
Bâtiments d'aujourd'hui, Climat de demain : Évaluation de l'impact du réchauffement climatique sur le confort thermique et l'efficacité énergétique d'un bâtiment résidentiel passif existant en Belgique

Auteur : Gobin, Camille

Promoteur(s) : Attia, Shady

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité approfondie

Année académique : 2015-2016

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/1548>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



Université
de Liège



UNIVERSITE DE LIEGE
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

Bâtiments d'aujourd'hui, Climat de demain :

Évaluation de l'impact du réchauffement climatique sur le confort thermique et l'efficacité énergétique d'un bâtiment résidentiel passif existant en Belgique

Camille GOBIN

Promoteur : S. ATTIA

Jury : S. REITER, X. FETTWEIS, P. ANDRE et J-M. HAUGLUSTAINE.

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de
Master Ingénieur Civil Architecte par Gobin Camille
Année académique 2015-2016

Remerciements

J'adresse un merci tout particulier à mon promoteur, M Shady Attia, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce travail. Il m'a suggéré un sujet d'actualité passionnant et il m'a donné l'occasion de découvrir le domaine enthousiasmant qu'est la recherche en Architecture et plus précisément, le thème des maisons passives et du changement climatique. Je tiens également à le remercier pour les nombreuses réunions de travail, pour sa patience, ses conseils et ses nombreux encouragements.

Je voudrais remercier aussi M Xavier Fettweis et Mme Coraline Wyard pour l'aide qu'ils m'ont apportée sur le domaine du climat avec lequel je n'étais pas familière. M Fettweiss m'a notamment permis de prendre du recul et de comprendre les limites des données climatiques que j'ai utilisées pour ce travail.

Je remercie également Mme Sigrid Reiter, M Philippe André et M Jean-Marie Hauglustaine pour avoir accepté de faire partie de mon jury et d'évaluer mon travail.

Je tiens aussi à grandement remercier Mme Tatiana de Meester pour avoir accepté de me laisser utiliser le modèle de bâtiment qu'elle a étudié lors de son propre travail de fin d'étude. Je remercie par la même occasion Mme Catherine Massart pour m'avoir conseillé de contacter Mme Tatiana de Meester lorsque je recherchais un modèle.

Enfin, je voudrais remercier du fond de mon cœur ma famille et mes amis pour leur soutien tout au long de mes années d'études. Je suis reconnaissante pour votre amour, votre présence, vos messages d'encouragement et pour n'avoir jamais cessé de croire en moi.

Résumé

Face aux enjeux environnementaux actuels, une des solutions proposées dans le domaine du bâtiment durable en Belgique est la « maison passive ». Elle se caractérise notamment par une très bonne isolation thermique et une très forte étanchéité à l'air. Elle est aussi supposée respecter un critère qui impose de ne pas dépasser 5% de surchauffe, c'est-à-dire pas plus de 438 h/an à une température supérieure à 25°C. Si ce modèle de maison apparaît comme une solution viable aujourd'hui, dans un contexte où le réchauffement climatique est un fait avéré, le sera-t-il toujours dans les années à venir ? C'est dans l'optique d'apporter un premier élément de réponse à cette question que cette étude a été réalisée. Dans un premier temps, il a fallu produire les fichiers climatiques correspondants aux quatre scénarios étudiés, un actuel et trois futurs (en 2100), à l'aide du logiciel Meteonorm. Ceux-ci ont été produits par rapport à l'emplacement du cas d'étude considéré, dans l'est de la Belgique. Ce cas d'étude a été modélisé et calibré sur le logiciel de simulation DesignBuilder en lui appliquant les climats choisis. Sur les neuf scénarios de changement climatique et d'utilisation simulés, on observe une augmentation moyenne de la température intérieure entre 0,4°C et 1,2°C entre 2010 et 2100. On y observe également une diminution moyenne de la consommation énergétique en chauffage entre 0% et 17%. Enfin, on constate une augmentation du nombre d'heures de surchauffe entre 451 h et 931 h. Heureusement, l'introduction de certaines solutions dites « passives » de conception architecturale et certaines solutions dites « actives » peut permettre de diminuer le risque de surchauffe. Ces résultats amènent cependant à remettre en question le standard de la « maison passive ». Par conséquent, ils peuvent intéresser aussi bien des ingénieurs en construction, des ingénieurs architecte, des architectes que tout autre chercheur s'intéressant à ce sujet.

Abstract

Faced with current environmental crises, one of the solutions proposed in the building sector is the "Passive House". The Passive House is characterized by a very good thermal insulation and very high airtightness. It is also supposed to meet a standard that requires not exceed 5% of overheating, that is to say no more than 438 h/year at a temperature above 25°C. If these homes appear as a viable solution today, in a context where global warming is a proven fact, will they still be effective in the years to come? To answer this question this study was conducted as a Master Thesis at Liege University. First, weather files corresponding to four scenarios were studied, one current weather and three future ones (2100), with the help of Meteonorm software. These were produced in relation to the location of case study located in Eastern Belgium. This case study was modelled and calibrated using DesignBuilder simulation tool. As a result of the nine climate change and user scenarios simulated, there is an average increase in internal temperature from 0.4°C to 1.2°C from 2010 to 2100. There is also an average reduction of energy consumption in heating from 0% to 17%. Finally, there is an increase in the number of hours of overheating from 451 h to 931 h. Fortunately, introducing "passive" and "active" measures can mitigate the overheating risk. However, these results raise the concerns of overheating risks associated with the "Passive House" standard. This study is important for construction engineers, architectural engineers and architects working on high performance buildings in Belgium.

Synthèse

Dans le contexte actuel où l'environnement et plus précisément l'évolution exponentielle de la consommation énergétique de ces dernières années sont au cœur des préoccupations mondiales, une des solutions d'économie d'énergie mises en œuvre dans le domaine de l'habitat est la « maison passive ». Si ce modèle de maison apparaît comme une solution viable aujourd'hui, dans un contexte où le réchauffement climatique est un fait avéré, le sera-t-il toujours dans les années à venir ? C'est dans l'optique d'apporter un premier élément de réponse à cette question que cette étude a été réalisée.

Pour bien comprendre la problématique à l'origine de ce travail, deux notions sont essentielles. La première est la « maison passive » caractérisée notamment par une très bonne isolation thermique et une très forte étanchéité à l'air. Elle est aussi supposée respecter un critère qui impose de ne pas dépasser 5% de surchauffe, c'est-à-dire pas plus de 438 h/an à une température supérieure à 25°C. La seconde est le réchauffement climatique, en particulier les scénarios de prévisions de ce réchauffement. Ces derniers ont pour but de proposer des représentations de ce que le futur pourrait être. Ce sont des outils qui permettent d'analyser l'évolution d'un certains nombres de paramètres, de forces qui eux-mêmes vont influencer l'évolution des émissions de GES. Si des études ont déjà été réalisées liant réchauffement climatique et habitat, il n'en existe pas à l'heure actuelle qui pose la question de la durabilité du concept de « maison passive » en termes de confort thermique et de consommation énergétique.

Cette étude a été réalisée sous forme d'une étude de cas. Dans un premier temps, il a fallu produire les fichiers climatiques correspondants aux quatre scénarios étudiés, un actuel et trois futurs, à l'aide du logiciel Meteonorm. Ceux-ci ont été produits par rapport à l'emplacement du cas d'étude considéré, dans l'est de la Belgique. Ce cas d'étude, fourni par de Meester (2008), a été modélisé et calibré sur le logiciel DesignBuilder en lui appliquant les climats choisis. En plus de cela, je me suis basée sur la norme NBN EN15251:2007 pour établir trois scénarios d'utilisation « thermique » de la maison : trois modèles de températures consignes appliquées.

Plusieurs tendances générales ressortent des résultats obtenus. Sur les neuf scénarios de changement climatique et d'utilisation simulés, on observe une augmentation moyenne de la température intérieure entre 0,4°C et 1,2°C entre 2010 et 2100. On y observe également une diminution moyenne de la consommation énergétique en chauffage entre 0% et 17%. Enfin, on constate une augmentation du nombre d'heures de surchauffe entre 451 h et 931 h.

Les résultats issus de ces différents scénarios d'utilisation, mais aussi de prévision climatique, démontrent que ce phénomène de surchauffe se produira indépendamment des habitudes des habitants. D'un autre côté, le réchauffement climatique, au travers d'une élévation des températures, permet de réduire la consommation énergétique en chauffage laquelle entraîne une diminution de la

consommation énergétique totale. Aux vues des problèmes de surchauffe à venir, cette diminution, même légère, est peut-être le début d'une solution. En effet, l'énergie économisée lors des saisons froides pourrait être réinvestie lors des saisons chaudes pour réduire le risque de surchauffe. Les résultats obtenus dans cette étude sont toutefois à manipuler avec précautions. En effet, certains facteurs ont pu influencer la précision du modèle et par là même la précision des résultats.

Cette étude n'est qu'un premier pas, mais elle amène une question d'importance : le modèle de la maison passive doit-il être amélioré afin d'éviter les risques de surchauffe ? C'est le cas de la maison que j'ai étudié : il faut trouver des solutions à mettre en œuvre afin d'éviter les risques identifiés lors de ce travail. Il existe des solutions dites « passives » de conception architecturale et des solutions dites « actives » pour lutter contre la surchauffe dans les habitations et un certain nombre d'entre elles peuvent être mises en place même après la construction de l'habitation.

Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé	ii
Abstract.....	iii
Synthèse.....	iv
Chapitre 1 : Introduction	1
Chapitre 2 : Etat de l'art.....	5
1) Maison Passive.....	5
a) Consommation d'énergie	5
b) Energie solaire	6
c) Isolation.....	7
d) Ventilation.....	8
e) Electricité.....	9
f) Besoins d'énergie supplémentaire	9
2) Réchauffement climatiques et scénarios futurs	10
a) Réchauffement climatique.....	10
b) Scénarios du réchauffement climatique futur.....	12
3) Etudes Similaires	18
Chapitre 3 : Méthodologie.....	23
1) Présentation des principaux logiciels utilisés.....	23
a) Meteonorm	23
b) DesignBuilder - EnergyPlus	24
2) Description du modèle de bâtiment choisi	26
3) Détails des modèles climatiques.....	27
a) Climat initial	27
b) Scénario A1B	28
c) Scénario A2.....	29
d) Scénario B1.....	30
4) Modèle de « confort thermique » choisi	31
a) La notion de confort thermique.....	31
b) Le modèle choisi et ses limites.....	32
5) Utilisation du logiciel Meteonorm	34
a) Création d'un nouveau site.....	34
b) Choix du climat.....	34

c)	Choix du format de sortie des données.....	35
d)	Aperçu des données générées	35
6)	Utilisation du logiciel DesignBuilder	36
a)	Importation des données Meteonorm sur DesignBuilder	36
b)	Géométrie.....	37
c)	Zonage	38
d)	Étanchéité à l'air	40
e)	Compositions des parois	41
f)	Activité et Planning.....	49
g)	Eclairage et Planning	63
h)	HVAC	64
7)	Calibration du Modèle	69
8)	Bilan de la méthodologie.....	71
Chapitre 4 : Résultats obtenus		73
1)	Hypothèse 1 : Scénario de confort optimal (H1).....	74
a)	Confort thermique.....	74
b)	Consommation énergétique	77
2)	Hypothèse 2 : Scénario de confort intermédiaire (H2).....	82
a)	Confort thermique.....	82
b)	Consommation énergétique	85
3)	Hypothèse 3 : Scénario de confort acceptable (H3)	90
a)	Confort thermique.....	90
b)	Consommation énergétique	93
Chapitre 5 : Discussion.....		99
1)	Interprétations des résultats.....	99
a)	Surchauffe	99
b)	Chauffage et Energie	99
2)	Limites.....	100
a)	Limites de l'étude	100
b)	Limites des logiciels	100
3)	Conséquences et solutions possibles.....	102
a)	Santé/Population	102
b)	Pistes de solutions	102

4) Bilan de la discussion	108
Chapitre 6 : Conclusion	110
1) Bilan du travail effectué.....	110
2) Recommandations pour constructions neuves de rénovations	111
3) Bilan personnel	111
Bibliographie.....	113
Annexe 1 : Extrait du travail de fin d'étude « <i>Etude du comportement thermique et énergétique d'une maison passive par modélisation dynamique</i> » de Tatiana de Meester.....	117
Annexe 2 : Plan du RDC de la Maison Kettenis	131
Annexe 3 : Plan du R+1 de la Maison Kettenis	132
Annexe 4 : Coupe de la Maison Kettenis.....	133
Annexe 5 : Façade Nord de la Maison Kettenis	133
Annexe 6 : Façade Ouest de la Maison Kettenis.....	134
Annexe 7 : Façade Sud de la Maison Kettenis.....	134
Annexe 8 : Planning de travail suivi.....	135
Annexe 6 : Poster	136
Annexe 7 : Curriculum Vitae	137

Table des figures

Figure 1 : Evolution de la consommation mondiale annuelle d'énergie primaire (Guerriat, Contexte Général, 2008)	1
Figure 2 : Évolution des températures moyennes en France de 1900 à 2013 par rapport à la période de référence 1961-1990 (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2015).....	2
Figure 3 : Plan du Rapport.....	3
Figure 4 : Schéma type d'une maison passive (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	5
Figure 5 : Anomalies des températures moyennes annuelles combinées des surfaces terrestres et maritimes par rapport à la moyenne sur la période de 1986 à 2005 (GIEC, 2014, p. 6).....	10
Figure 6 : Evolution des précipitations observées de 1951 à 2010 dans le monde (IPCC, 2014, p. 41).....	11
Figure 7 : Température moyenne annuelle (en °C) à Saint-Josse-ten-Noode/Uccle, sur la période 1833-2014 (IRM (Institut Royal Météorologique de Belgique), 2015, p. 7)....	11
Figure 8 : Quantité annuelle de précipitations (en mm) à Saint-Josse-ten-Noode/Uccle, sur la période 1833-2014 (IRM (Institut Royal Météorologique de Belgique), 2015, p. 16)	12
Figure 9 : Construction des scénarios SRES (IPCC, Special Report on Emissions Scenarios, 2000, p. 4).....	13
Figure 10 : Aperçu des quatre scénarios climatiques du KNMI'06 (Hurk, et al., Sharpening the IPCC conclusions into New Climate Change Scenarios for The Netherlands, 2006, p. 15)	14
Figure 11 : Graphes représentant les précipitations (mm/3 mois ; en haut) et la température (°C ; en bas) observées ainsi que les scénarios climatiques en pointillés colorés, en hiver (à gauche) et en été (à droite) (Hurk, et al., KNMI climate change scenarios 2006 for the Netherlands, 2006, p. 63).....	14
Figure 12 : Elaboration en parallèle des scénarios climatiques (d'après Noorwijkerhout) (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2013, p. 6)	15
Figure 13 : RCP comparés aux SRES (d'après S. Planton) (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2013, p. 7)	16
Figure 14 : Les cinq SSP types, répartis selon le défi socio-économique pour l'adaptation et pour l'adaptation (Nigel, et al., 2013) (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2013, p. 9)	17
Figure 15 : Logo Meteonorm (Meteotest, 2016)	23
Figure 16 : Logo DesignBuilder (DesignBuilder, 2016)	24
Figure 17 : Logo EnergyPlus (DesignBuilder, 2016)	25
Figure 18 : Maison Kettenis à Eupen (Google, 2016).....	26
Figure 19 : Plan du rez-de-chaussée et du premier étage de la maison Kettenis (Région Wallone, 2004).....	26
Figure 20 : Meteonorm - Climat actuel	27
Figure 21 : Meteonorm - Climat futur A1B	28
Figure 22 : Meteonorm - Climat futur A2	29

Figure 23 : Meteonorm - Climat futur B1	30
Figure 24 : Meteonorm - Création d'un nouveau site.....	34
Figure 25 : Meteonorm - Choix du climat.....	34
Figure 26 : Meteonorm - Choix du format de sortie des données	35
Figure 27 : Meteonorm - Aperçu des données météorologiques.....	35
Figure 28 : DesignBuilder - Ajout d'un nouveau climat.....	36
Figure 29 : DesignBuilder - Vue 3D Nord	37
Figure 30 : DesignBuilder - Vue 3D Sud-Ouest.....	37
Figure 31 : Schéma illustrant le problème rencontré à la création de fenêtre sur DesignBuilder	37
Figure 32 : DesignBuilder - Zone Garage.....	38
Figure 33 : DesignBuilder - Zones RDC	38
Figure 34 : DesignBuilder - Zones R+1	39
Figure 35 : DesignBuilder - Construction - Etanchéité à l'air	40
Figure 36 : DesignBuilder - Construction - Murs Extérieurs - Composition	41
Figure 37 : DesignBuilder - Construction - Murs Extérieurs – Illustration	41
Figure 38 : DesignBuilder - Construction - Murs Extérieurs - Coefficient de transmission thermique (U) de la paroi.....	41
Figure 39 : DesignBuilder - Construction – Mur de séparation avec le Garage - Composition.....	42
Figure 40 : DesignBuilder - Construction – Mur de séparation avec le Garage – Illustration	42
Figure 41 : DesignBuilder - Construction – Mur de séparation avec le Garage - Coefficient de transmission thermique (U) de la paroi.....	42
Figure 42 : DesignBuilder - Construction - Murs Intérieurs - Composition	43
Figure 43 : DesignBuilder - Construction - Murs Intérieurs – Illustration	43
Figure 44 : DesignBuilder - Construction - Murs Intérieurs - Coefficient de transmission thermique (U) de la paroi	43
Figure 45 : DesignBuilder - Construction - Murs Ouverts	43
Figure 46 : DesignBuilder - Construction - Toiture – Compositions.....	44
Figure 47 : DesignBuilder - Construction - Toiture – Illustration	44
Figure 48 : DesignBuilder - Construction - Toiture - Coefficient de transmission thermique (U) de la paroi	44
Figure 49 : DesignBuilder - Construction – Plancher intérieur - Compositions.....	45
Figure 50 : DesignBuilder - Construction – Sol intérieur - Illustration	45
Figure 51 : DesignBuilder - Construction – Sol intérieur - Coefficient de transmission thermique (U) de la paroi	45
Figure 52 : DesignBuilder - Construction – Plancher RDC – Compositions	46
Figure 53 : DesignBuilder - Construction – Plancher RDC – Illustration	46
Figure 54 : DesignBuilder - Construction – Plancher RDC - Coefficient de transmission thermique (U) de la paroi	46
Figure 55 : DesignBuilder - Openings - Vitrage - Paramètres	47
Figure 56 : DesignBuilder - Openings - Vitrage – Ombrage	47
Figure 57 : DesignBuilder - Openings - Portes extérieures - Paramètres	48
Figure 58 : DesignBuilder - Openings - Porte Garage - Paramètres	48

Figure 59 : DesignBuilder - Activity - Garage	49
Figure 60 : DesignBuilder - Activity - Planning Garage	50
Figure 61 : DesignBuilder - Activity – Entrée	51
Figure 62 : DesignBuilder - Activity - Planning Entrée.....	51
Figure 63 : DesignBuilder - Activity - Toilettes.....	52
Figure 64 : DesignBuilder - Activity - Planning Toilettes.....	52
Figure 65 : DesignBuilder - Activity - Cuisine	53
Figure 66 : DesignBuilder - Activity - Planning Cuisine	54
Figure 67 : DesignBuilder - Activity - Planning Cuisine Semaine	54
Figure 68 : DesignBuilder - Activity - Planning Cuisine Week-End.....	54
Figure 69 : DesignBuilder - Activity - Salle à Manger	55
Figure 70 : DesignBuilder - Activity - Salon	56
Figure 71 : DesignBuilder - Activity - Planning Salon	57
Figure 72 : DesignBuilder - Activity - Planning Salon Semaine	57
Figure 73 : DesignBuilder - Activity - Planning Salon Week-end.....	57
Figure 74 : DesignBuilder - Activity - Locaux Techniques	58
Figure 75 : DesignBuilder - Activity - Planning Locaux Techniques	58
Figure 76 : DesignBuilder - Activity - Circulations.....	59
Figure 77 : DesignBuilder - Activity - Planning Circulations.....	59
Figure 78 : DesignBuilder - Activity - Salle de Bain	60
Figure 79 : DesignBuilder - Activity - Planning Salle de Bain	60
Figure 80 : DesignBuilder - Activity - Chambres.....	61
Figure 81 : DesignBuilder - Activity - Planning Chambres.....	61
Figure 82 : DesignBuilder - Activity - Planning Chambres Semaine.....	62
Figure 83 : DesignBuilder - Activity - Planning Chambres Week-End	62
Figure 84 : DesignBuilder - Lighting - Planning Chambres.....	63
Figure 85 : DesignBuilder - Lighting - Planning Chambres Semaine	63
Figure 86 : DesignBuilder - Lighting - Planning Chambres Week-End.....	63
Figure 87 : DesignBuilder - HVAC - Ventilation mécanique	64
Figure 88 : DesignBuilder - HVAC - Planning Ventilation mécanique	64
Figure 89 : DesignBuilder - HVAC - Chauffage et Refroidissement	65
Figure 90 : DesignBuilder - HVAC - Planning Chauffage	65
Figure 91 : DesignBuilder - HVAC - Ventilation naturelle	66
Figure 92 : DesignBuilder - HVAC - Planning Ventilation naturelle	66
Figure 93 : DesignBuilder - HVAC - Puits canadien	67
Figure 94 : DesignBuilder - HVAC - Planning Puits canadien	67
Figure 95 : Schéma de principe d'un puits canadien (Meester, 2008, p. 42).....	68
Figure 96 : DesignBuilder - Options - Température opérative	73
Figure 97 : DesignBuilder - Scénario H1 – Consignes	74
Figure 98 : Scénario H1 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur A1B	75
Figure 99 : Scénario H1 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur A2.....	75
Figure 100 : Scénario H1 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur B1	76

Figure 101 : Scénario H1 – Nombre d'heures de surchauffe dans l'année	76
Figure 102 : Scénario H1 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur A1B	77
Figure 103 : Scénario H1 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur A2.....	78
Figure 104 : Scénario H1 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur B1.....	78
Figure 105 : Scénario H1 - Consommation énergétique en chauffage totale dans l'année	79
Figure 106 : Scénario H1 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur A1B.....	79
Figure 107 : Scénario H1 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur A2	80
Figure 108 : Scénario H1 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur B1	81
Figure 109 : Scénario H1 - Consommation énergétique totale dans l'année	81
Figure 110 : DesignBuilder - Scénario H2 - Consignes	82
Figure 111 : Scénario H2 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur A1B.....	83
Figure 112 : Scénario H2 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur A2	83
Figure 113 : Scénario H2 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur B1	84
Figure 114 : Scénario H2 – Nombre d'heures de surchauffe dans l'année	84
Figure 115 : Scénario H2 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur A1B	85
Figure 116 : Scénario H2 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur A2.....	86
Figure 117 : Scénario H2 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur B1.....	86
Figure 118 : Scénario H2 - Consommation énergétique en chauffage totale dans l'année	87
Figure 119 : Scénario H2 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur A1B.....	88
Figure 120 : Scénario H2 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur A2	88
Figure 121 : Scénario H2 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur B1	89
Figure 122 : Scénario H2 - Consommation énergétique totale dans l'année	89
Figure 123 : DesignBuilder - Scénario H3 - Consignes	90
Figure 124 : Scénario H3 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur A1B.....	91
Figure 125 : Scénario H3 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur A2	91

Figure 126 : Scénario H3 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur B1	92
Figure 127 : Scénario H3 – Nombre d'heures de surchauffe dans l'année	92
Figure 128 : Scénario H3 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur A1B	93
Figure 129 : Scénario H3 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur A2.....	94
Figure 130 : Scénario H3 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur B1.....	94
Figure 131 : Scénario H3 - Consommation énergétique en chauffage totale dans l'année	95
Figure 132 : Scénario H3 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur A1B.....	96
Figure 133 : Scénario H3 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur A2	96
Figure 134 : Scénario H3 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur B1	97
Figure 135 : Scénario H3 - Consommation énergétique totale dans l'année	97
Figure 136 : Comparaison des données de température obtenues par Meteonorm et par le Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie de l'ULG.....	101
Figure 137 : Scénario H2 - Solution S1 Protections solaires - Surchauffe	104
Figure 138 Scénario H2 - Solution S1 Protections solaires - Chauffage	104
Figure 139 : DesignBuilder – Solution S2 Climatisation - HVAC - Planning Climatisation	106
Figure 140 Scénario H2 - Solution S2 Climatisation - Surchauffe	106
Figure 141 Scénario H2 - Solution S2 Climatisation - Energie totale	107

Table des tableaux

Tableau 1 : Les standards de la maison passive - Chaleur (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	5
Tableau 2 : Les standards de la maison passive - Energie totale (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	6
Tableau 3 : Les standards de la maison passive - Energie primaire (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	6
Tableau 4 : Les standards de la maison passive - L'énergie solaire (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	6
Tableau 5 : Les standards de la maison passive - Les vitrages performants (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	7
Tableau 6 : Les standards de la maison passive - Les fenêtres très isolantes (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	7
Tableau 7 : Les standards de la maison passive - Enveloppe (parties opaques) (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	7
Tableau 8 : Les standards de la maison passive - Raccords (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	8
Tableau 9 : Les standards de la maison passive - Etanchéité à l'air (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	8
Tableau 10 : Les standards de la maison passive - Ventilation (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	8
Tableau 11 : Les standards de la maison passive - Récupération de chaleur (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	9
Tableau 12 : Les standards de la maison passive - Echangeur air/sol (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	9
Tableau 13 : Les standards de la maison passive - Electricité (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	9
Tableau 14 : Les standards de la maison passive - Besoins d'énergie supplémentaire (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)	9
Tableau 15 : caractéristiques principales des RCP (Moss et al., 2010) (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2013, p. 7)	16
Tableau 16 : Relations entre RCP et SSP (d'après Kram, T.) (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2013, p. 10)	17
Tableau 17 : Etudes similaires - Bilan	21
Tableau 18 : Norme NBN EN15251 – Catégories (DGO4, 2014)	32
Tableau 19 : Norme NBN EN 15251 - Températures intérieures recommandées pour chaque catégorie (DGO4, 2014).....	32
Tableau 20 : Norme NBN EN 15251 - Humidités relatives intérieures recommandées pour chaque catégorie (DGO4, 2014)	33
Tableau 21 : Calibration du Modèle - 2e Essai.....	69
Tableau 22 : Calibration - 3e Essai.....	70
Tableau 23 : Calibration - Modèle final	70

Chapitre 1 : Introduction

Le début du vingt et unième siècle montre les premiers stigmates des comportements humains sur l'environnement. Ainsi, l'évolution exponentielle de la consommation énergétique de ces dernières années (Figure 1) est au cœur des préoccupations mondiales. Aujourd'hui, dans le domaine de l'habitat, la « maison passive » constitue l'une des solutions d'économie d'énergie mises en œuvre.

