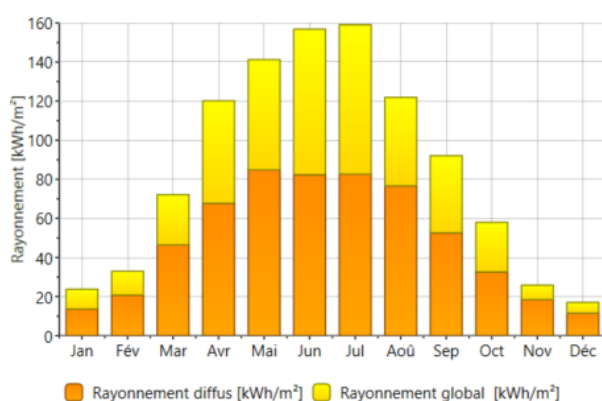
Annexe 5 : Résultats Meteonorm



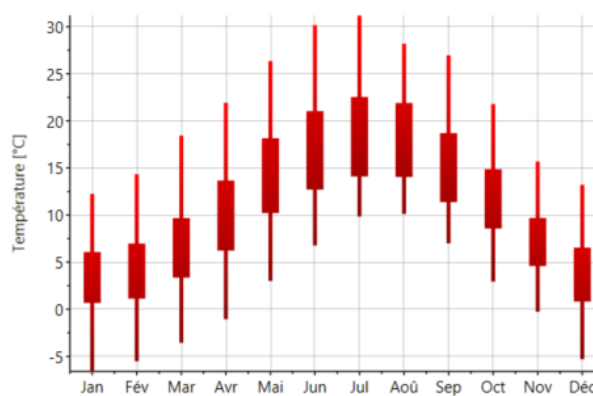
Annexe 5 : Durée d'ensoleillement



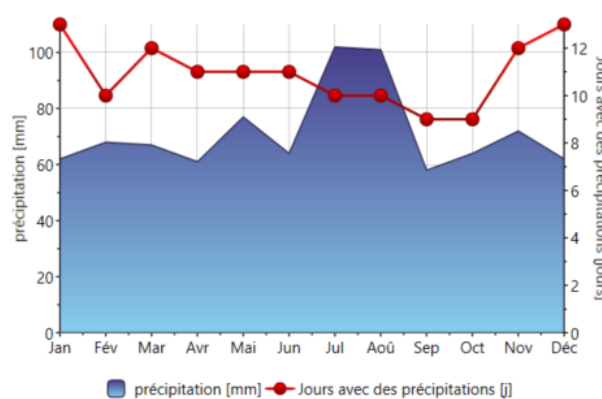
Annexe 5 : Rayonnement global journalier