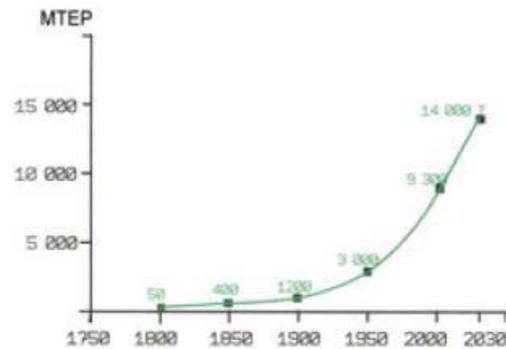


Figure 1 : Evolution de la consommation mondiale annuelle d'énergie primaire (Guerriat, Contexte Général, 2008)
(MTEP : Méga Tonne d'Equivalent Pétrole ; 1 TEP = 11630 kWh)

La maison passive se définit principalement par une demande annuelle globale en énergie inférieure à 42 kWh/m².an (chauffage, ventilation, eau chaude, applications domestiques, etc.) dont une demande annuelle en chauffage ne dépassant pas 15 kWh/m².an (Meester, 2008).

Pour répondre à ces critères, une maison passive se caractérise par une forte étanchéité à l'air ainsi qu'une très bonne isolation, dans le but de limiter au maximum les déperditions énergétiques. Cependant, ces deux éléments combinés peuvent être à l'origine de problèmes de surchauffe en été. C'est pourquoi un critère supplémentaire a été ajouté à la définition de la maison passive, à savoir une limitation de la surchauffe à 5% par an (PMP asbl, 2013).

Or si les maisons passives construites aujourd'hui respectent bien ces critères, qu'en sera-t-il dans les années à venir, la question se pose. Depuis déjà quelques années, nous observons une prise de conscience collective de l'incidence que les actions de l'homme, sa manière de vivre, sont à l'origine d'un réchauffement climatique avéré et sans précédent (d'après les données mesurables par l'homme du moins). Or, d'après le Cinquième Rapport d'Evaluation (2014) du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, nom français de l'IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change), une des conséquences de ce réchauffement climatique à l'échelle planétaire devrait être une élévation des températures moyennes de quelques degrés ainsi qu'une augmentation de la fréquence de vagues de fortes chaleurs.

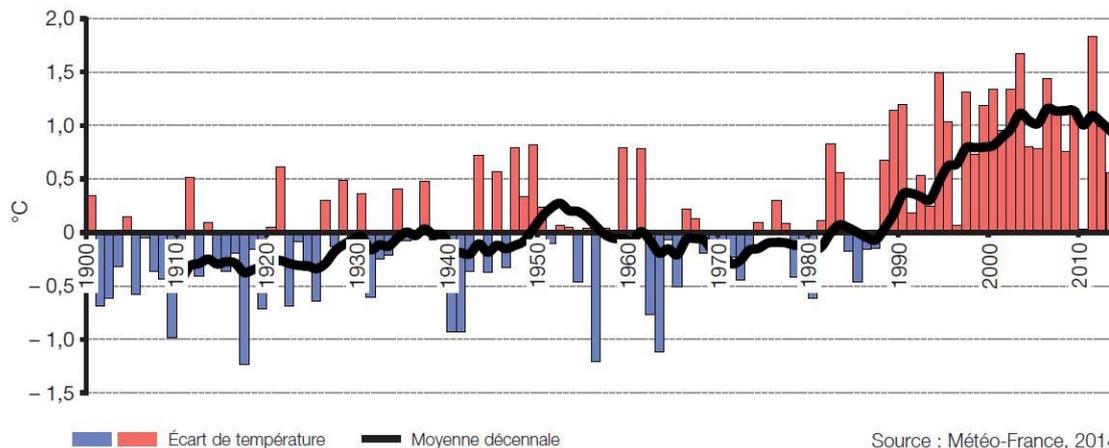


Figure 2 : Évolution des températures moyennes en France de 1900 à 2013 par rapport à la période de référence 1961-1990 (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2015)

Quel sera alors l'impact de ce réchauffement climatique sur les maisons passives, que ce soit en termes de consommation énergétique (qui est la raison d'être de ces maisons) ou en termes de confort thermique (notamment en ce qui concerne les surchauffes) ?

La tendance globale du réchauffement climatique (Figure 2) se traduit de différentes manières suivant les régions, voire les localités observées. Dans cette étude, nous nous intéresserons plus particulièrement à son impact en Belgique.

La méthodologie élaborée dans cette étude sera transposable à d'autres habitations, d'autres pays et permettra de donner une réalité plus tangible de l'impact du réchauffement climatique dans le monde.

Ce travail a pour objectif de comprendre l'impact du réchauffement climatique sur une habitation dite « passive » en Belgique (au niveau thermique) et de proposer, face aux résultats obtenus, des recommandations qui pourront être approfondies dans un travail ultérieur. Ce projet est destiné aux ingénieurs en construction, aux ingénieurs architectes, aux architectes et à tout autre chercheur s'intéressant à ce sujet. Couvrant plusieurs domaines, le climat et l'habitat, il a impliqué la participation de météorologues et d'ingénieurs architectes. Il a vocation à servir de base pour des recherches futures orientées :

- sur la rénovation de bâtiments existants pour mieux les adapter au réchauffement climatique en Belgique
- ou sur la conception de bâtiments neufs adaptés au réchauffement climatique en Belgique.

La présentation de cette étude s'articule autour de différents chapitres (Figure 3).

Pour commencer, une « Introduction » en situe l'objet. Vient ensuite l'« Etat de l'Art » dans lequel définitions, prévisions et avancement de la recherche en la matière sont développés. Nous y trouvons la description du concept de maison passive, ce qu'est le changement climatique, ses scénarios futurs et leurs conséquences, à l'échelle mondiale, puis au niveau de la Belgique mais aussi les résultats des recherches réalisées pouvant aider à comprendre l'influence du changement climatique sur l'habitat.

Le chapitre suivant, « Méthodologie », est consacré à l'étude de cas à proprement parler. Y sont présentés les différents éléments exploités, à savoir : les logiciels utilisés, les modèles climatiques choisis, le modèle de bâtiment retenu et son contexte, le modèle de confort intérieur. Ensuite, sont expliqués les hypothèses et paramètres considérés pour chacun des deux logiciels avant d'illustrer l'utilisation qui en est faite.

Les « Résultats Obtenus » et leur analyse se retrouvent dans le chapitre 4.

Dans la première partie, nous étudions l'hypothèse dans laquelle les consignes thermiques appliquées à l'habitat correspondent à une occupation par des personnes particulièrement sensibles aux températures (enfants en bas âge, personnes âgées, ...). Dans la deuxième partie, nous étudions l'hypothèse dans laquelle les consignes thermiques appliquées à l'habitat visent un niveau de confort moyen correspondant à celui exigé pour des bâtiments neufs. Dans la troisième partie, nous étudions l'hypothèse dans laquelle les consignes thermiques appliquées à l'habitat visent un niveau de confort considéré comme acceptable pour des bâtiments existants. Pour chacune de ces hypothèses, nous observons à la fois l'impact du réchauffement climatique sur la consommation énergétique et le confort thermique des habitants.

S'en suit alors une partie de « Discussion » à propos de ces résultats afin d'appréhender les conséquences de ceux-ci et d'envisager quelques solutions et leur effet.

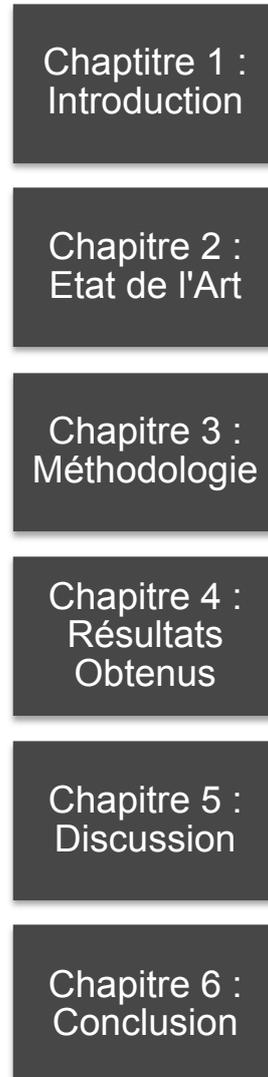


Figure 3 : Plan du Rapport

Chapitre 2 : Etat de l'art

Dans ce chapitre, je définis les éléments clés de cette étude, nécessaires à sa compréhension : la maison passive et les scénarios de changement climatique.

J'y fais également le bilan des études ayant déjà été réalisées sur des sujets similaires et de leurs limites.

1) Maison Passive

Ce que l'on appelle communément « maison passive » correspond en fait à un standard de construction. C'est l'étape intermédiaire entre une maison « basse énergie » et une maison « zéro énergie ». Ces constructions dites « passives » combinent deux objectifs principaux : le premier de confort, avec l'idée d'assurer une ambiance confortable tant en hiver qu'en été, le second de consommation énergétique (Guerriat, Introduction, 2008). Ce standard « bâtiment passif » peut être atteint en combinant de manière optimale technologies, conception et matériaux (Figure 4).

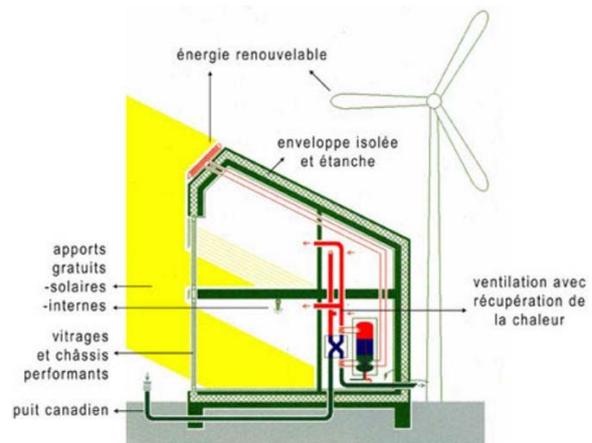


Figure 4 : Schéma type d'une maison passive (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

a) Consommation d'énergie

En ce qui concerne la consommation énergétique, la norme recommande de respecter trois critères :

- Les besoins en énergie de chauffage doivent rester inférieurs ou égaux à 15 kWh/m².an (Tableau 1) ;

Tableau 1 : Les standards de la maison passive - Chaleur (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Minimiser la consommation d'énergie utilisée pour le chauffage
Norme	Besoin en énergie de chauffage ≤ à 15 kWh/m ² .an

- Les besoins en énergie totale (chauffage, ventilation, eau chaude, applications domestiques, etc.) doivent rester inférieurs ou égaux à 42 kWh/m².an (Tableau 2) ;

Tableau 2 : Les standards de la maison passive - Energie totale (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Minimiser la consommation totale d'énergie utilisée dans la maison (chauffage, ventilation, eau chaude, électroménager, etc.)
Recommandation	Besoin en énergie totale ≤ à 42 kWh/m ² .an

- Les besoins en énergie primaire doivent rester inférieurs ou égaux à 120 kWh/m².an (Tableau 3). « L'énergie primaire est l'ensemble des produits énergétiques non transformés, exploités directement ou importés. Ce sont principalement le pétrole brut, les schistes bitumineux, le gaz naturel, les combustibles minéraux solides, la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie du vent, la géothermie et l'énergie tirée de la fission de l'uranium. » (INSEE, 2002)

Tableau 3 : Les standards de la maison passive - Energie primaire (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Minimiser la consommation d'énergie primaire utilisée dans la maison (choisir efficacement le type d'énergie utilisée)
Recommandation	Besoin en énergie primaire ≤ à 120 kWh/m ² . an

b) Energie solaire

Afin de maximiser les gains solaires en termes de chaleur, l'orientation des pièces est déterminante. L'orientation sud est donc recommandée pour capter un maximum de chaleur. L'objectif est de compenser ainsi 40% de la chaleur perdue par l'habitation.

Cependant, cet apport en chaleur doit être minutieusement ajusté afin de ne pas générer de surchauffe en été. La mise en place de protections solaires est indispensable pour éviter ce problème (Tableau 4).

Tableau 4 : Les standards de la maison passive - L'énergie solaire (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Orientation sud si possible pour capter un maximum de chaleur gratuite
Recommandation	Environ 40% de la chaleur nécessaire pour compenser les pertes de l'habitation

Afin de limiter au maximum les pertes au travers des vitrages, ceux-ci se doivent d'être performants. La norme précise que le coefficient de transmission thermique U doit être inférieur ou égal à 0,8 W/m².K (Tableau 5). Pour répondre à ce critère, le triple vitrage est souvent employé.

La norme précise également que le facteur de transmission du vitrage g doit être supérieur à 50% pour que les gains obtenus au travers de la fenêtre soient supérieurs aux pertes générées par celle-ci.

Tableau 5 : Les standards de la maison passive - Les vitrages performants (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Triple vitrage Low-e ou équivalent
Norme	Coefficient U vitrage ≤ à 0,8 W/m ² K Facteur de transmission (g) > 50% pour que les gains via la fenêtre soient plus importants que les pertes

Les châssis, eux aussi, doivent être très bien isolés en évitant les ponts thermiques. Comme pour les vitrages, la norme exige un coefficient de transmission thermique U inférieur ou égal à 0,8 W/m².K (Tableau 6).

Tableau 6 : Les standards de la maison passive - Les fenêtres très isolantes (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Châssis parfaitement isolés (éviter les ponts thermiques)
Norme	Coefficient U châssis ≤ à 0,8 W/m ² K

c) Isolation

L'objectif étant de se passer d'un système conventionnel de chauffage, l'isolation devra être extrêmement efficace. La norme recommande ainsi 30cm d'isolation dans les murs, 40cm dans la toiture et 20cm dans les planchers (Tableau 7).

De plus, la norme préconise un coefficient de transmission thermique U inférieur ou égal à 0,11 W/m².K et elle exige que celui-ci ne dépasse pas 0,15W/m².K.

Tableau 7 : Les standards de la maison passive - Enveloppe (parties opaques) (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Isolation extrêmement efficace pour pouvoir se passer d'un système conventionnel de chauffage (épaisseur d'isolation : 30cm dans le mur, 40cm dans le toit et 20cm dans le plancher)
Norme	Coefficient U ≤ à 0,15 W/m ² K
Recommandation	Coefficient U ≤ à 0,11 W/m ² K

Pour éviter les pertes, l'isolation doit être continue. Cela signifie qu'il ne doit pas y avoir de ponts thermiques.

La norme précise également que le coefficient de transmission linéaire γ doit être inférieur ou égal à 0,01 W/m.K (Tableau 8).

Tableau 8 : Les standards de la maison passive - Raccords (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Pas de pont thermique
Norme	Coefficient de transmission linéaire $\gamma \leq 0,01$ W/mK

Toujours dans cette optique de limiter les pertes thermiques, l'enveloppe doit être étanche. Cela se traduit par un renouvellement d'air inférieur à $0,6 \text{ h}^{-1}$ sous une différence de pression de 50 Pa (Tableau 9). Cette valeur peut être mesurée lors d'un test « Blowerdoor ».

Tableau 9 : Les standards de la maison passive - Etanchéité à l'air (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Enveloppe étanche (20 x plus hermétique que la moyenne belge) Utilisation de portes hermétiques et/ou de sas.
Norme	Renouvellement de l'air pour $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$ selon NBN EN 13829

d) Ventilation

En ce qui concerne la ventilation, la norme exige une ventilation mécanique contrôlée, c'est-à-dire un système D (Tableau 10), avec pulsion d'air dans les espaces de vie et extraction dans les espaces sanitaires. Le système doit ventiler $30 \text{ m}^3/\text{h}$ par personne.

Tableau 10 : Les standards de la maison passive - Ventilation (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Ventilation mécanique contrôlée (système D). Pulsion d'air dans les espaces de vie (séjours, chambres, etc.), extraction dans les espaces sanitaires (locaux "humides")
Norme	30 m^3 par heure et par personne
Recommandation	Réglage en fonction de pollution de l'air

Afin de limiter les pertes thermiques au travers de la ventilation, celle-ci est équipée d'un récupérateur de chaleur. La norme précise que le rendement effectif de celui-ci doit être supérieur à 80% (Tableau 11).

Tableau 11 : Les standards de la maison passive - Récupération de chaleur (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Echangeur air/air : récupération de la chaleur de l'air vicié sans contact entre les deux flux
Norme	Rendement effectif de plus de 80%

La mise en place d'un échangeur air/sol est également fortement recommandée (Tableau 12). En effet, celui-ci permet un apport de chaleur en hiver et un apport d'air frais en été.

Tableau 12 : Les standards de la maison passive - Echangeur air/sol (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Préchauffage de l'air frais les jours très froids et refroidissement passif de l'air frais les jours très chauds via un puits canadien
Norme	Température de l'air neuf > 0°C
Recommandation	Gain de température (ΔT) > 8°C

e) Electricité

En dehors de la consommation énergétique liée au confort thermique, il est aussi recommandé de choisir des appareils électroménagers efficaces (Tableau 13) afin de diminuer la consommation électrique du bâtiment. L'utilisation d'ampoules économiques est également préconisée.

Tableau 13 : Les standards de la maison passive - Electricité (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Utilisation d'appareils électroménagers efficaces, d'ampoules économiques etc. Il est possible de réduire de 50% la consommation d'électricité sans perte de confort.
----------	---

f) Besoins d'énergie supplémentaire

Enfin, les besoins en énergie ayant été fortement diminués, il est possible d'utiliser des énergies renouvelables pour les alimenter (Tableau 14).

Tableau 14 : Les standards de la maison passive - Besoins d'énergie supplémentaire (Guerriat, Les standards de la maison passive, 2008)

Principe	Utilisation d'énergies renouvelables puisque peu d'énergie est finalement nécessaire
----------	--

2) Réchauffement climatiques et scénarios futurs

a) Réchauffement climatique

« Le réchauffement du système climatique est sans équivoque, et depuis les années 1950, la plupart des changements observés sont sans précédent depuis des décennies à des millénaires. L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, les quantités de neige et de glace ont diminué, et le niveau de la mer a augmenté.» (GIEC, 2014, p. 4)

D'après les études réalisées par le GIEC (2014), sur la période de 1880 à 2012, « la moyenne globale combinant des données de température de surface des terres et des océans montre [...] un réchauffement de 0,85 °C » (GIEC, 2014, p. 4). Autrement dit, qu'il s'agisse de la température de surface des terres ou des océans, on observe une augmentation moyenne de 0,85°C. Ce résultat a été confirmé à l'aide d'ensembles de données produits de manières indépendantes.

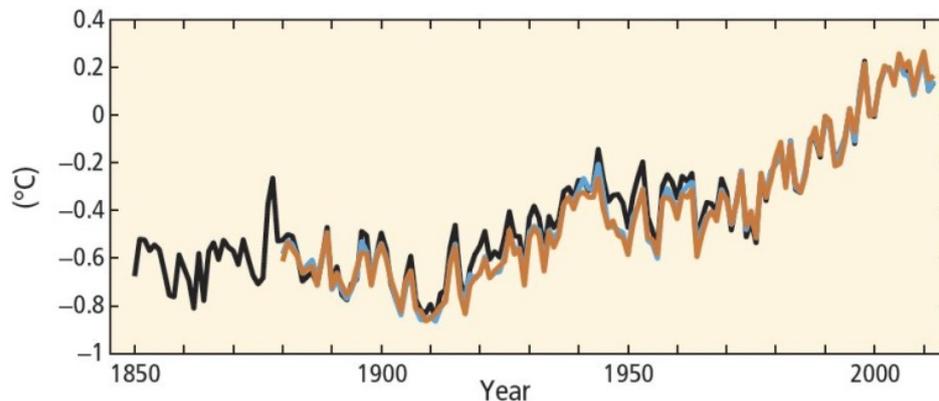


Figure 5 : Anomalies des températures moyennes annuelles combinées des surfaces terrestres et maritimes par rapport à la moyenne sur la période de 1886 à 2005 (GIEC, 2014, p. 6)

Sur le graphe ci-dessus (Figure 5), les couleurs indiquent les différentes sources de données (celles-ci ne sont cependant pas spécifiées).

En plus de cette élévation globale des températures, les groupes d'étude du GIEC ont également constaté une altération de la distribution des précipitations (Figure 6). Celle-ci se traduit entre autre par une augmentation des précipitations depuis 1901 sur les zones terrestres de latitudes moyennes de l'hémisphère Nord.

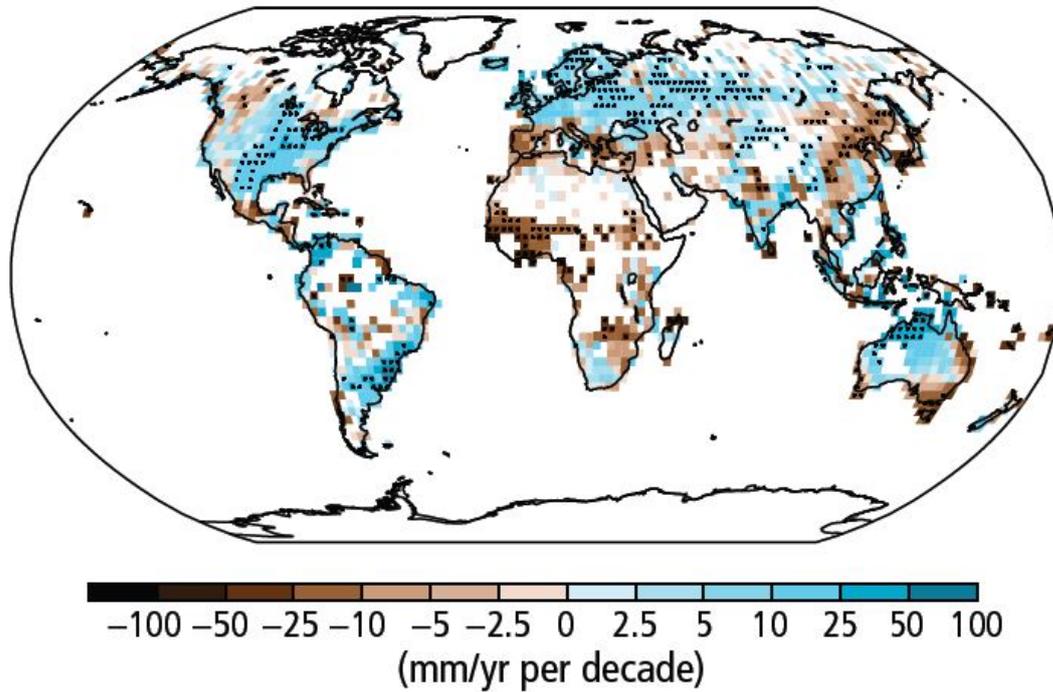


Figure 6 : Evolution des précipitations observées de 1951 à 2010 dans le monde (IPCC, 2014, p. 41)

Si l'on s'intéresse plus particulièrement aux changements constatés sur le climat en Belgique, on y constate également une augmentation de la température moyenne annuelle (IRM (Institut Royal Météorologique de Belgique), 2015). En effet, la température moyenne annuelle relevée à Uccle est actuellement plus haute de presque 2,4°C que lors de la période préindustrielle (Flanders Environment Agency, 2015).

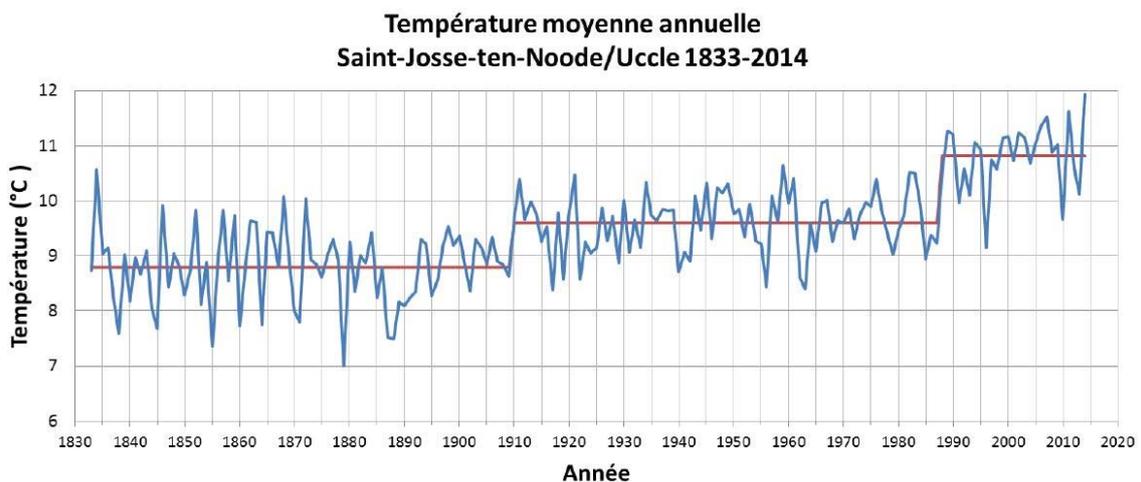


Figure 7 : Température moyenne annuelle (en °C) à Saint-Josse-ten-Noode/Uccle, sur la période 1833-2014 (IRM (Institut Royal Météorologique de Belgique), 2015, p. 7)

Les données climatiques présentées sur les Figure 7 et Figure 8 ont été relevées à Saint-Josse-ten-Noode de 1833 à 1886. Puis, suite au déménagement de la

station météorologique à Uccle en 1886, celles-ci y ont été relevées de 1886 à nos jours.

On remarque également une augmentation des précipitations (IRM (Institut Royal Météorologique de Belgique), 2015) : environ 13% de plus qu'en 1833 (début des mesures météorologiques) (Flanders Environment Agency, 2015).

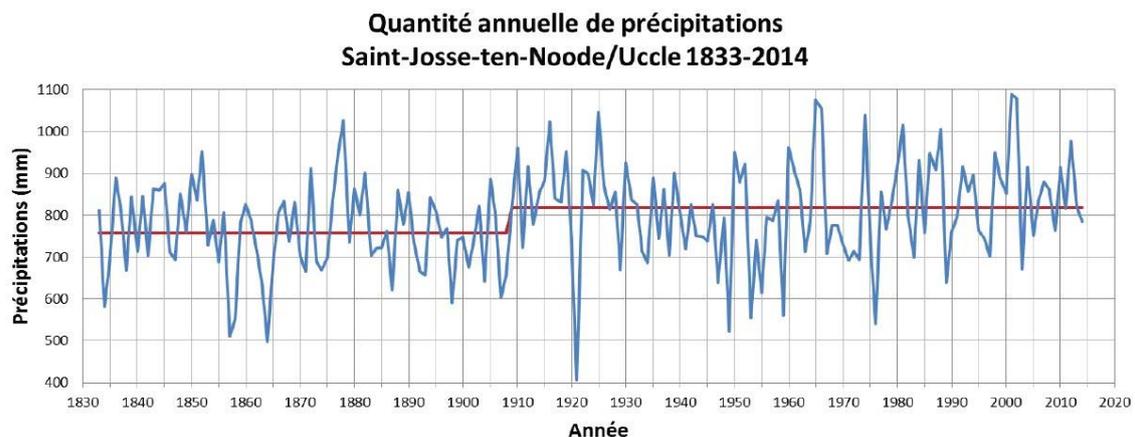


Figure 8 : Quantité annuelle de précipitations (en mm) à Saint-Josse-ten-Noode/Uccle, sur la période 1833-2014 (IRM (Institut Royal Météorologique de Belgique), 2015, p. 16)

b) Scénarios du réchauffement climatique futur

En 1995, une évaluation des scénarios de prévisions du changement climatique élaborés en 1990 a établi que ceux-ci devaient être revus car ils ne prenaient pas en compte un certain nombre de changements ayant eu lieu lors de ces quelques années (IPCC, Special Report on Emissions Scenarios, 2000). En 1996, le GIEC a donc décidé d'établir de nouveaux scénarios. Ces scénarios ont pour but de proposer des représentations de ce que le futur pourrait être. Ce sont des outils qui permettent d'analyser l'évolution d'un certains nombres de paramètres, de forces qui eux-mêmes vont influencer l'évolution des émissions de GES. En effet, « future greenhouse gas (GHG) emissions are the product of very complex dynamic systems, determined by driving forces such as demographic development, socio-economic development, and technological change » (IPCC, Special Report on Emissions Scenarios, 2000, p. 3). Ce qui signifie que les émissions de gaz à effet de serres (GES) futures sont le résultat de systèmes dynamiques très complexes, déterminés par des forces majeures telles que le développement démographique, le développement socio-économique, et le changement technologique.

Afin d'illustrer de manière cohérente les relations entre ces forces majeures et l'évolution des émissions des GES tout en ajoutant un contexte valable à ces évolutions, quatre scénarios narratifs ont été élaborés (Figure 9):

- Le scénario **A1** décrit un monde futur à la croissance économique très rapide, dans lequel la population mondiale atteint un pic vers 2050 avant de commencer à décroître et qui voit le développement rapide de nouvelles technologies plus efficaces. Ce scénario se divise en trois sous-scénarios suivant l'orientation énergétique choisie : un monde basée sur les énergies fossiles uniquement (**A1F1**), à l'opposé, un monde qui s'est totalement détaché des énergies fossiles (**A1T**) et enfin, un monde intermédiaire alliant énergies fossiles et autres (**A1B**) ;
- Le scénario **A2** décrit un monde très hétérogène. Les différents pays cherchent à maintenir leur identité et à ne dépendre que d'eux-mêmes. La population mondiale augmente de manière continue et les découvertes technologiques sont plus lentes et plus irrégulières que dans les autres scénarios.
- Le scénario **B1** décrit un monde similaire à celui du scénario A1 mais dans lequel les structures économiques vont rapidement évoluée vers une économie de services et de l'information, avec des réductions de l'intensité matérielle, et l'introduction de technologies propres et économes en ressources.
- Le scénario **B2** décrit un monde dans lequel l'accent est mis sur des solutions locales pour la viabilité économique, sociale et environnementale. La population augmente de manière continue mais à un rythme plus lent que dans le scénario A2. Les changements technologiques sont moins rapides mais plus variés que dans les scénarios B1 et A1.



Figure 9 : Construction des scénarios SRES (IPCC, Special Report on Emissions Scenarios, 2000, p. 4)

Il est intéressant de noter que certains pays ont utilisé leurs données statistiques régionales pour affiner ces scénarios localement. Ainsi, aux Pays Bas, le KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, c'est à dire l'Institut Royal Météorologique Néerlandais) a développé quatre scénarios (Figure 10) de changement

climatique (Hurk, et al., Sharpening the IPCC conclusions into New Climate Change Scenarios for The Netherlands, 2006).

G	Moderate*	1°C temperature rise on earth in 2050 compared to 1990 no change in air circulation patterns in Western Europe
G+	Moderate +	1°C temperature rise on earth in 2050 compared to 1990 + milder and wetter winters due to more westerly winds + warmer and drier summers due to more easterly winds
W	Warm	2°C temperature rise on earth in 2050 compared to 1990 no change in air circulation patterns in Western Europe
W+	Warm +	2°C temperature rise on earth in 2050 compared to 1990 + milder and wetter winters due to more westerly winds + warmer and drier summers due to more easterly winds

Figure 10 : Aperçu des quatre scénarios climatiques du KNMI'06 (Hurk, et al., Sharpening the IPCC conclusions into New Climate Change Scenarios for The Netherlands, 2006, p. 15)

Sur les graphes en Figure 11, nous pouvons voir les évolutions des précipitations et des températures relevées par les stations météorologiques locales ainsi que les scénarios développés par le KNMI.

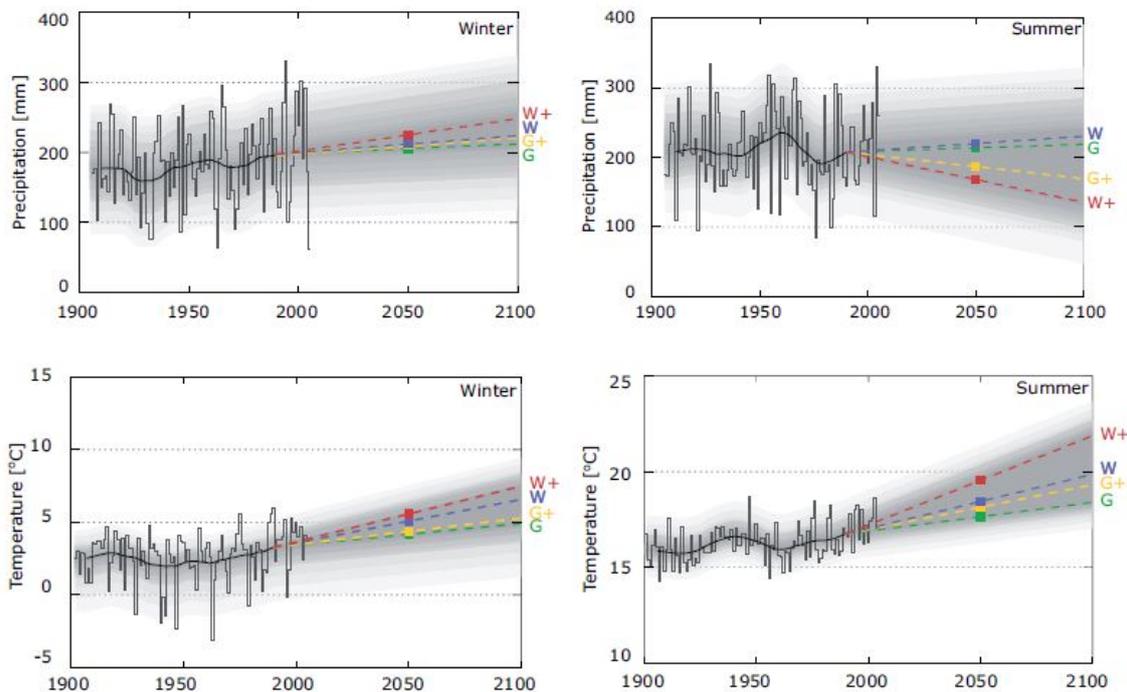


Figure 11 : Graphes représentant les précipitations (mm/3 mois ; en haut) et la température (°C ; en bas) observées ainsi que les scénarios climatiques en pointillés colorés, en hiver (à gauche) et en été (à droite) (Hurk, et al., KNMI climate change scenarios 2006 for the Netherlands, 2006, p. 63)

Sur ces graphes, l'hiver correspond aux données relevées aux mois de décembre à février ; l'été correspond aux mois de juin à août. L'ombrage de fond quant

à lui représente la variabilité interannuelle dérivée des observations sur tout le 20ème siècle.

Depuis la définition de ces scénarios SRES à la fin des années 1990 (et leur diffusion en 2000), le contexte socio-économique mondial a quelque peu évolué, que soit au niveau de l'économie, des technologies, des politiques publiques ou de la connaissance du système climatique (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2013). Par exemple, certaines politiques climatiques mises en place ces quinze dernières années doivent être prises en compte notamment au niveau de leur effet sur la réduction des émissions de gaz. Avec ces nouveaux éléments, il est devenu envisageable d'avoir des scénarios dans lesquels les émissions globales de gaz à effet de serre diminueraient au-delà du XXIe siècle. Cela implique notamment de prolonger certains scénarios au-delà de 2100.

De nouveaux scénarios ont donc été définis de manière différente des précédents. Auparavant, les scénarios étaient établis en suivant une logique séquentielle, fonctionnant avec « un faisceau de « futurs possibles » pour nos sociétés, intégrant une vaste palette de déterminants » (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2013, p. 6).

Pour les nouveaux scénarios, les scientifiques ont définis des « profils représentatifs d'évolution de concentration de gaz à effet de serre, d'ozone et de précurseurs des aérosols » (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2013, p. 6) : les RCP (Representative Concentration Pathways). Ces profils servent de référence pour produire en parallèle, d'un côté, des projections climatiques fournies par des climatologues, et de l'autre, des scénarios socio-économiques (SSP) élaborés par des sociologues et des économistes débouchant sur des évolutions en GES prévues par les RCP (Figure 12).

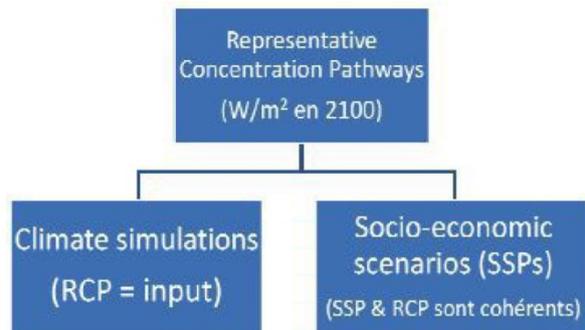


Figure 12 : Elaboration en parallèle des scénarios climatiques (d'après Noorwijkerhout) (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2013, p. 6)

Quatre profils RCP ont été sélectionnés (Tableau 15).

Tableau 15 : caractéristiques principales des RCP (Moss et al., 2010) (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2013, p. 7)

Nom	Forçage radiatif	Concentration de GES (ppm)	Trajectoire
RCP 8.5	>8,5Wm ⁻² en 2100	>1370eq-CO ₂ en 2100	croissante
RCP 6.0	~6Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~850eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 4.5	~4,5Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~660eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 2.6	Pic à ~3Wm ⁻² avant 2100 puis déclin	Pic à 490eq-CO ₂ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Le forçage radiatif est « le changement du bilan radiatif (rayonnement descendant moins rayonnement montant) au sommet de la troposphère (10 à 16 km d'altitude), dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat comme la concentration des gaz à effet de serre» (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2013, p. 7). Par exemple, en 2011, le forçage radiatif valait 2,84W/m².

Les quatre profils RCP sont des scénarios d'évolution du forçage radiatif sur la période de 2006 à 2300.

Si nous rapprochons ces nouveaux scénarios des anciens (Figure 13), on remarque que le RCP 8.5 est un peu plus fort que l'ancien SRES A2. Le RCP 6 est proche du SRES A1B et le RCP 4.5 du SRES B1. Le seul nouveau scénario sans équivalent est le RCP 2.6. En effet, celui-ci intègre l'effet des politiques environnementales et climatiques de réductions des émissions de GES dans l'optique de limiter le réchauffement planétaire à 2°C.

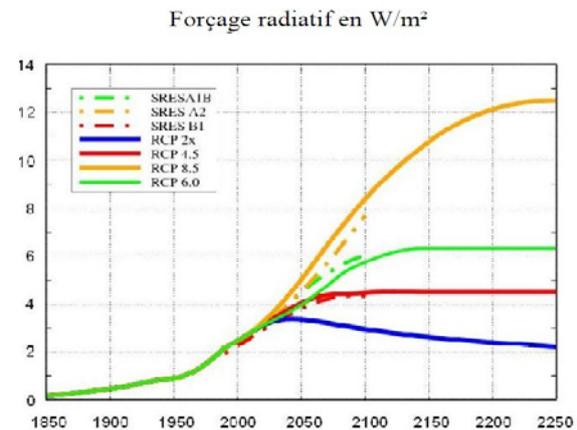


Figure 13 : RCP comparés aux SRES (d'après S. Planton) (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2013, p. 7)

Ces scénarios « graphiques » sont à croiser avec les scénarios socio-économiques élaborés en parallèle, les SSP. Ceux-ci forment cinq familles de scénarios-types (Figure 14).

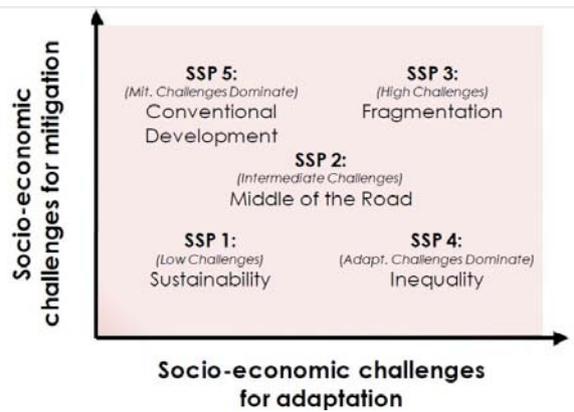


Figure 14 : Les cinq SSP types, répartis selon le défi socio-économique pour l'adaptation et pour l'atténuation (Nigel, et al., 2013) (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2013, p. 9)

- Le **SSP1** décrit un monde fonctionnant avec une forte coopération internationale et donnant la priorité au développement durable ;
- Le **SSP2** est un monde poursuivant les tendances observées actuellement ;
- Le **SSP3** représente un monde fragmenté, caractérisé par la compétition entre des pays centrés sur eux-mêmes (préoccupations sécuritaires et industrielles mais peu d'intérêt pour l'environnement) ;
- Le **SSP4** décrit un monde avec de grandes inégalités internationales et intra-nationales ;
- Le **SSP5** dépeint un monde avec un développement traditionnel et rapide des pays en voie de développement.

Ces familles de scénarios SSP sont compatibles avec certains, mais pas tous, des profils d'émission RCP. Par exemple, SSP3 et SSP5 ne sont pas compatibles avec le RCP 2.6 (Tableau 16), ce qui signifie que les mondes qu'ils décrivent ne permettent pas de limiter les émissions de GES à un bas niveau.

Tableau 16 : Relations entre RCP et SSP (d'après Kram, T.) (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2013, p. 10)

	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
RCP 8.5			X		
RCP 6.0		X	X	X	X
RCP 4.5	X	X	X	X	X
RCP 2.6	X	X		X	

3) Etudes Similaires

Certaines études liant le changement climatique et l'habitat ont déjà été réalisées. En voici quelques-unes.

Tout d'abord, dans sa thèse « *Adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique; Une feuille de route pour accompagner les architectes et les designers urbains québécois* », Catherine Dubois (2014) s'intéresse à l'influence du réchauffement climatique sur les habitations québécoises en milieu urbain.

En effet, ces habitations s'avèrent particulièrement vulnérables au changement climatique : conçues pour offrir un confort intérieur même en cas d'hiver très rigoureux, elles ne sont pas adaptées pour faire face à des températures élevées. Les matériaux utilisés ne permettent pas d'évacuer l'excédent de chaleur obtenu dans ces cas de figures.

De plus, ces habitations se trouvant en milieu urbain, l'effet du réchauffement climatique se trouve accentué par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Elle recherche alors des solutions pour aider les architectes et designers urbains à adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique.

De son côté, Anika Haak a réalisé une étude dans une région plus proche de celle qui nous intéresse. En effet, dans sa thèse « *Climate change and heat stress in residential buildings – Evaluation of adaptation measures* » (Haak, 2012), elle étudie l'impact du changement climatique et les contraintes thermiques qui en découlent sur des constructions situées aux Pays-Bas.

Cette étude est particulièrement intéressante en raison de la proximité géographique de la Belgique. Comme en Belgique, on observe aux Pays-Bas une augmentation des températures (Klein Tank & Lenderink, 2009). A partir de l'hypothèse que ce réchauffement climatique influencera le confort intérieur des habitats, la thèse d'Anika Haak propose une recherche de solutions pour réduire cet inconfort. Elle étudie ensuite l'impact de chacune des solutions proposées.

De même, dans leur étude « *Climate change consequences for the indoor environment* », Myriam Aries et Philomena Bluysen (2009) s'intéressent à l'impact du changement climatique sur l'environnement intérieur aux Pays-Bas.

Leur étude est cependant plutôt ciblée sur les conséquences en termes de santé des utilisateurs et non en termes de confort ou de consommation énergétique.