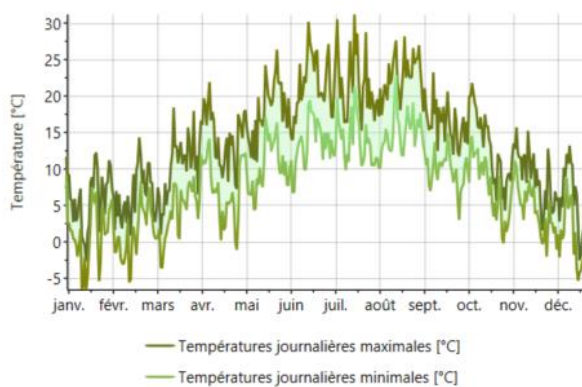
Annexe 5 : Rayonnement



Annexe 5 : Température

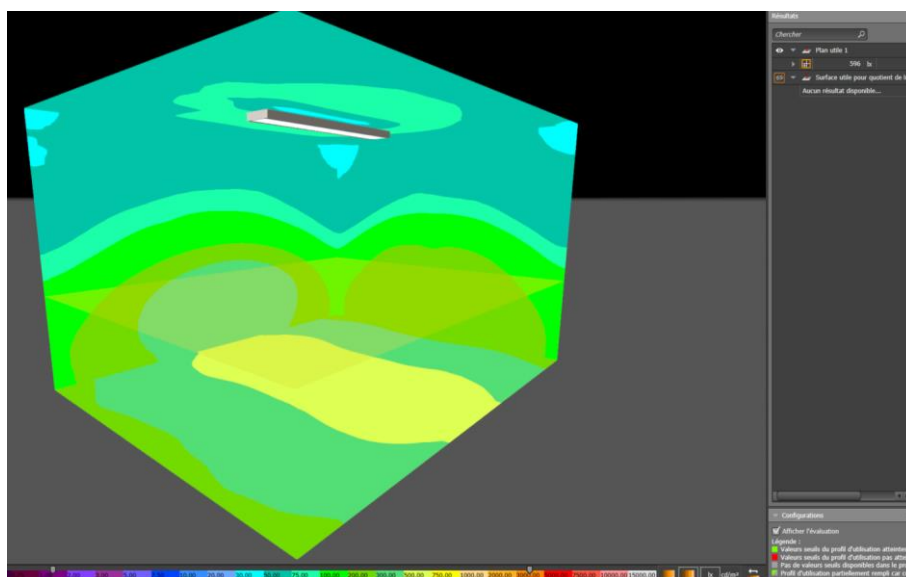


Annexe 5 : Précipitations

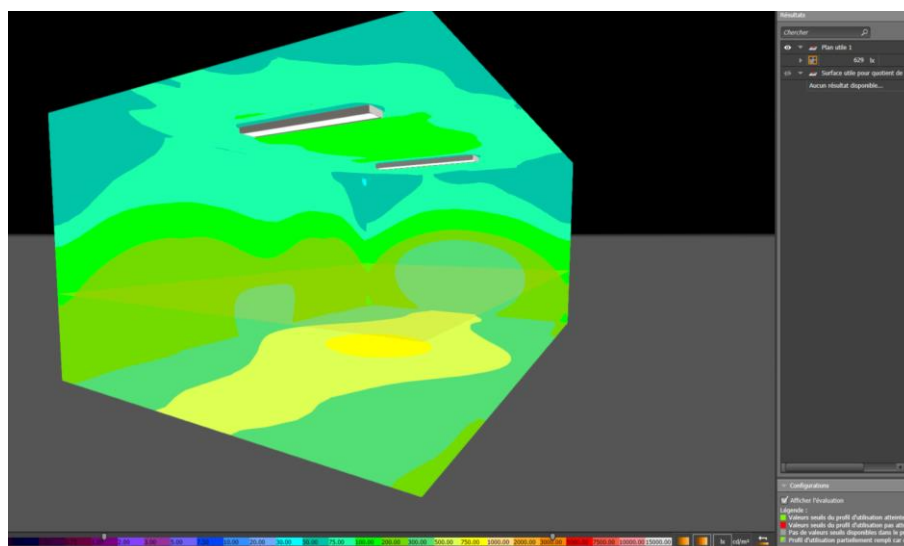


Annexe 5 : Température journalière

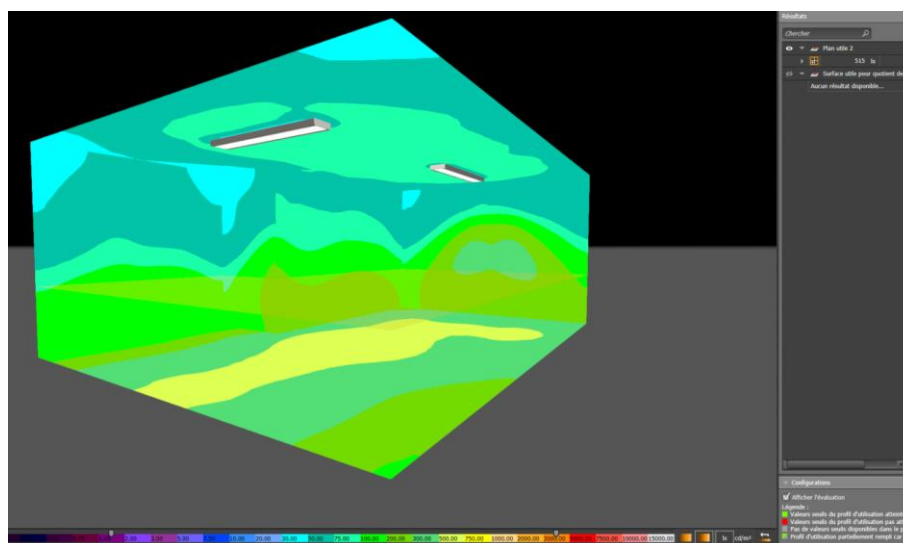
Annexe 6 : Résultats de la simulation d'éclairage DIALux



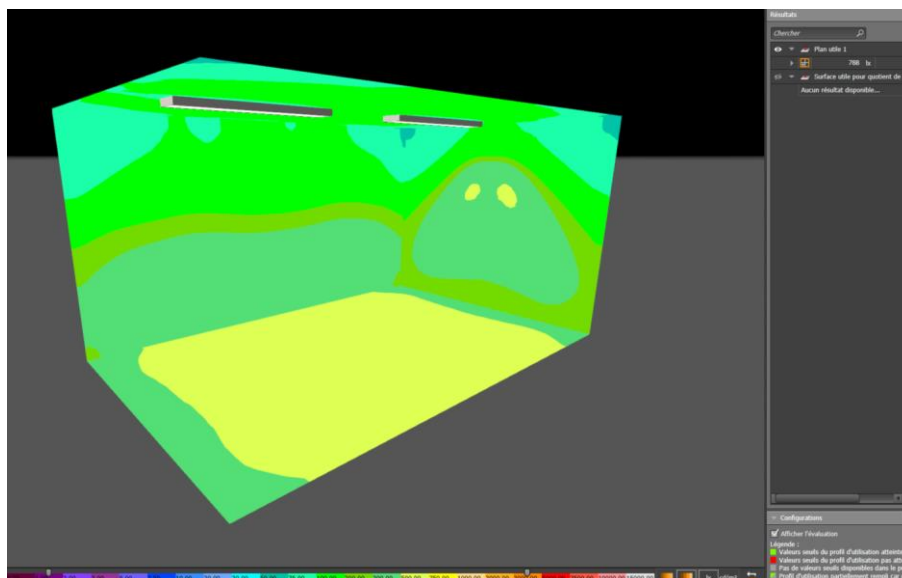
Annexe 6 : Résultats DIALux : bureau n°1



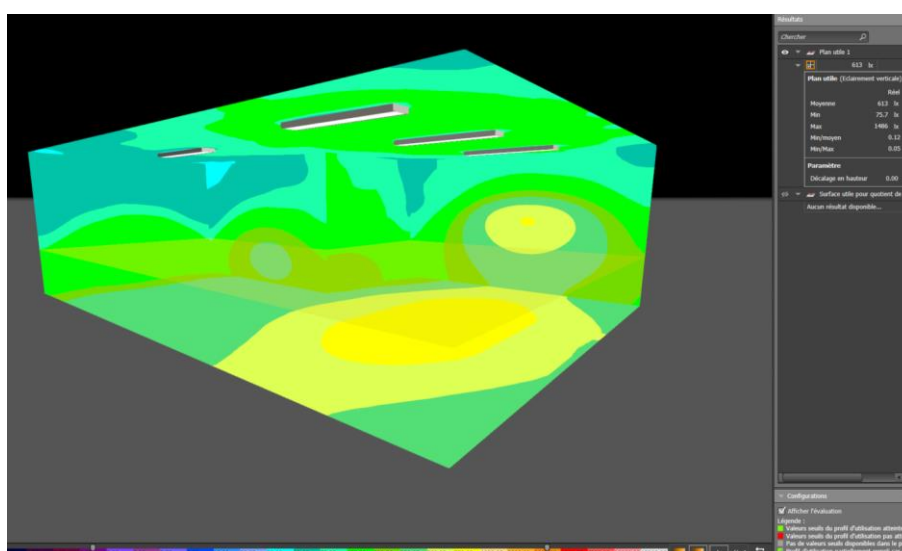
Annexe 6 : Résultats DIALux : bureau n°2