L'étude réalisée par Michael Holmes et Jacob Hacker, « Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century » (2007) est probablement celle qui est la plus proche de celle que nous souhaitons réalisée en termes de thèmes abordés: elle se concentre sur le lien entre le changement climatique, le confort intérieur et la consommation énergétique des bâtiments.

Dans cette étude, ils ont réalisé cinq cas d'étude : quatre modèles théoriques (une école et des bureaux) replacés dans le contexte climatique de la ville de Londres et un bâtiment réel qui sert de point de comparaison.

Enfin, d'autres articles comme ceux de David Coley et Tristan Kershaw (2010) ou de Cecily Maller et Yolande Strengers (2011), abordent l'étude de l'impact du changement climatique sur les habitations d'un point de vue des risques liés à des chaleurs trop importantes.

L'étude de David Coley et Tristan Kershaw (2010) considère les nombreux décès provoqués par la canicule connue par l'Europe en 2003 et analyse le réchauffement climatique dans l'optique de comprendre si ce genre de phénomène risque de se reproduire et de trouver des moyens de s'en protéger le cas échéant.

Celle de Cecily Maller et Yolande Strengers (2011) quant à elle, s'intéresse de manière générale aux épisodes de chaleur extrême et aux nombreux décès qu'ils engendrent. Cette étude vise à comprendre la vulnérabilité des populations vis-à-vis des chaleurs extrêmes dans le but de trouver des solutions pour la réduire.

En plus de ces études, des projets sont également menés pour étudier l'impact du changement climatique sur les villes, là où il est accentué par les phénomènes d'îlot de chaleur urbain.

Ainsi, le CNRM (Centre National de Recherche Météorologiques) a lancé le projet EPICEA (Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne) (2012) dans le cadre du programme de recherche « Paris 2030 ».

Ce projet vise à répondre principalement à quatre grandes questions : «

- Quels seront les effets locaux, sur une ville particulière, du changement climatique global ?

- Quel sera le microclimat dans une ville, éventuellement en expansion ?
- Quelle sera l'énergie nécessaire pour assurer le confort thermique des habitants ?
- Comment adapter la structure urbaine au changement climatique ? »

(CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques), 2012, p. 1)

De même, l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) mène le projet MUSCADE (Modélisation Urbaine et Stratégie d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Energétique) (2014) dans le cadre du programme « ville durable » de 2009.

Celui-ci s'intéresse plus aux problématiques liées à l'énergie qui pourraient apparaître suite au réchauffement climatique : « quelles mesures auront un effet significatif sur le climat urbain et la consommation d'énergie des bâtiments d'une ville [...] ? » (ANR (Agence Nationale de la Recherche), 2014, p. 3)

Le Tableau 17 reprend les principales caractéristiques de ces études. En particulier, leur localisation, leurs points forts et leurs limites. Il permet de se rendre compte que si certains points d'intérêt de cette étude ont déjà été abordés, ils n'ont pas encore été combinés dans un travail de recherche.

Tableau 17 : Etudes similaires - Bilan

Etudes	Pays	Points forts	Points faibles
« Adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique; Une feuille de route pour accompagner les architectes et les designers urbains québécois », Catherine Dubois (2014)	Canada	<ul style="list-style-type: none"> - Etude de l'impact du réchauffement climatique - Aide à la conception 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'étude à l'échelle de l'habitation - Climat différent de la Belgique
« Climate change and heat stress in residential buildings – Evaluation of adaptation measures », Anika Haak (2012)	Pays-Bas	<ul style="list-style-type: none"> - Etude de l'impact du réchauffement climatique - Notamment en termes de confort thermique - Proposition de solutions - Etude de l'impact de ces solutions - Climat proche de la Belgique 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'étude de l'impact sur la consommation énergétique
« Climate change consequences for the indoor environment », Myriam Aries et Philomena Bluysen (2009)	Pays-Bas	<ul style="list-style-type: none"> - Etude de l'impact du réchauffement climatique - Notamment sur la santé des utilisateurs - Climat proche de la Belgique 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'étude de l'impact sur le confort ou la consommation énergétique
« Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century », Michael Holmes et Jacob Hacker (2007)	Royaume-Uni	<ul style="list-style-type: none"> - Etude de l'impact du réchauffement climatique - Notamment en termes de confort thermique et de consommation énergétique - Utilisation de cinq cas d'étude 	<ul style="list-style-type: none"> - Climat différent de la Belgique
« EPICEA (Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne)», CNRM (Centre National de Recherche Météorologiques) (2012)	France	<ul style="list-style-type: none"> - Etude l'impact du changement climatique -Notamment sur une ville et son microclimat - Etude de l'énergie nécessaire pour maintenir le confort des habitants - Recherche de solutions pour adapter la structure urbaine - Climat proche de la Belgique 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'étude à l'échelle de l'habitation

Chapitre 3 : Méthodologie

Ce chapitre est consacré à l'étude de cas à proprement parler. Y sont présentés les différents éléments exploités, à savoir : les logiciels utilisés, les modèles climatiques choisis, le modèle de bâtiment retenu et son contexte, le modèle de confort intérieur. Ensuite, sont expliqués les hypothèses et paramètres considérés pour chacun des deux logiciels avant d'illustrer l'utilisation qui en est faite.

1) Présentation des principaux logiciels utilisés

a) Meteonorm



Figure 15 : Logo Meteonorm (Meteotest, 2016)

Meteonorm (Figure 15) est un logiciel qui donne accès à un catalogue de données météorologiques à tout endroit désiré dans le monde.

C'est un logiciel qui s'adresse aux ingénieurs, aux architectes, aux enseignants, aux planificateurs et à toute personne intéressée par l'énergie solaire et la climatologie. (Meteotest, 2014)

i. 8 300 stations météorologiques dans le monde entier

Une fois leur fiabilité vérifiée, de nombreuses bases de données mondiales et régionales ont été combinées.

Dans la version actuelle du logiciel, la plupart des données sont tirées du GEBA (Global Energy Balance Archive), des Normales Climatiques 1961-1990 de l'Organisation Mondiale Météorologique (OMM / WMO) et à partir de la base de données suisses compilée par MeteoSuisse.

ii. Importation de données

Meteonorm offre un système de téléchargement dynamique de données mensuelles actuelles (température et rayonnement) par internet (pour l'Europe les données sont disponibles à partir de 2007).

Les données actuelles sont facilement importées à partir d'Internet et affichées. Cela permet des calculs basés sur des ensembles de données réelles.

iii. Interpolations - données pour un site n'importe où dans le monde

En règle générale, les données de mesure ne peuvent être utilisées qu'à proximité d'une station météorologique.

Ailleurs les données doivent être interpolées entre les différentes stations. Les modèles d'interpolation internes au logiciel Meteororm permettent un calcul fiable du rayonnement solaire, de la température et d'autres paramètres pour n'importe quel site dans le monde.

iv. Exportation de données

Trente-six formats d'exportation prédéfinis sont disponibles. Ils couvrent la plupart des logiciels de simulation mis en place dans les applications de l'énergie solaire et la conception des bâtiments.

Tous les formats d'exportation sont disponibles aussi bien en valeurs horaires que mensuelles.

v. Limites du logiciel

Si la force de ce logiciel réside dans sa capacité d'interpolation pour obtenir des données en tout point du globe, c'est aussi là que réside une part de ses limites. En effet, au travers de ces interpolations, le logiciel incorpore des approximations aux données utilisées.

De plus, les scénarios futurs proposés par le logiciel ne sont pas à jour. Il s'agit des scénarios du 4^e Rapport du GIEC de 2000 et non de ceux du Rapport actuel, le 5^e, de 2013.

Dans le cadre de l'étude que je souhaite réaliser ici, ces deux points vont venir influencer sur la précision des résultats qui seront obtenus.

b) DesignBuilder - EnergyPlus

i. DesignBuilder



Figure 16 : Logo DesignBuilder (DesignBuilder, 2016)

J'ai choisi DesignBuilder (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) comme outil pour cette modélisation car ce logiciel est un produit mature qui offre une grande variété de géométries et de vastes bibliothèques de matériaux et profils de charge.

Les résultats de simulation peuvent être affichés et analysés efficacement et les l'ensemble des données de simulation sont disponibles.

DesignBuilder dispose de procédures de contrôle de qualité qui assurent la précision des résultats en comparaison du moteur EnergyPlus par exemple. Comme EnergyPlus, il a été testé dans le cadre de la méthode d'essai normalisée BESTEST / ASHRAE STD 140 (Méthode d'essai normalisée servant à évaluer des programmes d'analyse énergétique de bâtiments).

ii. Limites du logiciel

Le logiciel présente d'assez fortes limitations pour la modélisation de bâtiments à géométrie complexe (par exemple des géométries définies par des fonctions lisses / formes libres).

iii. EnergyPlus

EnergyPlus est intégré dans l'environnement DesignBuilder ce qui permet d'effectuer des simulations complètes sans quitter l'interface.

EnergyPlus (Figure 17) est la 3ème génération de moteur de simulation d'énergie de bâtiment dynamique pour modéliser des bâtiments, le chauffage, le rafraîchissement, l'éclairage, la ventilation et d'autres flux d'énergie produite par le Ministère de l'Énergie américain. (Harvard University - Graduate School of Design, 2009)



Figure 17 : Logo EnergyPlus (DesignBuilder, 2016)

Le programme a été développé au cours des années 1990. En dehors de la consommation d'énergie, il peut être utilisé pour les calculs de charge et la modélisation de ventilation naturelle, de systèmes photovoltaïques, de confort thermique, d'utilisation de l'eau, de toits verts et d'autres mesures de conservation de l'énergie.

De plus, EnergyPlus a été validé dans le cadre de la méthode d'essai normalisée BESTEST / ASHRAE STD 140.

Un certain nombre d'interfaces graphiques sont actuellement disponibles pour EnergyPlus. Parmi lesquelles nous trouvons Ecotect, Google Sketchup (Plug-in de Design Énergétique) et DesignBuilder orientés pour des utilisateurs travaillant entre autre sur de la conception.

2) Description du modèle de bâtiment choisi

Le bâtiment que j'ai choisi de modéliser est la maison Kettenis (Figure 18). C'est une maison passive conçue et construite par l'architecte Léo Michaelis pour la famille Johanns. C'est une maison unifamiliale située dans un lotissement proche d'Eupen. J'ai choisi cette maison car elle est passive, elle est située en Belgique, et elle a été modélisée dans le cadre d'un autre travail de fin d'étude (Meester, 2008) dans lequel une validation du modèle par monitoring (relevé de mesures) a été effectuée. Un extrait de ce travail se trouve en annexe avec notamment les différents paramètres du modèle.



Figure 18 : Maison Kettenis à Eupen (Google, 2016)

La maison Kettenis est une maison à quatre façades construite en ossature bois. Elle est implantée dans une orientation Nord-Sud. Les toitures présentent une pente de 35°.

Elle s'élève sur deux niveaux avec les espaces de jour (cuisine, salon, salle-à-manger) au rez-de-chaussée et ceux de nuit (chambres, salle de bain) à l'étage (Figure 19). Elle comporte également un garage en annexe.

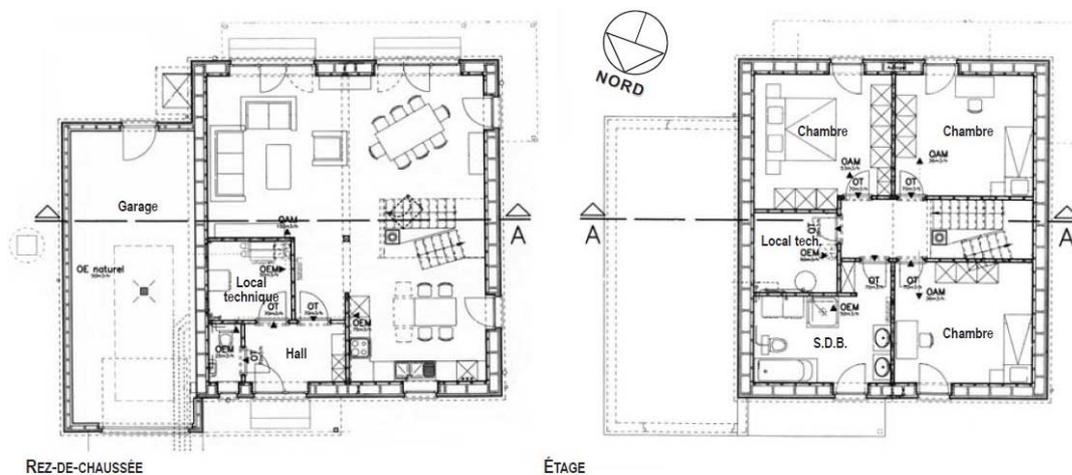


Figure 19 : Plan du rez-de-chaussée et du premier étage de la maison Kettenis (Région Wallone, 2004)

3) Détails des modèles climatiques

Les modèles climatiques décrits dans cette partie sont obtenus à partir du logiciel Meteonorm, lui-même produisant ces données à l'aide d'interpolation de données de stations météorologiques proche du site étudié.

a) Climat initial

Le climat initial (Figure 20) utilisé pour ma modélisation correspond aux données climatiques des années 2000 fournies par le logiciel Meteonorm.

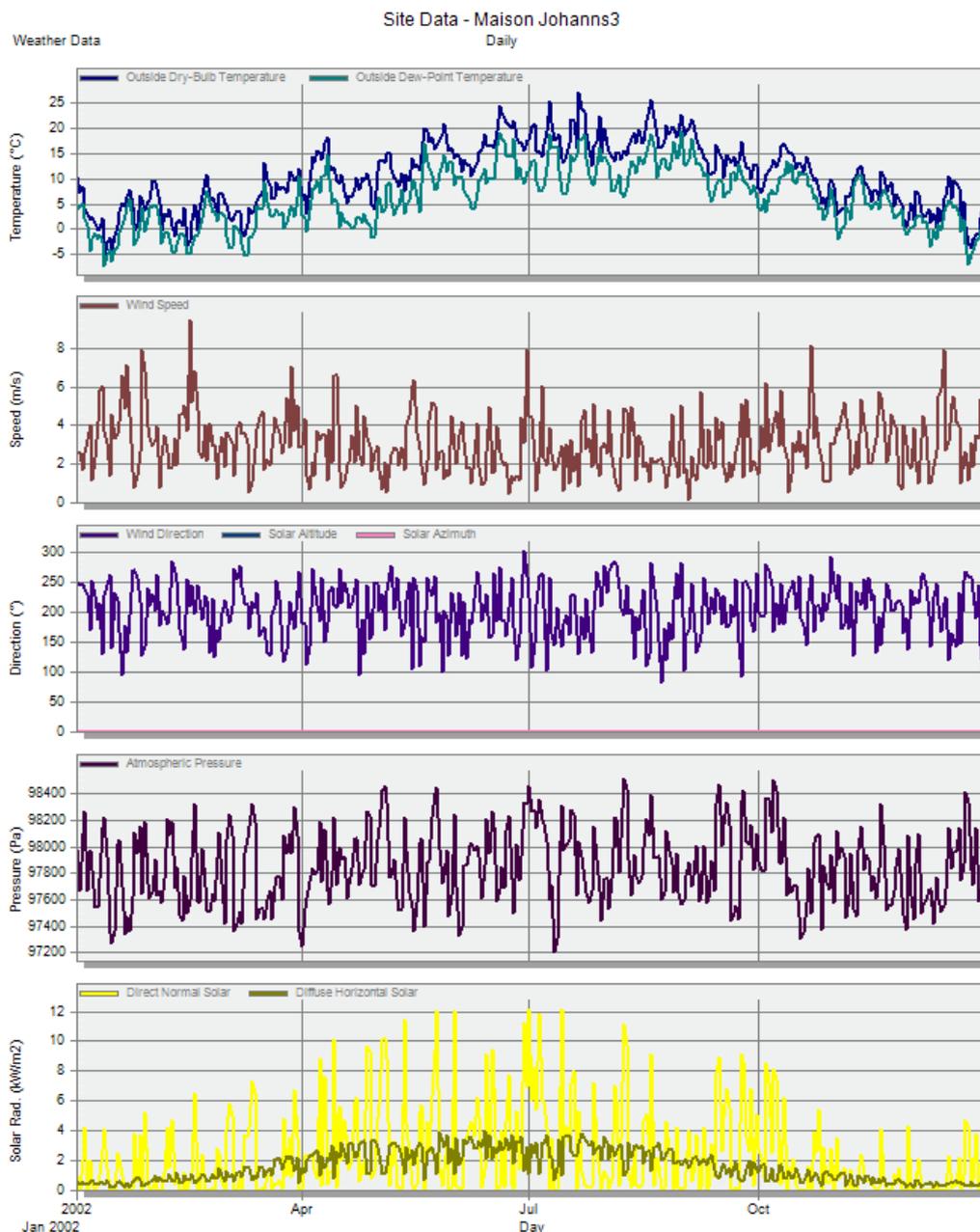


Figure 20 : Meteonorm - Climat actuel

b) Scénario A1B

Le scénario **A1** décrit un monde futur à la croissance économique très rapide, dans lequel la population mondiale atteint un pic vers 2050 avant de commencer à décroître et qui voit le développement rapide de nouvelles technologies plus efficaces. Ce scénario se divise en trois sous-scénarios suivant l'orientation énergétique choisie : le scénario **A1B** correspondant à un monde intermédiaire alliant énergies fossiles et autres. Sur la Figure 21 ci-dessous, on peut voir la simulation de celui-ci pour l'année 2100 en termes de données climatiques.

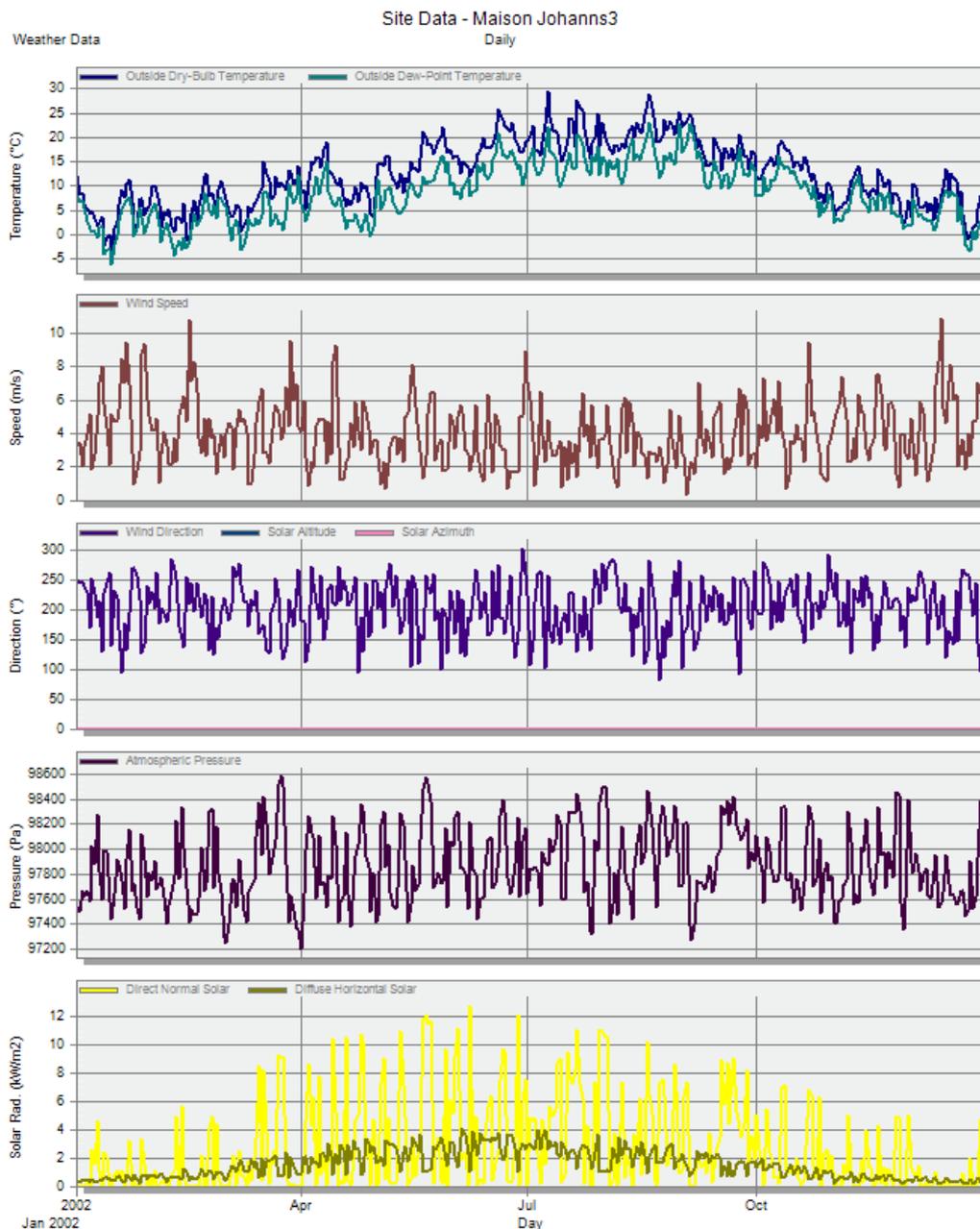


Figure 21 : Meteonorm - Climat futur A1B

c) Scénario A2

Le scénario **A2** décrit un monde très hétérogène. Les différents pays cherchent à maintenir leur identité et à ne dépendre que d'eux-mêmes. La population mondiale augmente de manière continue et les découvertes technologiques sont plus lentes et plus irrégulières que dans les autres scénarios. Sur la Figure 22 ci-dessous, on peut voir la simulation de celui-ci pour l'année 2100 en termes de données climatiques.