Annexe 6 : Résultats DIALux : bureau n°3



Annexe 6 : Résultats DIALux : bureau n°4



Annexe 6 : Résultats DIALux : bureau n°5

Annexe 7 : Estimation des coûts de rénovation

Annexe 7 : Evaluation des coûts de rénovation pour le premier scénario

Evaluation des coûts pour la première configuration : Isolation par l'extérieur				
Poste	Quantité	Unité	Prix unitaire (TVAC)	Prix total
1. Enveloppe				
1.1. Toitures (structure bois)				
Dépose de l'étanchéité bitumineuse et du panneautage multiplex	118,5	[m²]	19,12 €	2.265,48 €
Isolation laine de verre (30 cm)	118,5	[m²]	28,44 €	3.370,14 €
Panneautage en multiplex	118,5	[m²]	19,20 €	2.275,20 €
Etanchéification par couches bitumineuse	118,5	[m²]	23,40 €	2.772,90 €
Pose des alurives	45,38	[m]	30,70 €	1.393,17 €
			TOTAL TVAC	12.076,89 €
1.2. Toitures (structure en béton)				
Isolation supérieure 2x12 cm de polyuréthane	80,17	[m²]	41,00 €	3.286,97 €
Etanchéité bitumineuse	80,17	[m²]	23,40 €	1.875,98 €
Raccords avec cheminées et fenêtre de toiture	3	[pce]	106,35 €	319,05 €
Pose des alurives	43,4	[m]	30,70 €	1.332,38 €
			TOTAL TVAC	6.814,38 €
1.3. Châssis, portes et vitrages				
Démontage des châssis et vitrage existants	19	[pce]	39,90 €	758,10 €
Châssis bois avec capot alu, vitrages et pose	61,93	[m²]	557,06 €	34.498,73 €
Portes extérieures	2	[pce]	994,04 €	1.988,08 €
			TOTAL TVAC	37.244,91 €
1.4. Murs de façade béton				
Nettoyage de surface par aérogommage (blocs en béton extérieurs)	125,3	[m²]	39,10 €	4.899,23 €
Démontage ligne de bloc supérieure	10,416	[m²]	38,40 €	399,97 €
Maçonnerie bloc béton cellulaire	10,416	[m²]	56,30 €	586,42 €
Isolation extérieure laine de verre (15 cm)	125,3	[m²]	28,44 €	3.563,53 €
Insufflation de la coulisse avec des billes de polystyrène	125,3	[m²]	25,00 €	3.132,50 €
Pose du pare-pluie	125,3	[m²]	12,70 €	1.591,31 €
Pose des panneaux préfabriqués en béton matricé (ancrages compris)	125,3	[m²]	150,00 €	18.795,00 €
Isolation pieds de murs intérieurs	51,6	[m²]	28,44 €	1.467,50 €
Terrassement pieds de murs	92	[m]	64,00 €	5.888,00 €
Etanchéification des murs sous terre	92	[m²]	25,85 €	2.378,20 €
Mise à niveau du mur d'ardoises	19,9	[m²]	85,00 €	1.691,50 €
			TOTAL TVAC	44.393,17 €

1.4. Murs de façade bois				
Ossature primaire poteaux 150x50 mm	26,62	[m²]	13,11 €	348,99 €
Isolation laine de verre 15 cm	26,62	[m²]	28,44 €	757,07 €
Osب 18 mm	26,62	[m²]	25,50 €	678,81 €
Pare-pluie	26,62	[m²]	12,70 €	338,07 €
Lattage et contre-lattage	26,62	[m²]	18,00 €	479,16 €
Bardage bois	26,62	[m²]	43,80 €	1.165,96 €
Pare-vapeur	26,62	[m²]	4,10 €	109,14 €
Finition intérieure en panneaux stratifiés	26,62	[m²]	50	1.331,00 €
			TOTAL TVAC	5.208,20 €
1.5. Dalles de sol				
Dépose du tapis existant	170,13	[m²]	19,20 €	3.266,50 €
Isolation polyuréthane (6cm)	170,13	[m²]	17,80 €	3.028,31 €
OSB 18 [mm]	170,13	[m²]	25,50 €	4.338,32 €
Revêtement de sol linoleum	170,13	[m²]	66,49 €	11.311,94 €
			TOTAL TVAC	21.945,07 €
2. HVAC				
Chaudière gaz à condensation	1	[pce]	3.711,32 €	3.711,32 €
Ventilation mécanique décentralisée		FF	2.320,80 €	2.320,80 €
Installations des radiateurs	7	[pce]	324,20 €	2.269,40 €
			TOTAL TVAC	8.301,52 €
3. Eclairage				
Remplacement de l'ensemble des luminaires par des luminaires LED (11 pièces)		FF	2050,4	2.050,40 €
			TOTAL TVAC	2.050,40 €
			TOTAL RENOVATION	138.034,54 €
				766,86 €/m²

Annexe 7 : Evaluation des coûts de rénovation pour le deuxième scénario

Evaluation des coûts pour la deuxième configuration : Isolation par l'intérieur				
Poste	Quantité	Unité	Prix unitaire (TVAC)	Prix total
1. Enveloppe				
1.1. Toitures (structure bois)				
Dépose de l'étanchéité bitumineuse et du panneautage multiplex	118,5	[m²]	19,12 €	2.265,48 €
Isolation laine de verre (30 cm)	118,5	[m²]	28,44 €	3.370,14 €
Panneautage en multiplex	118,5	[m²]	19,20 €	2.275,20 €
Etanchéification par couches bitumineuse	118,5	[m²]	23,40 €	2.772,90 €
Pose des alurives	45,38	[m]	30,70 €	1.393,17 €
			TOTAL TVAC	12.076,89 €