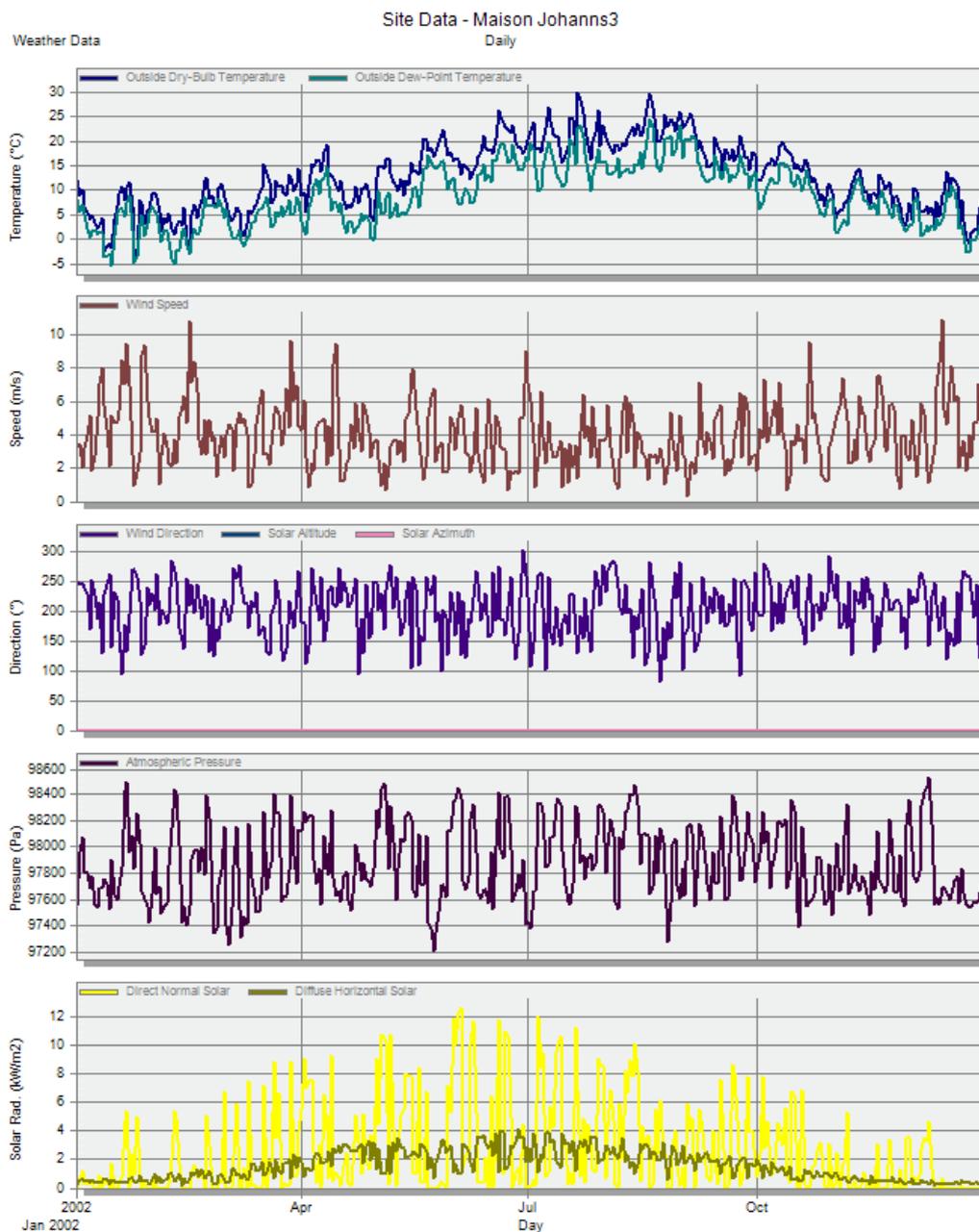


Figure 22 : Meteonorm - Climat futur A2

d) Scénario B1

Le scénario **B1** décrit un monde similaire à celui du scénario A1 mais dans lequel les structures économiques vont rapidement évoluer vers une économie de services et de l'information, avec des réductions de l'intensité matérielle, et l'introduction de technologies propres et économes en ressources. Sur la Figure 23 ci-dessous, on peut voir la simulation de celui-ci pour l'année 2100 en termes de données climatiques.

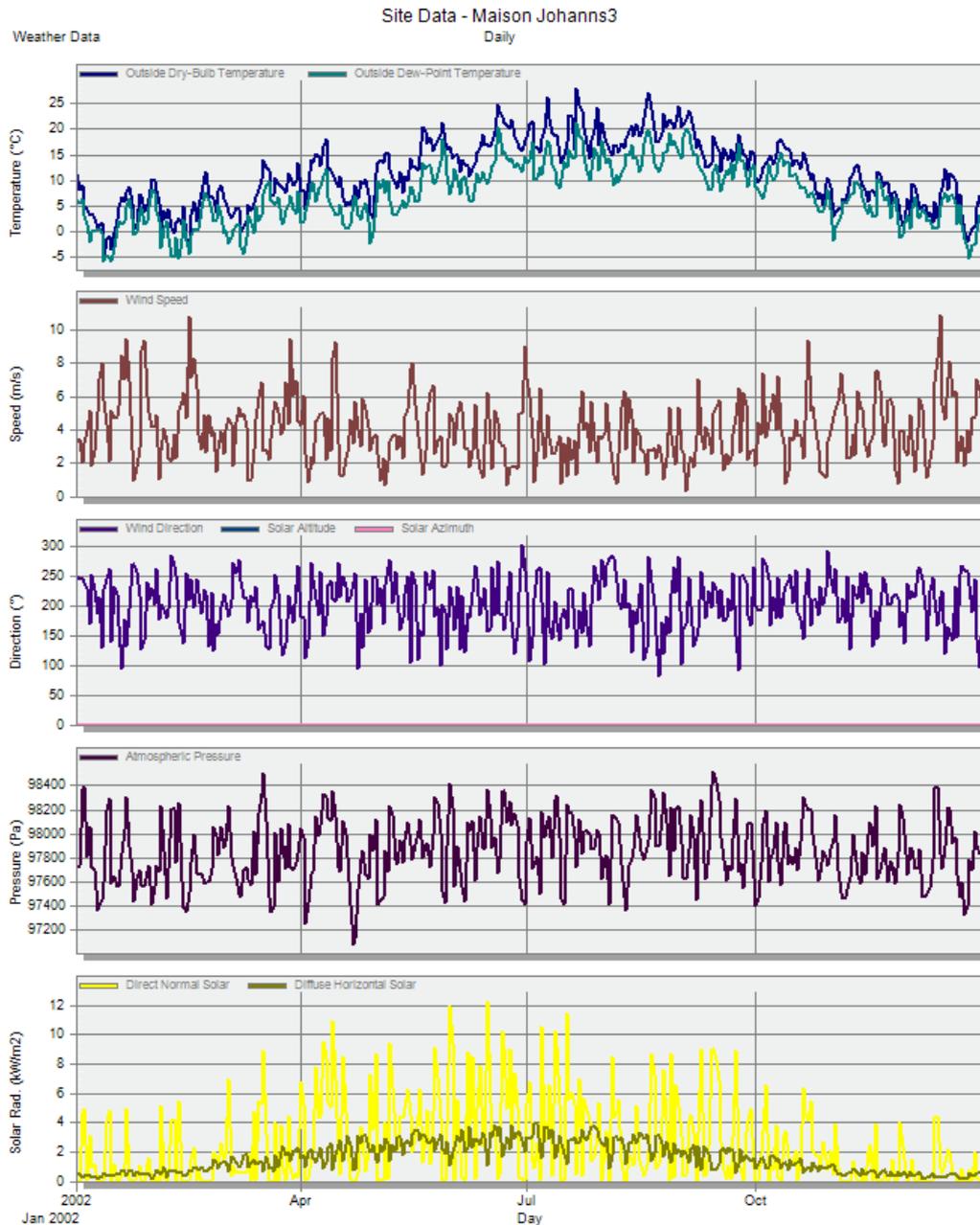


Figure 23 : Meteonorm - Climat futur B1

4) Modèle de « confort thermique » choisi

a) La notion de confort thermique

Le confort étant lié au ressenti, c'est une notion propre à chaque individu et qui varie en fonction l'activité exercée.

Le confort thermique en particulier va se définir comme un état de satisfaction de la personne vis-à-vis de son environnement thermique (Meester, 2008). D'un point de vue scientifique, il s'agit de l'équilibre dynamique établi par les échanges thermiques entre le corps humain et son environnement. Plusieurs paramètres vont influencer le confort thermique du corps humain. Quatre d'entre eux sont liés à l'environnement mais deux vont directement dépendre de l'homme :

- La température ambiante de l'air (T_a).
- La température moyenne des parois (T_p).
- L'humidité relative de l'air (HR) : c'est le rapport entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température T_a et la quantité maximale d'eau que pourrait contenir l'air à cette même température. Elle s'exprime en pourcentage.
- La vitesse de l'air : elle influence les échanges de chaleur par convection. Le mouvement de l'air aide à refroidir la peau. Dans les bâtiments, les vitesses de l'air sont généralement maintenues en deçà de 0,2m/s : au-delà, elles provoquent un sentiment d'inconfort.
- Le métabolisme : c'est un ensemble de réactions chimiques qui se déroulent au sein du corps humain et qui permettent entre autre la production de chaleur interne de celui-ci afin de le maintenir autour de 36,7°C.
- L'habillement : c'est la traduction de la résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement générée par les vêtements portés par l'homme.

b) Le modèle choisi et ses limites

Pour mon étude, j'ai choisi de travailler à partir de la norme NBN EN 15251:2007. C'est une norme européenne qui définit notamment les critères d'ambiance intérieure. Elle « s'applique aux bâtiments non industriels pour lesquels les critères d'ambiance intérieure sont déterminés par l'occupation humaine » (DGO4, 2014). Elle s'applique donc, entre autres, aux habitations comme le cas qui m'intéresse. Elle définit différentes catégories de critères d'ambiance (Tableau 18) sur lesquelles je me suis basée pour établir mes scénarios d'utilisation de l'habitation. J'expliciterais ceux-ci dans une autre partie de ce rapport.

Tableau 18 : Norme NBN EN15251 – Catégories (DGO4, 2014)

Catégorie	Explication
I	Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.
II	Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.
III	Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants.
IV	Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus. Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année.

Pour les valeurs de base de calcul des ambiances thermiques, la norme recommande l'utilisation des indicateurs de confort PMV-PPD définis par l'EN ISO 7730. Elle fournit également un tableau (Tableau 19) dans lequel elle propose une « traduction en objectifs de température opérative pour des conditions d'activité, d'habillement, d'humidité et de vitesse d'air type » (DGO4, 2014).

Tableau 19 : Norme NBN EN 15251 - Températures intérieures recommandées pour chaque catégorie (DGO4, 2014)

Type de bâtiment ou d'espace	Catégorie	Température opérative °C	
		Minimum pour le chauffage (saison hivernale), ~ 1,0 clo	Maximum pour le rafraîchissement (saison estivale), ~ 0,5 clo
Bâtiments d'habitation : pièces de séjour (chambres, séjour, cuisine, etc.) Sédentaire ~ 1,2 met	I	21	25,5
	II	20	26
	III	18	27

Les valeurs exprimées dans ce tableau (Tableau 19) sont des températures opératives. La température opérative correspond à une température de confort ressenti : elle est définie à partir des températures de l'air et des parois (Équation 1).

Équation 1 : Température opérative

$$T_{op}^{\circ} = \frac{T_a^{\circ} + T_p^{\circ}}{2}$$

La norme précise également qu' « une humidification ou déshumidification de l'air n'est généralement pas nécessaire pour assurer le confort » (DGO4, 2014). Cependant, si le taux d'humidité relative devient trop extrême, que ce soit trop haut ou trop bas, il peut être à l'origine d'une sensation de gêne et peut même parfois provoquer des dégâts. La norme propose donc des valeurs de référence indiquées dans le Tableau 20 ci-dessous.

Tableau 20 : Norme NBN EN 15251 - Humidités relatives intérieures recommandées pour chaque catégorie (DGO4, 2014)

Critères recommandés pour l'humidité en présence de dispositifs d'humidification ou de déshumidification			
Type de bâtiment/espace	Catégorie	Humidité relative de conception pour la déshumidification, en %	Humidité relative de conception pour l'humidification, en %
Espaces dans lesquels les critères d'humidité sont liés à l'occupation humaine. Des espaces particuliers (musées, églises etc.) peuvent nécessiter d'autres limites.	I	50	30
	II	60	25
	III	70	20
	IV	> 70	< 20

Dans la norme NBN EN 15251:2007, d'autres paramètres de confort sont également définis (tels que l'éclairage, le bruit, ...). Cependant, ceux-ci n'ayant pas de lien avec le confort thermique que j'ai choisi d'étudier, je ne les détaillerai pas ici.

Les deux critères présentés précédemment sont ceux qui me permettront de définir mes différents scénarios d'utilisation de l'habitation. Cependant, en termes de résultats, je n'étudierai que l'évolution des températures opératives intérieures. Je n'étudierai pas l'évolution du taux d'humidité relative intérieure. J'ai principalement fait ce choix pour des raisons de clarté de lecture. En effet, il m'a semblé que la combinaison de ces deux paramètres risquait de rendre les résultats moins lisibles, moins compréhensibles.

5) Utilisation du logiciel Meteonorm

a) Création d'un nouveau site

Afin d'obtenir les données climatiques nécessaires à mon étude grâce à Meteonorm, j'ai commencé par créer un « site » correspondant à l'adresse de la Maison Kettenis à Eupen (Figure 24).

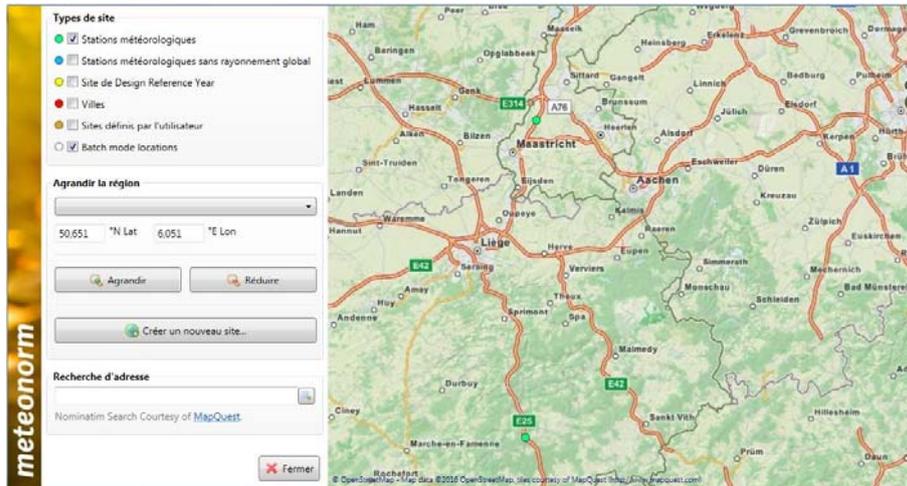


Figure 24 : Meteonorm - Création d'un nouveau site

b) Choix du climat

Une fois ce site créé, j'ai pu choisir la période climatique dont je souhaitais obtenir les données pour mes différents scénarios climatiques (Figure 25). J'ai décidé de travailler avec quatre scénarios climatiques différents : un « actuel » avec des données correspondant aux années 2000, et trois à partir des scénarios climatiques futurs disponibles sur Meteonorm (A1B, A2 et B1) simulés pour l'année 2100.



Figure 25 : Meteonorm - Choix du climat

c) Choix du format de sortie des données

J'ai ensuite pu sélectionner le format de sortie des données « .epw » correspondant à EnergyPlus et donc exploitable sur le logiciel DesignBuilder (Figure 26).

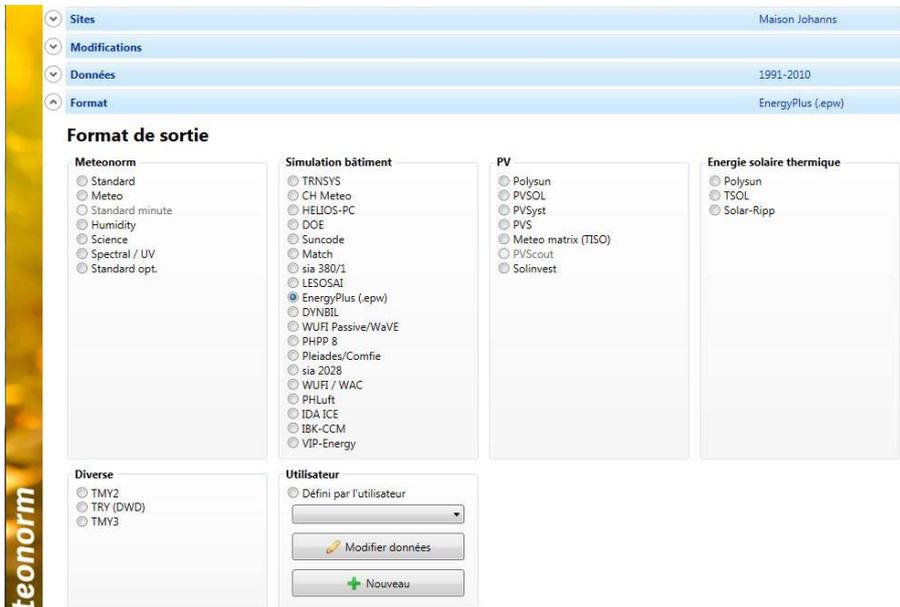


Figure 26 : Meteonorm - Choix du format de sortie des données

d) Aperçu des données générées

Une fois ces différents choix effectués, le logiciel Meteonorm propose un aperçu des données météorologiques générées (Figure 27). Celles-ci peuvent ensuite être exportées et exploitées sur le logiciel souhaité.

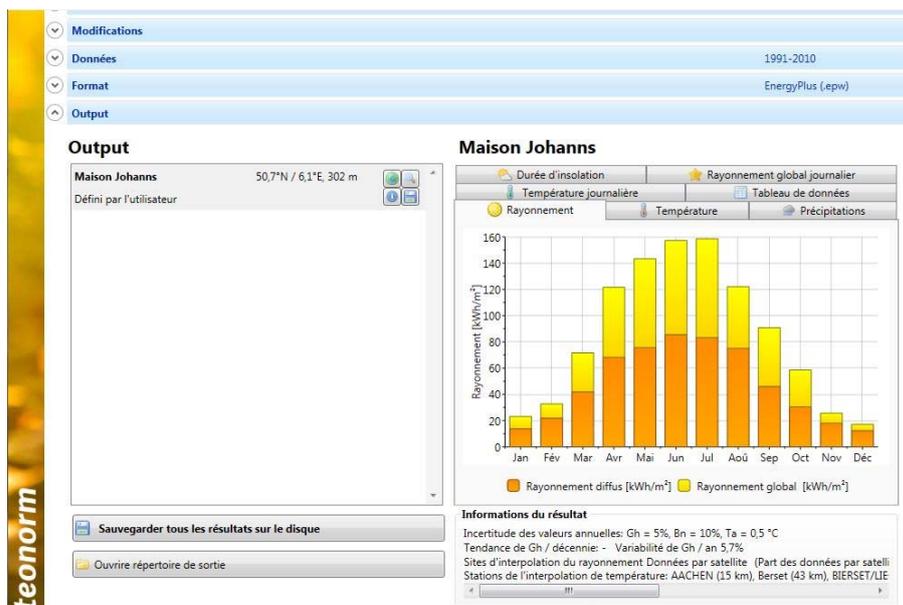


Figure 27 : Meteonorm - Aperçu des données météorologiques

6) Utilisation du logiciel DesignBuilder

a) Importation des données Meteonorm sur DesignBuilder

Le fichier « .epw » obtenu tel qu'expliqué dans la partie précédente ne peut être exploité directement sur DesignBuilder. Il faut d'abord passer par un processus de conversion interne au logiciel qui permet de créer les fichiers associés aux « .epw » dont DesignBuilder a besoin.

Une fois la conversion effectuée, on peut créer un nouveau « climat » dans le logiciel et lui attribuer les données extraites de Meteonorm (Figure 28).

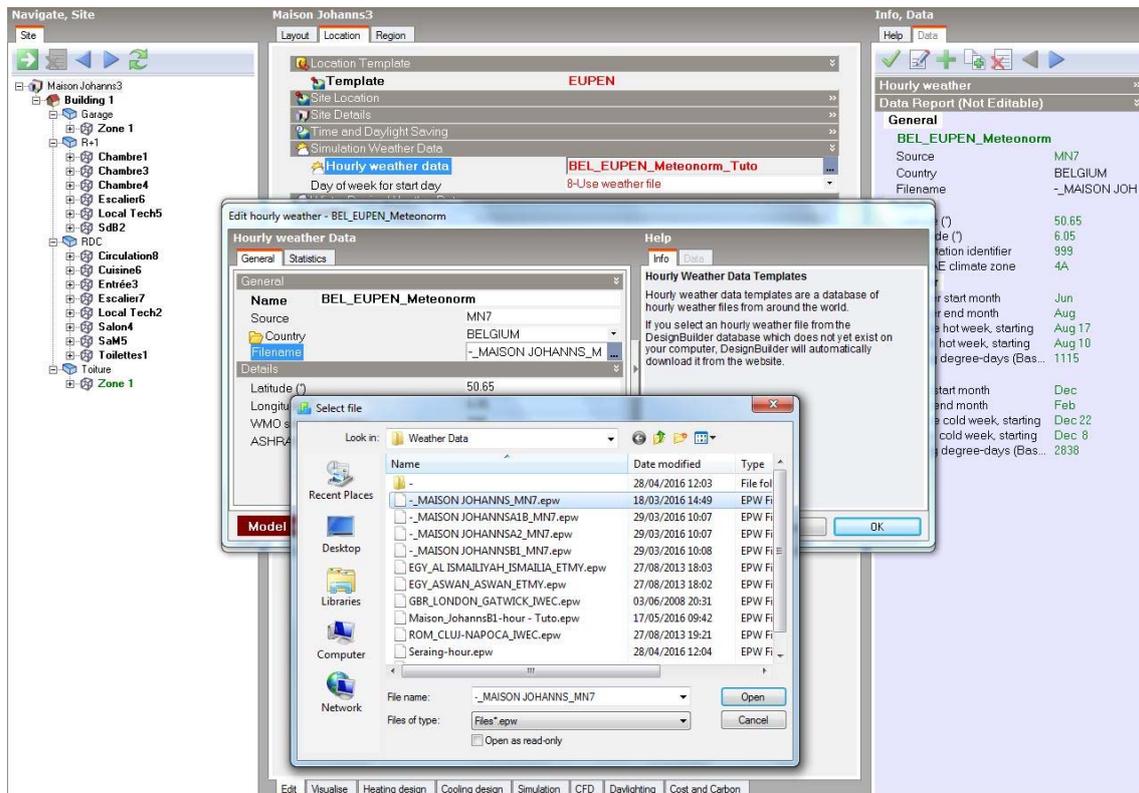


Figure 28 : DesignBuilder - Ajout d'un nouveau climat

b) Géométrie

Après avoir ajouté le climat souhaité, j'ai créé la géométrie de la Maison Kettenis (Figure 29 et Figure 30).

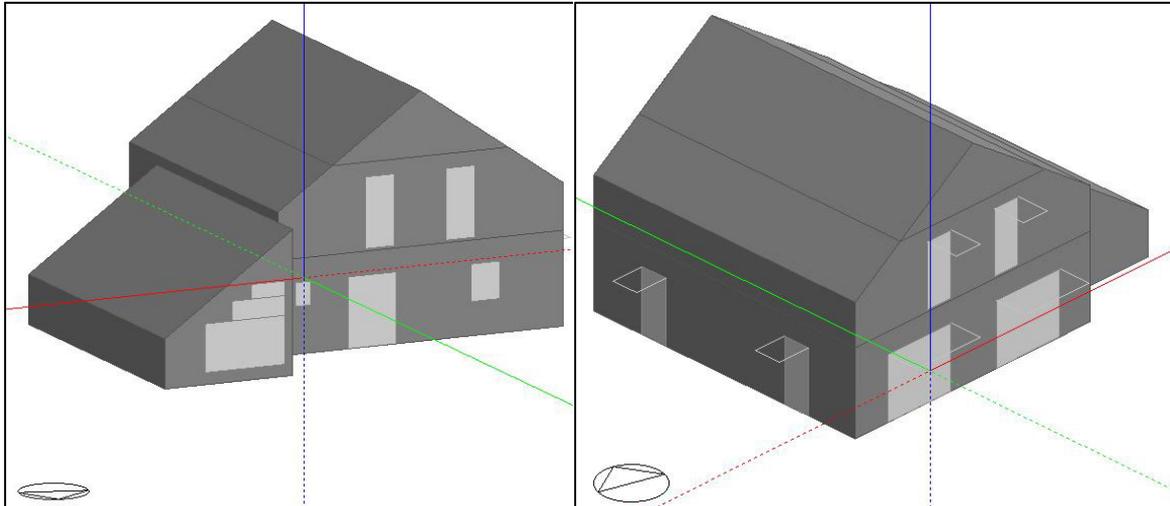


Figure 29 : DesignBuilder - Vue 3D Nord

Figure 30 : DesignBuilder - Vue 3D Sud-Ouest

Dès cette étape de modélisation, j'ai dû faire face à certaines limites du logiciel, notamment au niveau de la création des portes et fenêtres.

Concernant les portes, sans raison apparente, l'outil « porte » du logiciel s'est avéré inopérant malgré le strict respect des instructions. J'ai réussi à contourner cette limite en assimilant les portes à des fenêtres dont j'ai ajusté ensuite les paramètres pour les faire correspondre à des portes.

Une autre difficulté est apparue ; en effet, le logiciel impose une certaine épaisseur autour des parois quelle que soit la valeur de l'épaisseur modélisée. Sur cette épaisseur, la création de fenêtres est verrouillée (Figure 31). Si pour la plupart des fenêtres cela n'a pas eu d'impact, pour la porte du garage cela s'est révélé être un problème majeur. En effet, celle-ci ne tenait tout simplement pas dans l'espace restant sur le mur concerné. Pour contourner ce problème, j'ai modélisé celle-ci sous forme de plusieurs fenêtres visibles sur la Figure 30, afin d'obtenir une surface correspondante à celle de la porte existante.

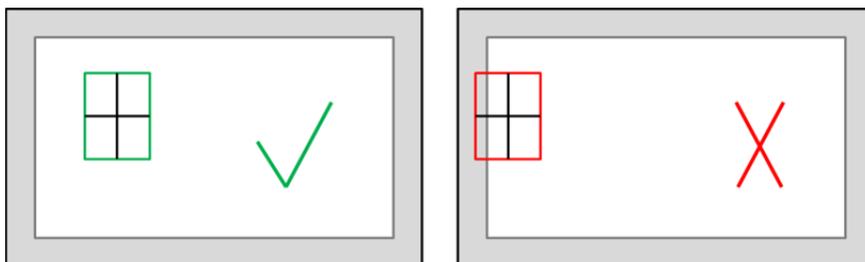


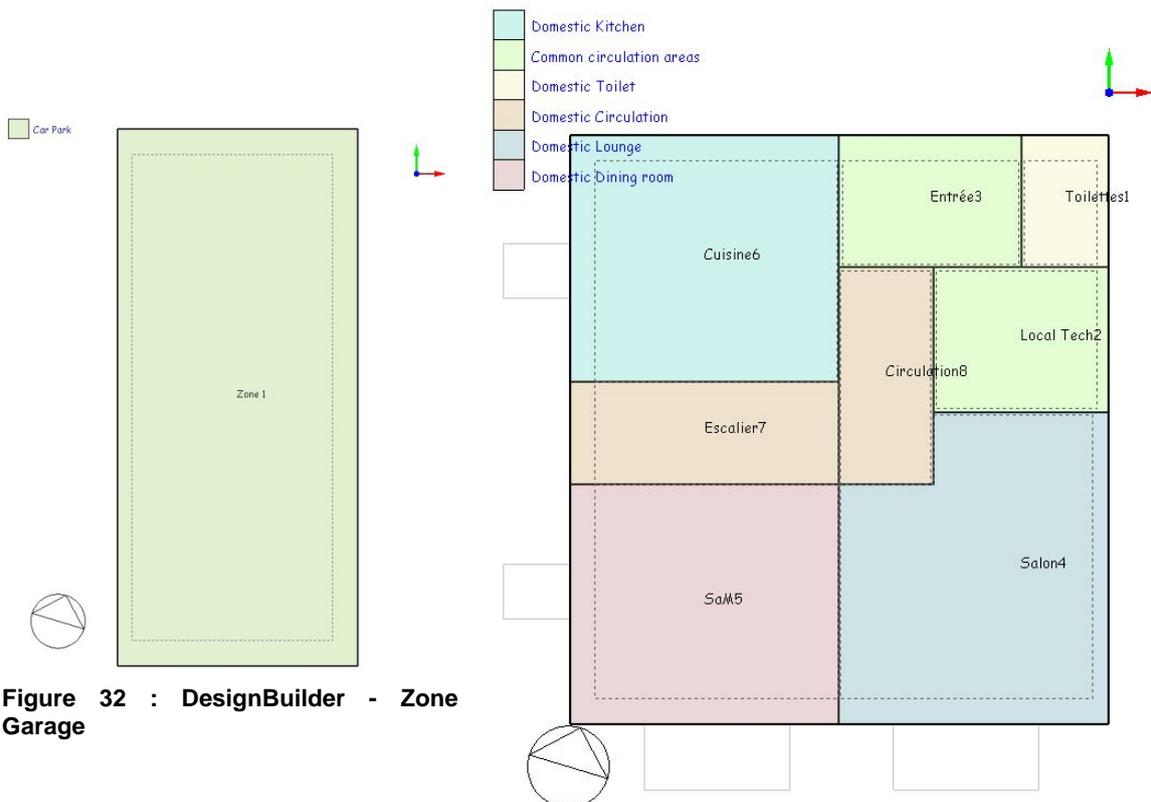
Figure 31 : Schéma illustrant le problème rencontré à la création de fenêtre sur DesignBuilder

Les formes mansardées du garage et du premier étage m'ont également poussée à trouver des solutions de contournement du principe de base du logiciel. Pour créer un volume, il faut commencer par définir sa hauteur puis en tracer les contours au sol. Il y a aussi la possibilité de créer des toitures en pente, mais celles-ci correspondent à un étage complet. Pour réussir à modéliser des étages mansardés, j'ai dû définir en hauteur la profondeur de l'étage puis en tracer le contour sur un plan vertical.

Les difficultés rencontrées, alors que la forme de la maison modélisée est assez simple, m'ont amenée à considérer que le logiciel DesignBuilder ne serait pas adapté pour des modélisations et simulations réalisées sur des bâtiments aux formes complexes.

c) Zonage

Une fois la géométrie du bâtiment faite, j'ai séparé les différents espaces intérieurs de la maison en zones (Figure 32, Figure 33 et Figure 34). Ces zones permettent d'envisager différents types d'utilisation des pièces et ainsi d'avoir un modèle d'une plus grande précision.



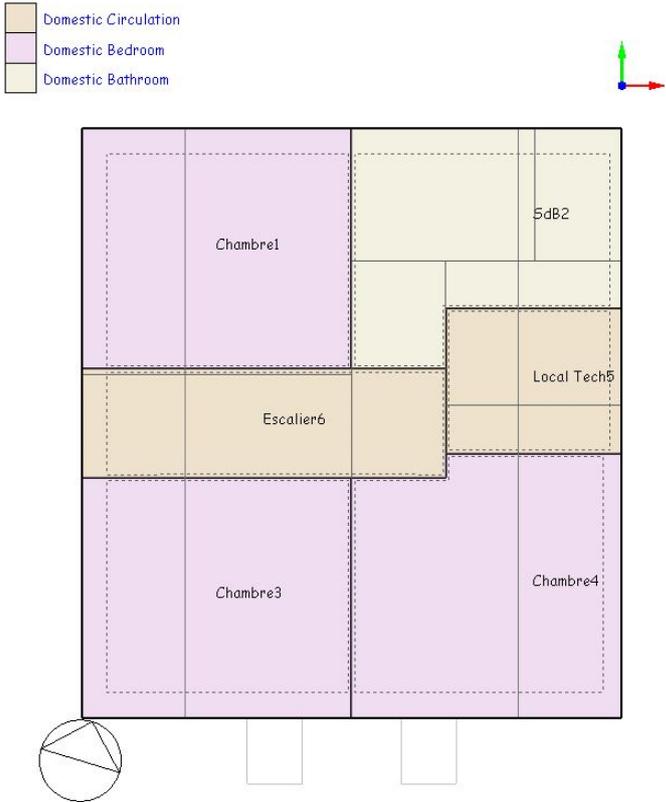


Figure 34 : DesignBuilder - Zones R+1

d) Etanchéité à l'air

Je me suis ensuite intéressée à la partie « construction » du modèle (Figure 35).

J'y ai tout d'abord encodé l'étanchéité de la maison, qui est de 0,5 h-1 (Meester, 2008, p. 34), soit d'une exigence supérieure à la valeur du critère de 0,6 h-1 exigée pour une maison passive

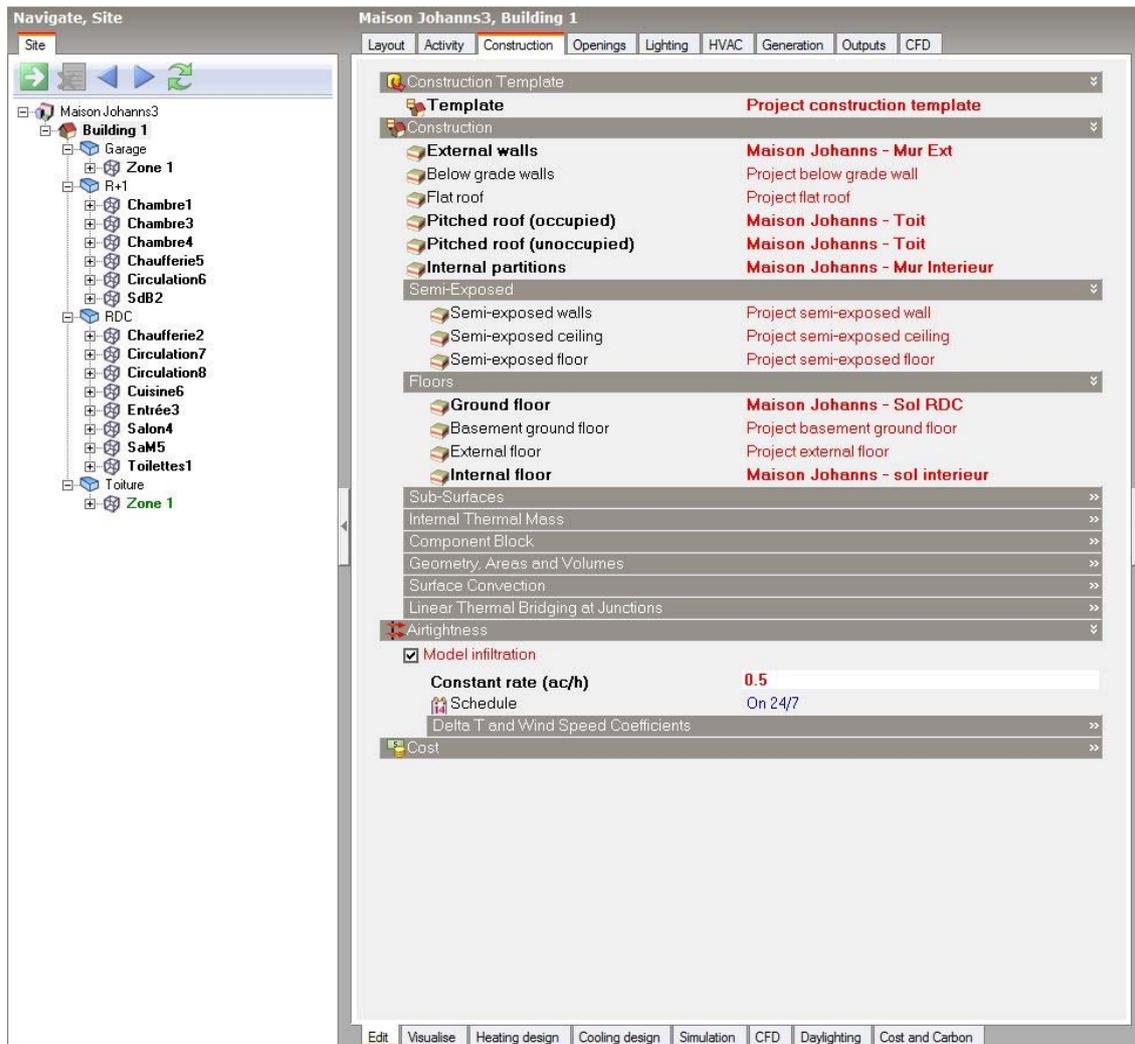


Figure 35 : DesignBuilder - Construction - Etanchéité à l'air

e) Compositions des parois

J'ai ensuite créé les différentes parois de la maison à partir des informations extraites du travail de Tatiana de Meester (2008).

i. Murs extérieurs

Les murs à ossature bois sont utilisés pour optimiser la place, au regard de l'épaisseur de l'isolant à y incorporer.. La composition complète de des murs extérieurs est illustrée par les Figure 36 et Figure 37. Sur la Figure 38, on retrouve le coefficient de transmission thermique U de la paroi : 0,132 W/m²K. La valeur calculée par le logiciel correspond à celle indiquée dans le rapport de Tatiana de Meester (2008, p. 28).

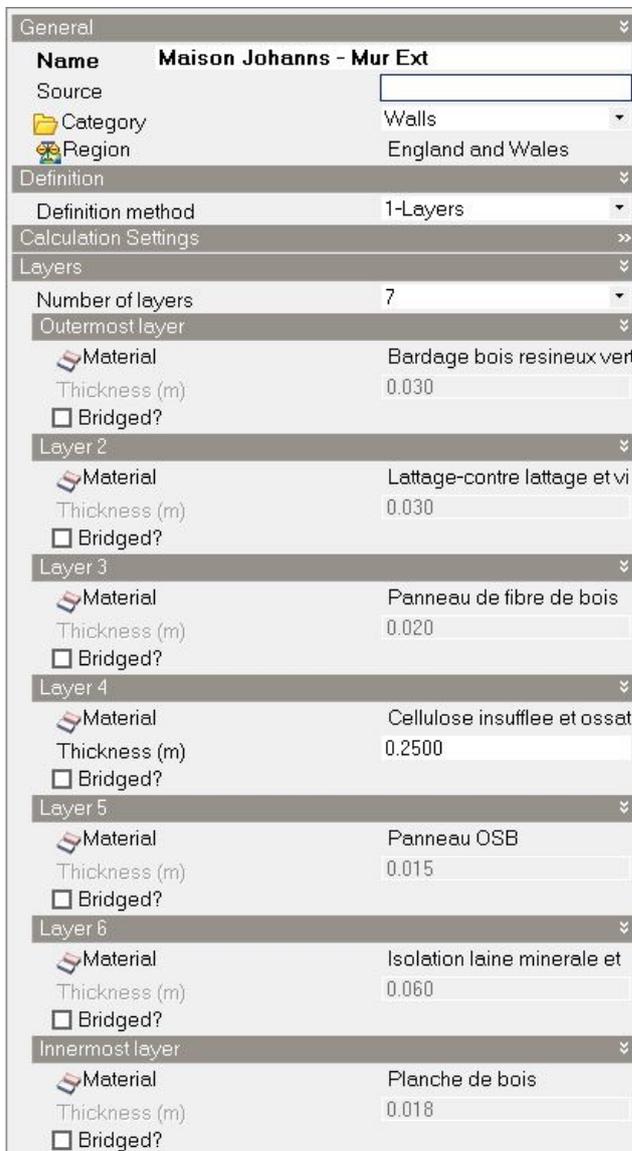


Figure 36 : DesignBuilder - Construction - Murs Extérieurs - Composition

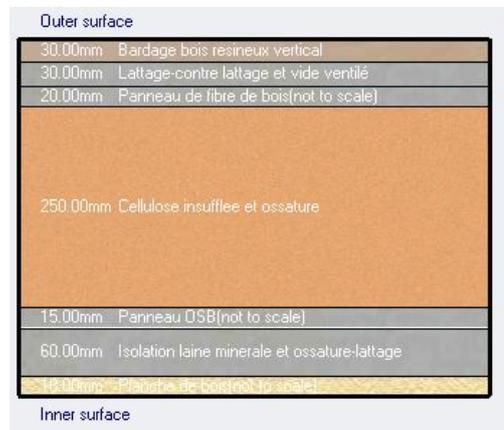


Figure 37 : DesignBuilder - Construction - Murs Extérieurs – Illustration

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m²-K)	2.152
Radiative heat transfer coefficient (W/m²-K)	5.540
Surface resistance (m²-K/W)	0.130
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m²-K)	19.870
Radiative heat transfer coefficient (W/m²-K)	5.130
Surface resistance (m²-K/W)	0.040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m²-K)	0.135
R-Value (m²-K/W)	7.567
U-Value (W/m²-K)	0.132

Figure 38 : DesignBuilder - Construction - Murs Extérieurs - Coefficient de transmission thermique (U) de la paroi

ii. Mur de séparation avec le Garage

Ce mur a une composition légèrement différente des autres. Reliant le corps de la maison au garage, un espace non chauffé, il doit être au moins aussi isolant que les murs extérieurs. Cependant, le garage étant une « pièce » à part entière, les finitions sont un peu différentes (Figure 39 et Figure 40). Sur la Figure 41, on retrouve le coefficient de transmission thermique U de la paroi : 0,129 W/m²K. La valeur calculée par le logiciel correspond à celle indiquée dans le rapport de Tatiana de Meester (2008, p. 29).

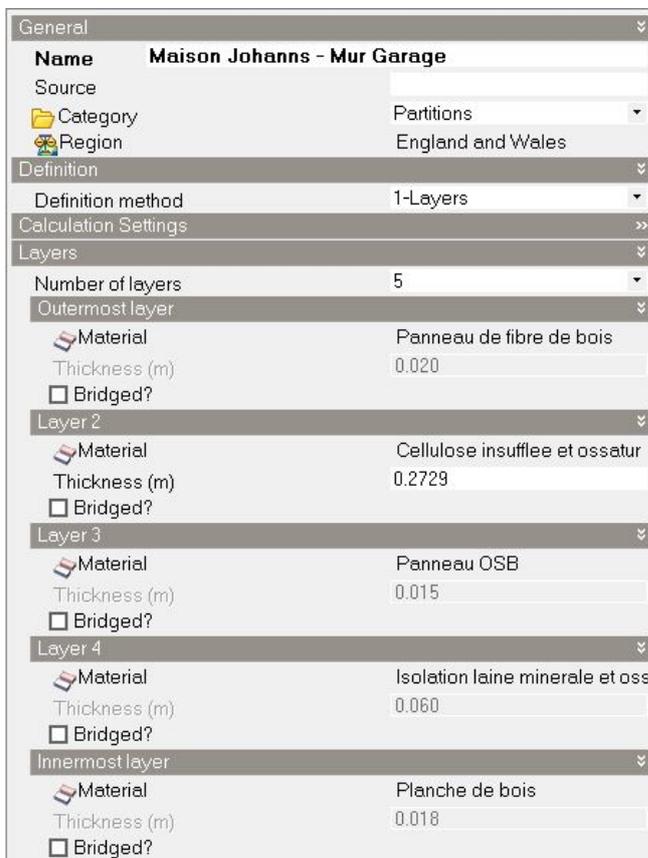


Figure 39 : DesignBuilder - Construction – Mur de séparation avec le Garage - Composition

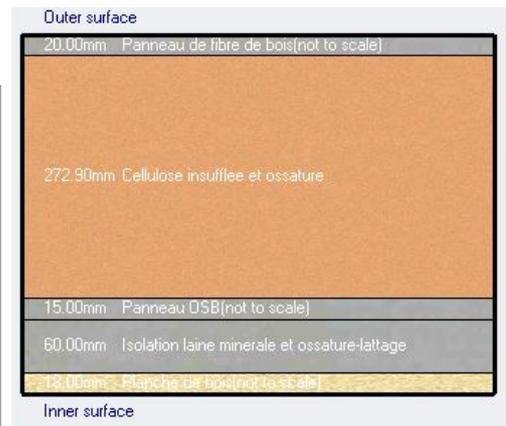


Figure 40 : DesignBuilder - Construction – Mur de séparation avec le Garage – Illustration

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2.152
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.540
Surface resistance (m ² -K/W)	0.130
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2.152
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.540
Surface resistance (m ² -K/W)	0.130
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0.133
R-Value (m ² -K/W)	7.752
U-Value (W/m²-K)	0.129

Figure 41 : DesignBuilder - Construction – Mur de séparation avec le Garage - Coefficient de transmission thermique (U) de la paroi

iii. Murs intérieurs

Les Figure 42 et Figure 43 illustrent la composition des cloisons intérieures. Celles-ci possèdent un coefficient de transmission thermique U de 0,563 W/m²K (Figure 44).

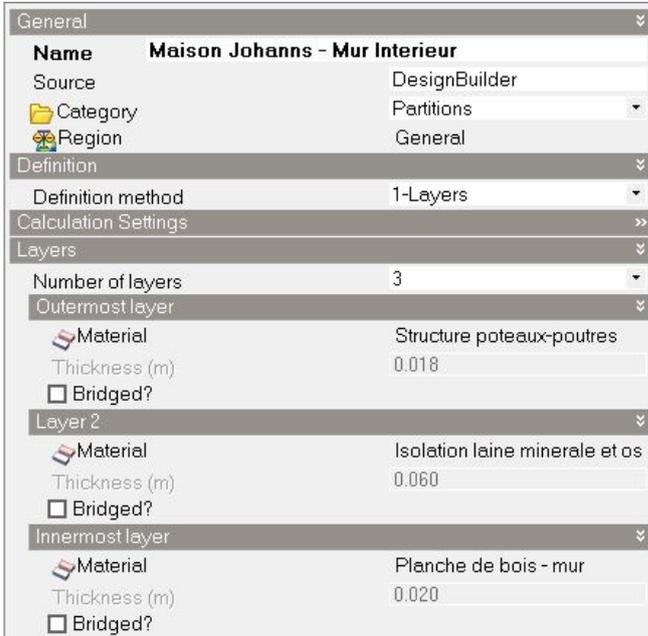


Figure 42 : DesignBuilder - Construction - Murs Intérieurs - Composition

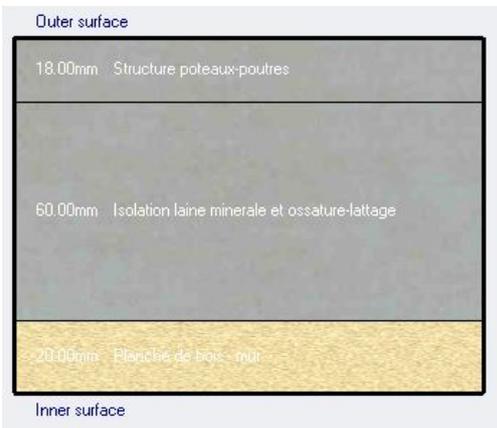


Figure 43 : DesignBuilder - Construction - Murs Intérieurs – Illustration

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m²-K)	2.152
Radiative heat transfer coefficient (W/m²-K)	5.540
Surface resistance (m²-K/W)	0.130
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m²-K)	2.152
Radiative heat transfer coefficient (W/m²-K)	5.540
Surface resistance (m²-K/W)	0.130
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m²-K)	0.659
R-Value (m²-K/W)	1.777
U-Value (W/m²-K)	0.563

Figure 44 : DesignBuilder - Construction - Murs Intérieurs - Coefficient de transmission thermique (U) de la paroi

Pour les « parois » séparant des pièces ouvertes les unes sur les autres, j'ai modélisé des « cloisons » de 25 cm d'épaisseur constituées uniquement d'air (Figure 45).

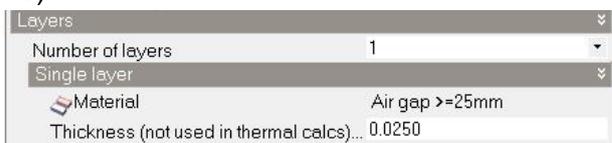


Figure 45 : DesignBuilder - Construction - Murs Ouverts

iv. Toiture

Dans le modèle de Tatiana de Meester, le toit comporte 30 cm de cellulose insufflée (2008, p. 30). Dans mon modèle, j'ai dû porter cette valeur à 32,7 cm (Figure 46 et Figure 47) afin que le coefficient de transmission thermique U de la paroi corresponde à la valeur du modèle initial, $U = 0,117 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Meester, 2008, p. 30). Pour la simulation, j'ai choisi de privilégier un coefficient U correct (Figure 48) plutôt qu'une épaisseur de toiture exacte.