1.2. Toitures (structure en béton)				
Isolation supérieure et inférieure 12 cm de polyuréthane	80,17	[m²]	41,00 €	3.286,97 €
Etanchéité bitumineuse	80,17	[m²]	23,40 €	1.875,98 €
Raccords avec cheminées et fenêtre de toiture	3	[pce]	106,35 €	319,05 €
Pose des alurives	43,4	[m]	30,70 €	1.332,38 €
Finition de surface inférieure en plaques de plâtre	80,1	[m²]	12,80 €	1.025,28 €
			TOTAL TVAC	7.839,66 €
1.3. Châssis, portes et vitrages				
Démontage des châssis et vitrage existants	19	[pce]	39,90 €	758,10 €
Châssis bois avec capot alu, vitrages et pose	61,93	[m²]	557,06 €	34.498,73 €
Portes extérieures	2	[pce]	994,04 €	1.988,08 €
			TOTAL TVAC	37.244,91 €
1.4. Murs de façade béton				
Nettoyage de surface par aérogommage (blocs en béton extérieurs)	125,3	[m²]	39,10 €	4.899,23 €
Hydrofugage des murs de façade	125,3	[m²]	17,84 €	2.235,35 €
Insufflation de la coulisse avec des billes de polystyrène	125,3	[m²]	25,00 €	3.132,50 €
Isolation intérieure laine de verre (15 cm)	162,15	[m²]	28,44 €	4.611,55 €
Structure bois support	162,15	[m²]	13,11 €	2.125,79 €
Pare-vapeur	162,15	[m²]	4,10 €	664,82 €
Finition de surface en lambris et plaques de plâtre	162,15	[m²]	50,00 €	8.107,50 €
			TOTAL TVAC	25.776,73 €
1.4. Murs de façade bois				
Ossature primaire poteaux 150x50 mm	26,62	[m²]	13,11 €	348,99 €
Isolation laine de verre 15 cm	26,62	[m²]	28,44 €	757,07 €
Osب 18 mm	26,62	[m²]	25,50 €	678,81 €
Pare-pluie	26,62	[m²]	12,70 €	338,07 €
Lattage et contre-lattage	26,62	[m²]	18,00 €	479,16 €
Bardage bois	26,62	[m²]	43,80 €	1.165,96 €
Pare-vapeur	26,62	[m²]	4,10 €	109,14 €
Finition intérieure en panneaux stratifiés	26,62	[m²]	50,00 €	1.331,00 €
			TOTAL TVAC	5.208,20 €
1.5. Dalles de sol				
Dépose du tapis existant	170,13	[m²]	19,20 €	3.266,50 €
Isolation polyuréthane (6cm)	170,13	[m²]	17,80 €	3.028,31 €
OSB 18 [mm]	170,13	[m²]	25,50 €	4.338,32 €
Revêtement de sol linoleum	170,13	[m²]	66,49 €	11.311,94 €
			TOTAL TVAC	21.945,07 €

2. HVAC				
Chaudière gaz à condensation	1	[pce]	3.711,32 €	3.711,32 €
Ventilation mécanique décentralisée		FF	2.320,80 €	2.320,80 €
Installations des radiateurs	7	[pce]	324,20 €	2.269,40 €
			TOTAL TVAC	8.301,52 €
3. Eclairage				
Remplacement de l'ensemble des luminaires par des luminaires LED (11 pièces)		FF	2050,4	2.050,40 €
			TOTAL TVAC	2.050,40 €
			TOTAL RENOVATION	120.443,37 €
				669,13 €/m²



Rénovation énergétique et architecturale de la Maison Strebelle

Authors: Sébastien Laruelle

E-mail: sebastien.laruelle@student.ulg.ac.be
Address: Building Design Lab (SBD)
Quartier Polytech 1
Allée de la Découverte 9
4000 Liège, Belgium
www.sbd.ulg.ac.be
Tel: +32 43.66.91.55
Fax: +32 43.66.29.09

RÉSUMÉ

Les enjeux de ce travail consistent à proposer des solutions de rénovation pour un bâtiment d'intérêt patrimonial de l'Université de Liège : la Maison Strebelle. Pour développer ces propositions, la méthodologie utilisée se base sur deux approches complémentaires. Une section **descriptive** souligne l'évolution architecturale du site et de la construction. Une section **analytique** se base sur la réalisation d'un audit énergétique et thermographique pour créer une modélisation thermique dynamique du bâtiment dans DesignBuilder. Deux scénarios de rénovation sont alors implémentés et comparés. Des détails constructifs, une analyse sur le confort, un dimensionnement de l'éclairage et du système de chauffage sont dressés et permettent d'estimer les coûts de rénovation des configurations retenues, de manière à fournir un projet de rénovation complet et cohérent.