General	
Name	Maison Johanns - Toit
Source	
Category	Roofs
Region	England and Wales
Definition	
Definition method	1-Layers
Calculation Settings	
Layers	
Number of layers	6
Outermost layer	
Material	Tuiles
Thickness (m)	0.020
Bridged?	<input type="checkbox"/>
Layer 2	
Material	Lattage-contre lattage et vide ventilé
Thickness (m)	0.050
Bridged?	<input type="checkbox"/>
Layer 3	
Material	Panneau de bois
Thickness (m)	0.022
Bridged?	<input type="checkbox"/>
Layer 4	
Material	Cellulose insufflée et chevron
Thickness (m)	0.3270
Bridged?	<input type="checkbox"/>
Layer 5	
Material	Isolation laine minérale et ossature-lattage
Thickness (m)	0.060
Bridged?	<input type="checkbox"/>
Innermost layer	
Material	Planche de bois
Thickness (m)	0.018
Bridged?	<input type="checkbox"/>

Figure 46 : DesignBuilder - Construction - Toiture - Compositions

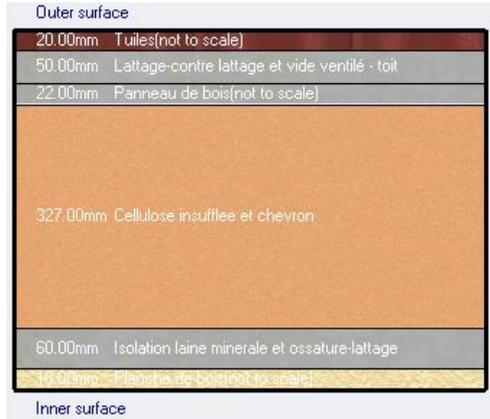


Figure 47 : DesignBuilder - Construction - Toiture - Illustration

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	4.460
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.540
Surface resistance (m ² -K/W)	0.100
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19.870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.130
Surface resistance (m ² -K/W)	0.040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0.119
R-Value (m ² -K/W)	8.555
U-Value (W/m²-K)	0.117

Figure 48 : DesignBuilder - Construction - Toiture - Coefficient de transmission thermique (U) de la paroi

v. Plancher intérieur

La composition du plancher séparant le 1^{er} étage du rez-de-chaussée est visible sur les Figure 49 et Figure 50. Cette paroi possède un coefficient de transmission thermique U de 0,630 W/m²K (Figure 51).

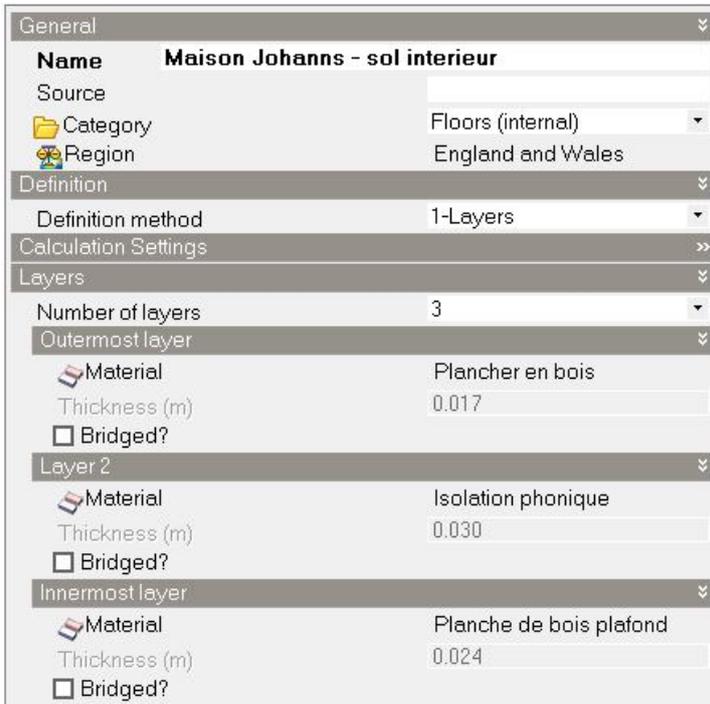


Figure 49 : DesignBuilder - Construction – Plancher intérieur - Compositions



Figure 50 : DesignBuilder - Construction – Sol intérieur - Illustration

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	0.342
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.540
Surface resistance (m ² -K/W)	0.170
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	4.460
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.540
Surface resistance (m ² -K/W)	0.100
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0.759
R-Value (m ² -K/W)	1.587
U-Value (W/m²-K)	0.630

Figure 51 : DesignBuilder - Construction – Sol intérieur - Coefficient de transmission thermique (U) de la paroi

vi. Plancher RDC

C'est la seule paroi de la maison comportant un peu d'inertie thermique. « L'inertie thermique peut simplement être définie comme la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer petit à petit. » (DGO4, 2009). Celle-ci résulte de la chape et d'un revêtement de sol en carrelage (Figure 52 et Figure 53). Le coefficient de transmission thermique de cette paroi est de 0,179 W/m²K (Figure 54) (Meester, 2008, p. 31).

General	
Name	Maison Johanns - Sol RDC
Source	
Category	Floors (ground)
Region	England and Wales
Definition	
Definition method	1-Layers
Calculation Settings	
Layers	
Number of layers	6
Outermost layer	
Material	Panneau fibre-ciment
Thickness (m)	0.010
Bridged?	<input type="checkbox"/>
Layer 2	
Material	Gitage
Thickness (m)	0.250
Bridged?	<input type="checkbox"/>
Layer 3	
Material	Cellulose insufflee
Thickness (m)	0.1284
Bridged?	<input type="checkbox"/>
Layer 4	
Material	Panneau de bois
Thickness (m)	0.022
Bridged?	<input type="checkbox"/>
Layer 5	
Material	Chape
Thickness (m)	0.060
Bridged?	<input type="checkbox"/>
Innermost layer	
Material	Carrelage
Thickness (m)	0.030
Bridged?	<input type="checkbox"/>

Figure 52 : DesignBuilder - Construction – Plancher RDC – Compositions

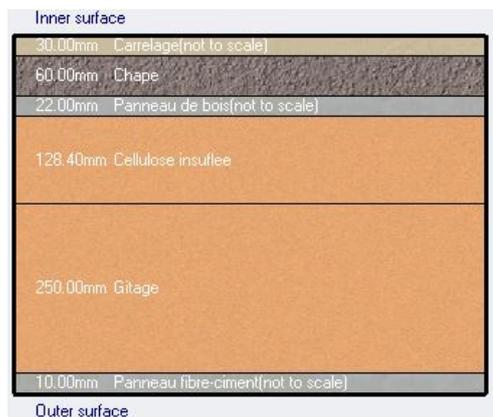


Figure 53 : DesignBuilder - Construction – Plancher RDC – Illustration

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m²-K)	0.342
Radiative heat transfer coefficient (W/m²-K)	5.540
Surface resistance (m²-K/W)	0.170
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m²-K)	19.870
Radiative heat transfer coefficient (W/m²-K)	5.130
Surface resistance (m²-K/W)	0.040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m²-K)	0.186
R-Value (m²-K/W)	5.587
U-Value (W/m²-K)	0.179

Figure 54 : DesignBuilder - Construction – Plancher RDC - Coefficient de transmission thermique (U) de la paroi

vii. Vitrage

Les fenêtres de la maison sont ultra-performantes. Leur coefficient de transmission thermique global correspond à celui de fenêtres à triple vitrage complètes, c'est-à-dire $U = 0,81 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Meester, 2008, p. 29). Le vitrage seul possède un U de $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Figure 55).

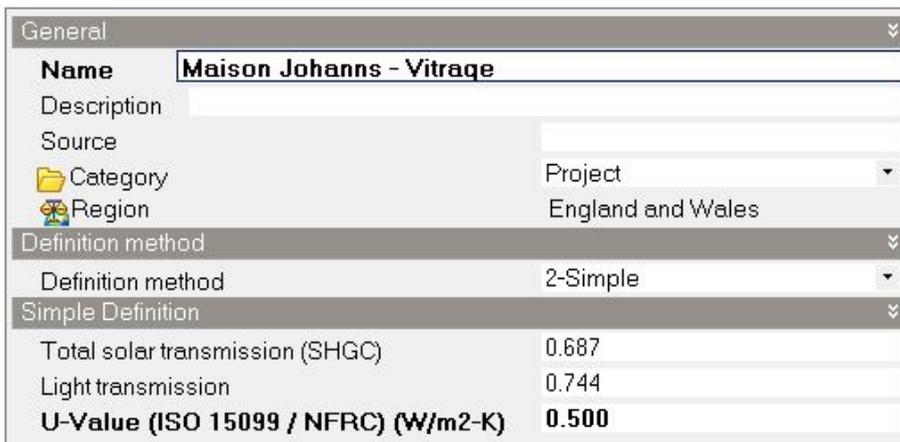


Figure 55 : DesignBuilder - Openings - Vitrage - Paramètres

Il est aussi important de noter que les vitrages situés sur les façades Sud et Ouest de la maison sont surmontés d'auvent d'1,1m (Figure 56).



Figure 56 : DesignBuilder - Openings - Vitrage – Ombrage

viii. Portes extérieures

En ce qui concerne les portes extérieures, comme expliqué précédemment, je les ai modélisées sous forme de fenêtres auxquelles j'ai attribuées des paramètres correspondant à des portes. Je leur ai affecté la valeur minimale pour les coefficients de transmission solaire et lumineuse (Figure 57) et la valeur de coefficient de transmission thermique indiquée dans un catalogue pour une porte similaire. . .

General	
Name	Maison Johans - Porte exterieure
Description	
Source	
Category	Project
Region	England and Wales
Definition method	
Definition method	2-Simple
Simple Definition	
Total solar transmission (SHGC)	0.010
Light transmission	0.010
U-Value (ISO 15099 / NFRC) (W/m2-K)	2.500

Figure 57 : DesignBuilder - Openings - Portes extérieures - Paramètres

ix. Porte Garage

J'ai procédé de manière identique pour la porte du garage (Figure 58). Seule la valeur de U change puisque la porte n'est pas constituée du même matériau.

General	
Name	Maison Johans - Porte qarage
Description	
Source	
Category	Project
Region	England and Wales
Definition method	
Definition method	2-Simple
Simple Definition	
Total solar transmission (SHGC)	0.010
Light transmission	0.010
U-Value (ISO 15099 / NFRC) (W/m2-K)	3.200

Figure 58 : DesignBuilder - Openings - Porte Garage - Paramètres

f) Activité et Planning

A l'aide des zones créées précédemment, j'ai pu préciser pour chaque type de pièce différents paramètres tels qu'un taux et un planning d'occupation, des températures consignes, un contrôle de l'humidité et la présence ou non de divers équipements. Pour calculer la « densité » d'occupation d'une pièce, nombre de personnes rapporté à la surface, j'ai considéré une famille de quatre personnes à la lecture des plans de la maison (deux chambres d'enfant et une chambre parentale), puis ai fait le calcul pour chaque pièce en fonction de son usage probable. Ceci explique pourquoi nous obtenons une valeur différente pour chaque pièce.

i. Le Garage

Le garage est un espace non chauffé (Figure 59) et généralement très peu occupé. La valeur minimale d'occupation proposée dans le logiciel correspondant à 1h par jour, j'ai préféré considérer cette période d'occupation comme négligeable (Figure 60) et l'ai donc indiquée comme étant nulle.

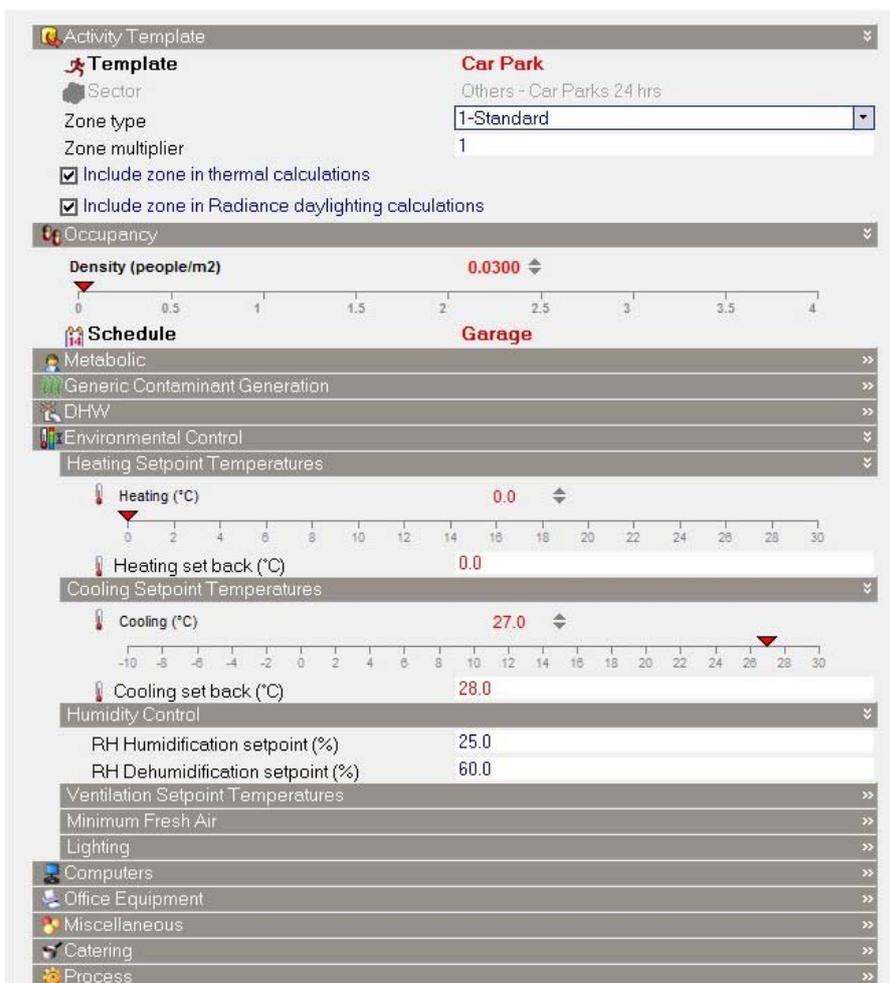


Figure 59 : DesignBuilder - Activity - Garage

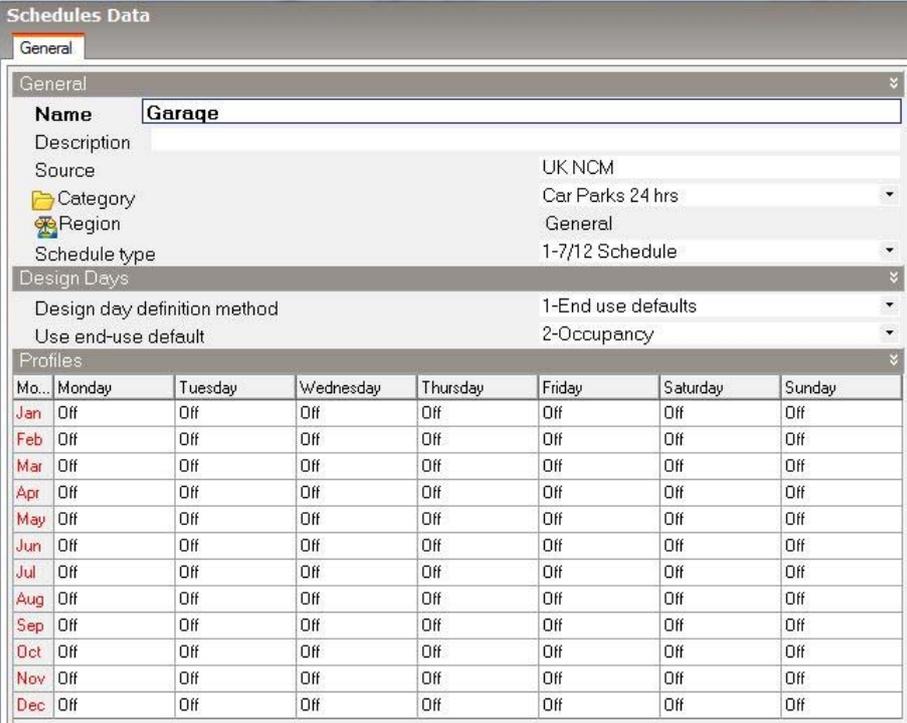


Figure 60 : DesignBuilder - Activity - Planning Garage

ii. L'Entrée

L'Entrée est une zone chauffée mais avec des températures consignes moins strictes que les pièces principales de la maison (Figure 61). J'ai fait l'hypothèse que la pièce était occupée en moyenne 1h par jour (Figure 62).

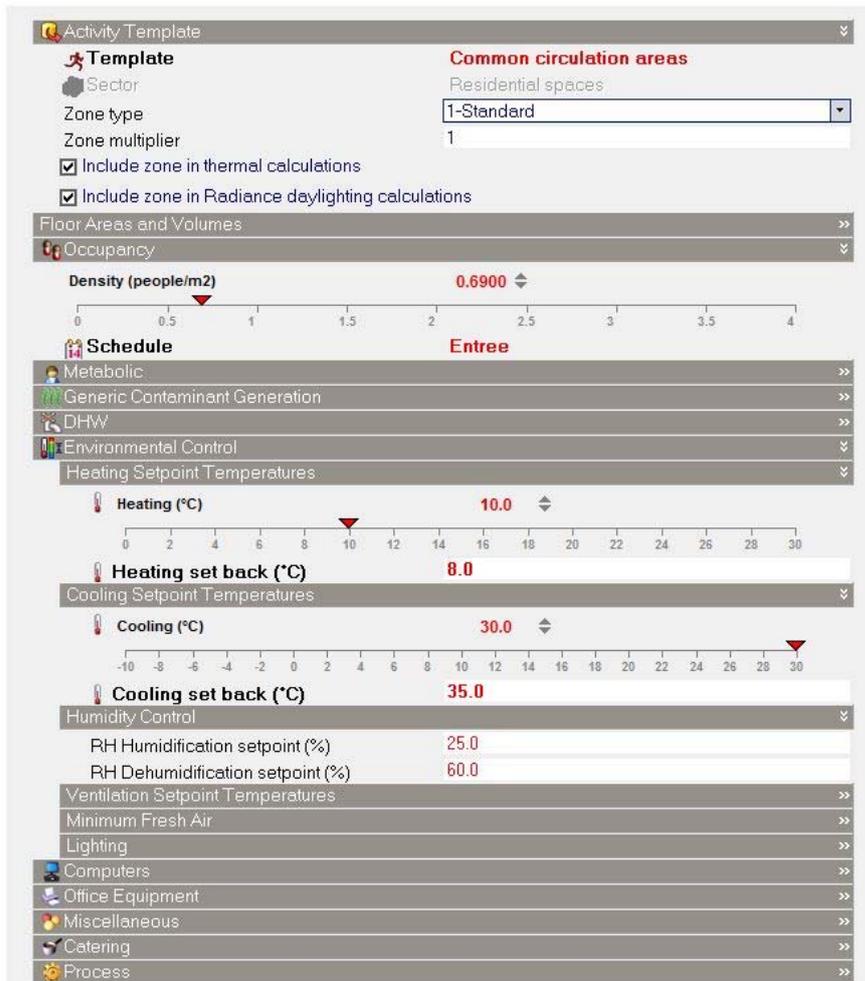


Figure 61 : DesignBuilder - Activity – Entrée

Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Feb	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Mar	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Apr	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
May	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Jun	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Jul	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Aug	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Sep	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Oct	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Nov	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Dec	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30

Figure 62 : DesignBuilder - Activity - Planning Entrée

Les heures indiquées sur la Figure 62 servent à modéliser une occupation moyenne d'1h par jour et mais ne correspondent pas aux périodes réelles d'occupation des lieux.

iii. Les Toilettes

Les Toilettes sont des zones chauffées avec les mêmes températures consignes que les pièces principales de la maison (Figure 63). J'ai considéré que la pièce était occupée en moyenne 1h par jour (Figure 64).

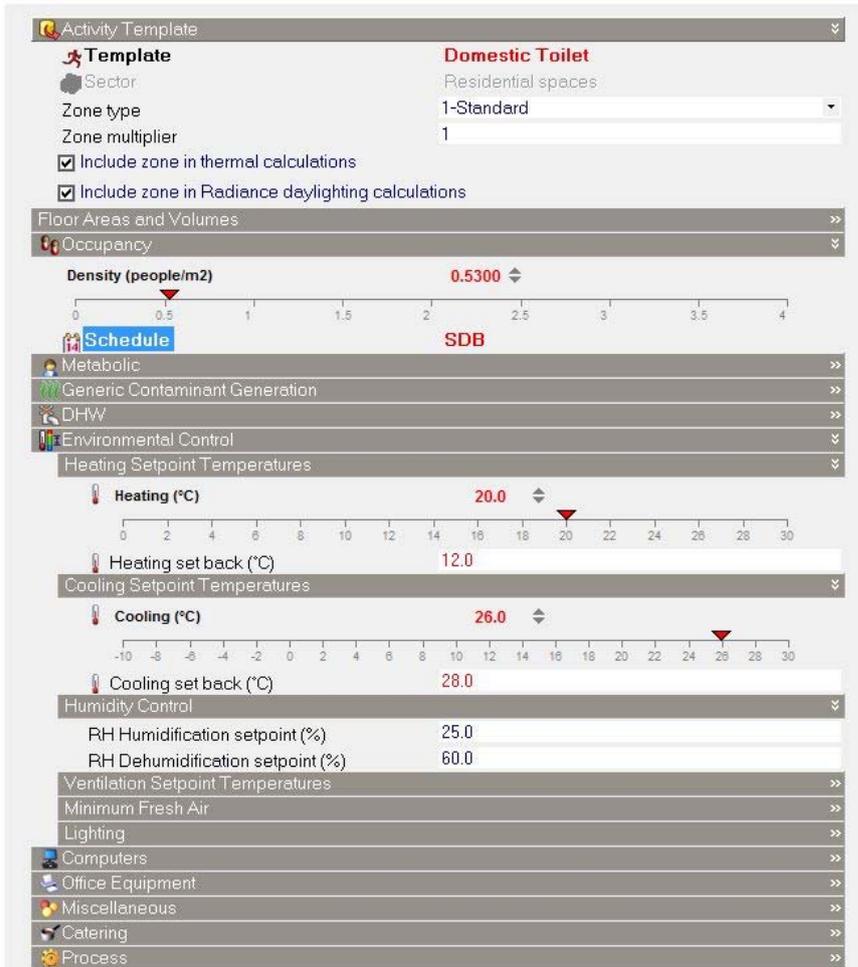


Figure 63 : DesignBuilder - Activity - Toilettes

Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Feb	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Mar	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Apr	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
May	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Jun	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Jul	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Aug	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Sep	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Oct	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Nov	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Dec	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30

Figure 64 : DesignBuilder - Activity - Planning Toilettes

Les heures indiquées sur la Figure 64 servent à modéliser une occupation moyenne d'1h par jour et mais ne correspondent pas aux périodes réelles d'occupation des lieux.

iv. La Cuisine

La Cuisine est l'une des pièces à vivre principales de la maison. J'y ai donc appliqué des températures consignes plus strictes (Figure 65). J'ai considéré que cette pièce était occupée aux moments des repas et différemment en semaine et le week-end (Figure 66, Figure 67 à Figure 68). Pour modéliser la présence d'équipements ménagers en cuisine, j'ai eu recours à des « équipements de bureaux ».