MOTS-CLÉS

Rénovation énergétique, audit, confort, modélisation, simulation, DesignBuilder, coût, architecture moderne, Sart Tilman.

PROBLÉMATIQUE

Ce travail s'intéresse à une problématique actuelle : comment améliorer les performances énergétiques des bâtiments tout en garantissant le respect de l'héritage patrimonial et des caractéristiques architecturales de ceux-ci ?

OBJECTIFS/HYPOTHÈSES

L'objectif majeur de ce travail est de fournir des propositions de rénovation pour la Maison Strebelle. Il permet d'illustrer la manière dont il est possible de faire entrer ce bâtiment d'intérêt architectural dans les défis énergétiques actuels. Ainsi, nous développons des scénarios de rénovation satisfaisant aux critères du « passif ».

AUDIENCE

Cette étude est principalement dédiée aux architectes et constructeurs qui recherchent des solutions techniques et architecturales pour des bâtiments semblables à la Maison Strebelle, construits durant la même période.

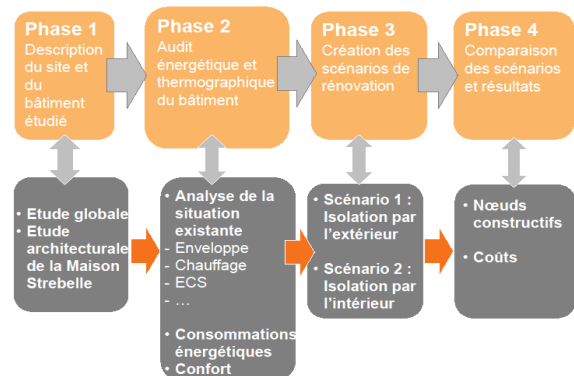
QUESTION DE RECHERCHE

« Comment combiner **rénovation énergétique** et respect du caractère **architectural et patrimonial** des bâtiments ? »

ORIGINALITÉ

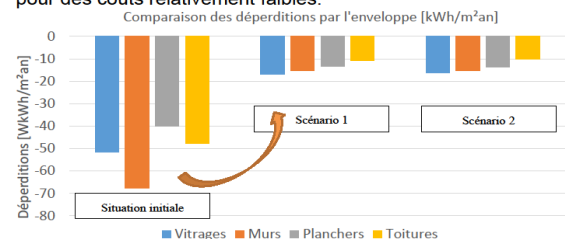
Ce travail trouve son originalité dans la démarche utilisée pour proposer un projet de rénovation. Les caractéristiques architecturales inhérentes au bâtiment considéré servent de critères tout aussi important que la recherche d'efficacité énergétique. Ainsi, des mesures qualitatives s'interpénètrent avec des mesures quantitatives pour aboutir à un projet complet, qui tient compte de ces aspects souvent étudiés isolément.

MÉTHODOLOGIE



RÉSULTATS

Les résultats indiquent que les performances de la construction peuvent être largement améliorées et respecter les critères qui définissent un bâtiment passif aujourd'hui. La consommation en énergie primaire peut être réduite de plus de 60 %. Les performances de l'enveloppe peuvent être améliorées de près de 80 [%] comme en témoigne le graphique ci-dessous et ce, pour des coûts relativement faibles.



Les dimensionnements effectués pour les équipements et installations favorisent l'installation d'un nouvel éclairage LED, la mise en œuvre d'une ventilation décentralisée ainsi qu'un système de chauffage couplant chaudière gaz à condensation et radiateurs.

La méthodologie utilisée a permis d'obtenir des résultats pertinents pour les scénarios de rénovation choisis. La modélisation thermique dynamique s'est avérée très intéressante pour simuler les évolutions possibles et créer les scénarios de rénovation. L'étude architecturale préliminaire a pu être retranscrite dans la réflexion et dans les choix effectués pour ce bâtiment particulier. Bien que des études complémentaires permettraient d'affiner les scénarios créés, ce travail permet de montrer qu'il est possible d'allier efficacité énergétique et rénovation d'un bâtiment d'intérêt architectural et patrimonial.