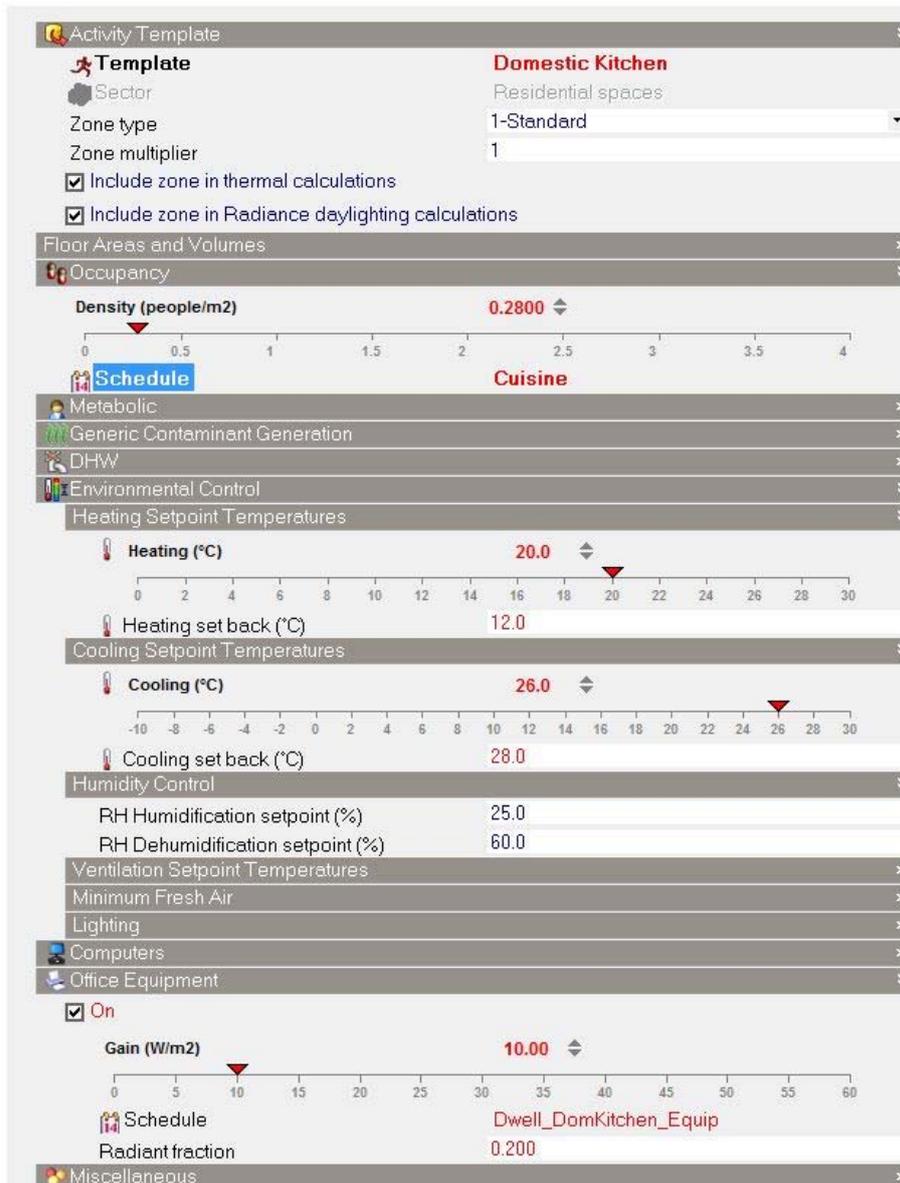


Figure 65 : DesignBuilder - Activity - Cuisine

Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Cuisine Semaine	Cuisine Wk	Cuisine Wk				
Feb	Cuisine Semaine	Cuisine Wk	Cuisine Wk				
Mar	Cuisine Semaine	Cuisine Wk	Cuisine Wk				
Apr	Cuisine Semaine	Cuisine Wk	Cuisine Wk				
May	Cuisine Semaine	Cuisine Wk	Cuisine Wk				
Jun	Cuisine Semaine	Cuisine Wk	Cuisine Wk				
Jul	Cuisine Semaine	Cuisine Wk	Cuisine Wk				
Aug	Cuisine Semaine	Cuisine Wk	Cuisine Wk				
Sep	Cuisine Semaine	Cuisine Wk	Cuisine Wk				
Oct	Cuisine Semaine	Cuisine Wk	Cuisine Wk				
Nov	Cuisine Semaine	Cuisine Wk	Cuisine Wk				
Dec	Cuisine Semaine	Cuisine Wk	Cuisine Wk				

Figure 66 : DesignBuilder - Activity - Planning Cuisine

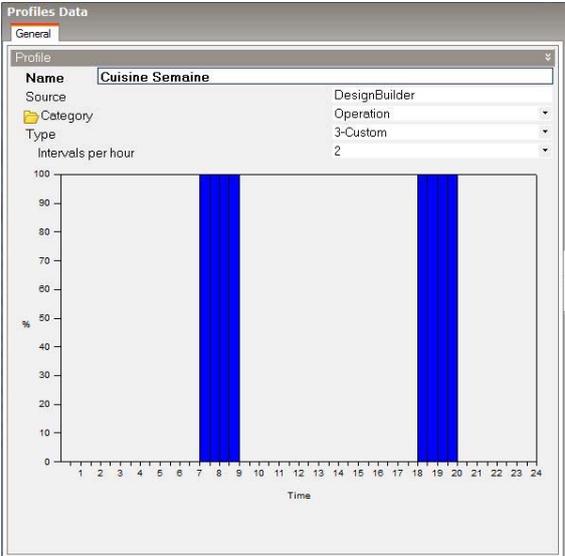


Figure 67 : DesignBuilder - Activity - Planning Cuisine Semaine

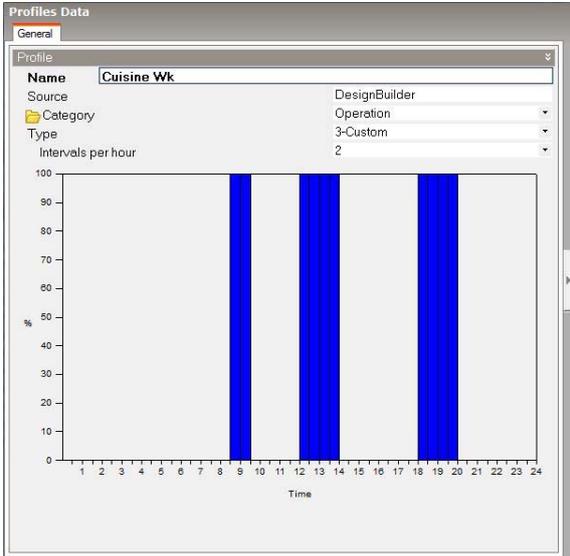


Figure 68 : DesignBuilder - Activity - Planning Cuisine Week-End

v. La Salle à Manger

La Salle à Manger est également l'une des pièces à vivre principales de la maison, j'y ai donc appliqué des températures consignes plus strictes (Figure 69). J'ai considéré que cette pièce était occupée aux mêmes moments que la Cuisine (Figure 69).

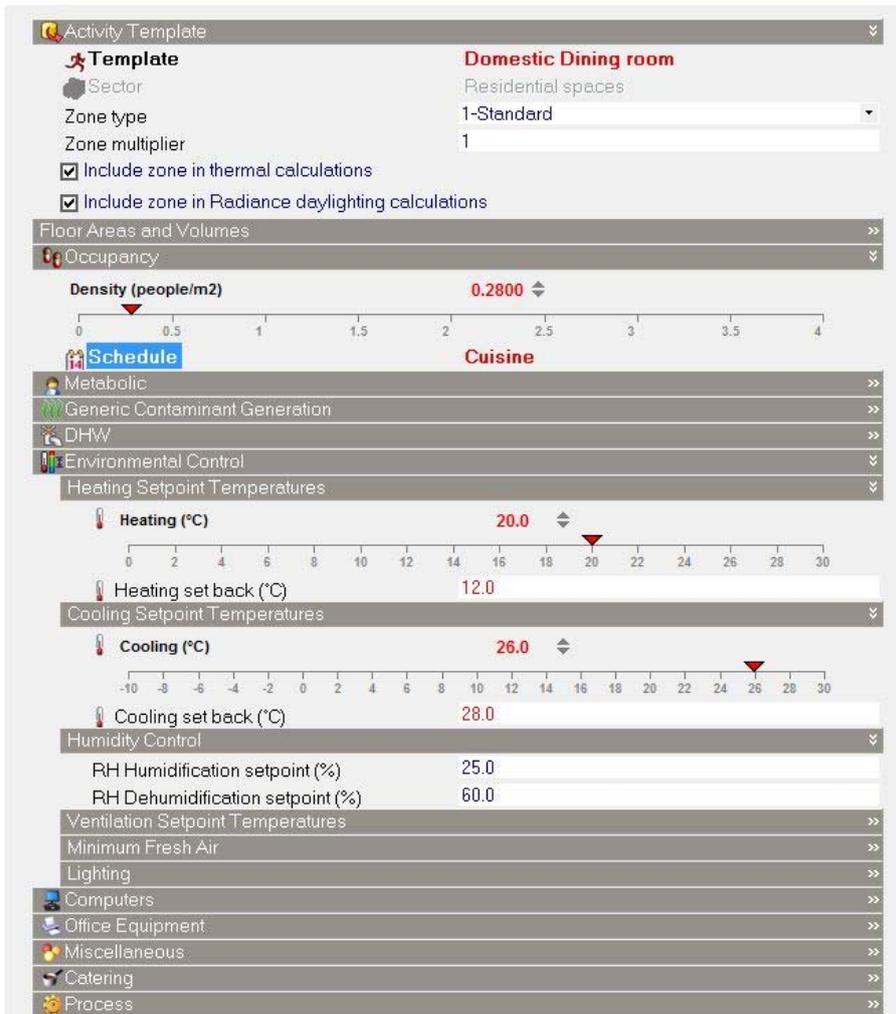


Figure 69 : DesignBuilder - Activity - Salle à Manger

vi. Le Salon

Le Salon, autre pièce à vivre principale de la maison, pour laquelle j'ai appliqué des températures consignes plus strictes (Figure 70). J'ai considéré qu'il était de manière générale occupé en soirée mais davantage le week-end qu'en semaine (Figure 71, Figure 72 et Figure 73). J'ai placé des « équipements de bureaux » dans cette pièce afin de modéliser la présence probable d'une télévision et d'autres équipements (lecteur DVD, chaîne Hi-Fi, ordinateur, ...)

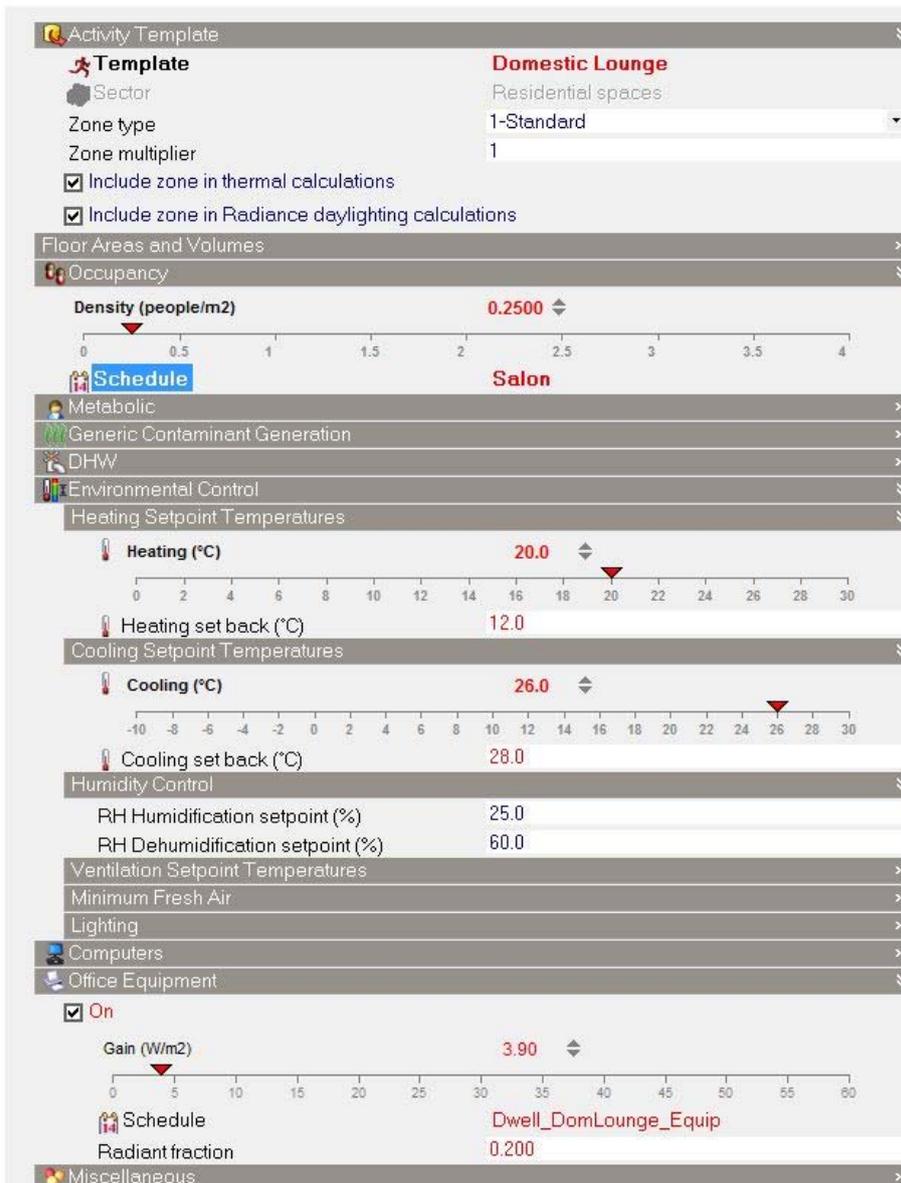


Figure 70 : DesignBuilder - Activity - Salon

Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Salon Semaine	Salon Wk	Salon Wk				
Feb	Salon Semaine	Salon Wk	Salon Wk				
Mar	Salon Semaine	Salon Wk	Salon Wk				
Apr	Salon Semaine	Salon Wk	Salon Wk				
May	Salon Semaine	Salon Wk	Salon Wk				
Jun	Salon Semaine	Salon Wk	Salon Wk				
Jul	Salon Semaine	Salon Wk	Salon Wk				
Aug	Salon Semaine	Salon Wk	Salon Wk				
Sep	Salon Semaine	Salon Wk	Salon Wk				
Oct	Salon Semaine	Salon Wk	Salon Wk				
Nov	Salon Semaine	Salon Wk	Salon Wk				
Dec	Salon Semaine	Salon Wk	Salon Wk				

Figure 71 : DesignBuilder - Activity - Planning Salon

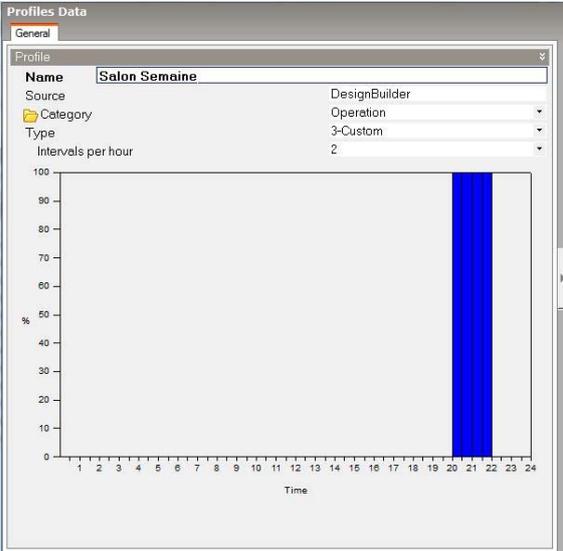


Figure 72 : DesignBuilder - Activity - Planning Salon Semaine

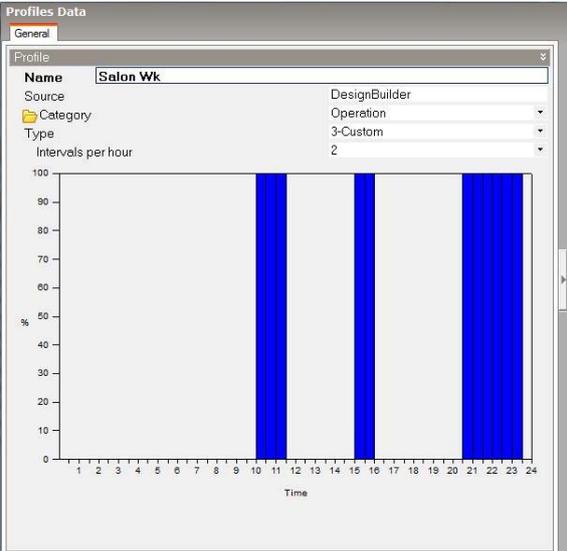


Figure 73 : DesignBuilder - Activity - Planning Salon Week-end

vii. Les Locaux Techniques

Les températures consignes appliquées aux Locaux Techniques sont les mêmes que celles de l'Entrée (Figure 74). L'occupation y est considérée comme négligeable, comme pour le Garage (Figure 75).

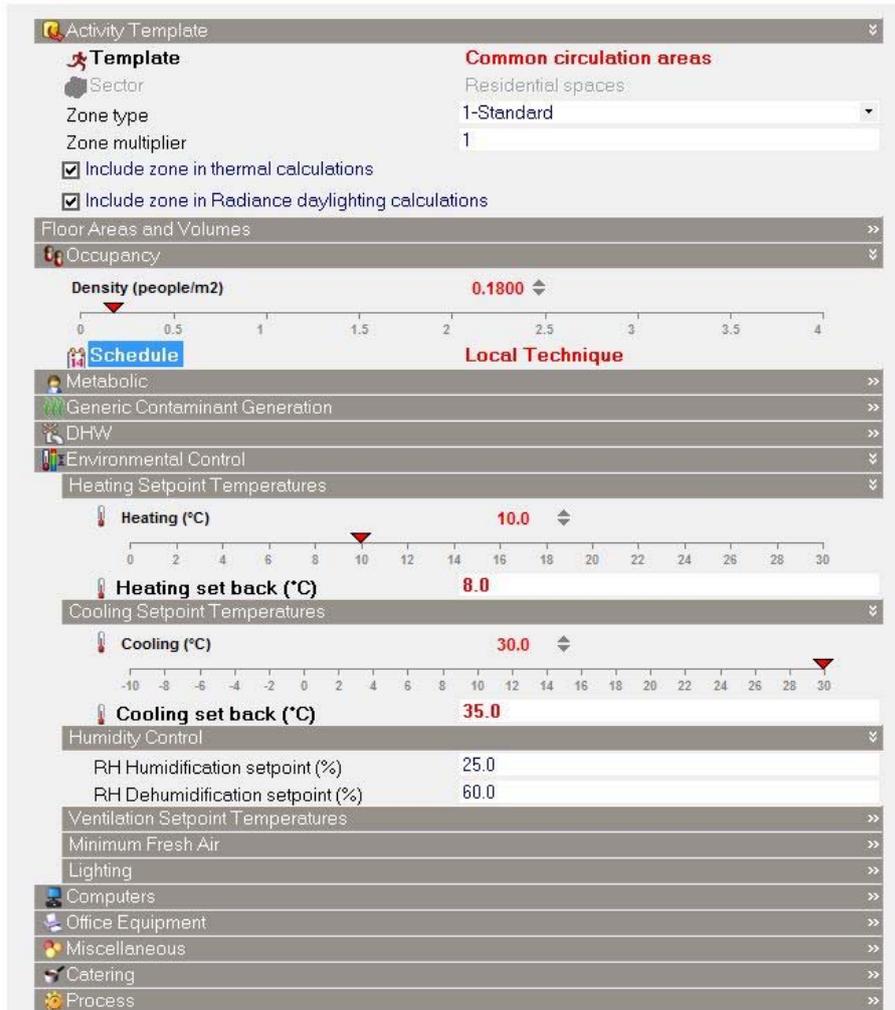


Figure 74 : DesignBuilder - Activity - Locaux Techniques

Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Feb	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Mar	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Apr	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
May	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Jun	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Jul	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Aug	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Sep	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Oct	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Nov	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Dec	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off

Figure 75 : DesignBuilder - Activity - Planning Locaux Techniques

viii. Les Escaliers et Circulations

L'espace du Rez-De-Chaussée étant ouvert au-delà de l'entrée, les températures consignes appliquées aux escaliers et circulations sont les mêmes que pour les pièces principales sur lesquelles ils sont ouverts (Figure 76). J'ai considéré qu'ils étaient occupés en moyenne 1h par jour (Figure 77).

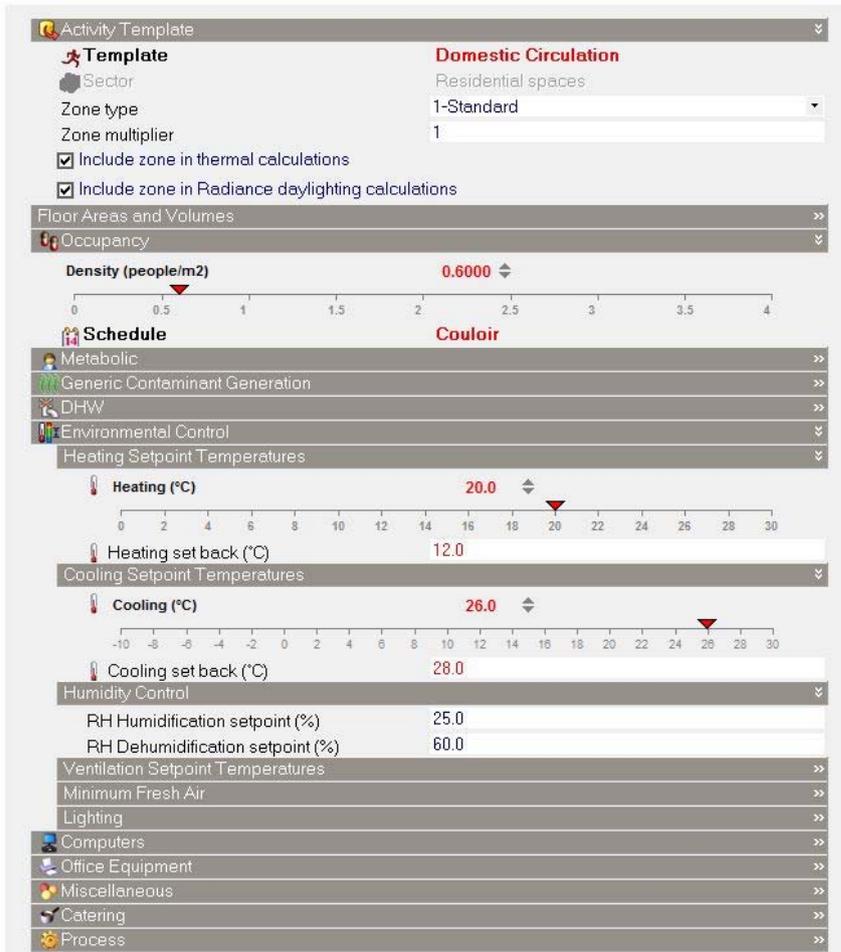


Figure 76 : DesignBuilder - Activity - Circulations

Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Feb	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Mar	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Apr	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
May	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Jun	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Jul	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Aug	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Sep	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Oct	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Nov	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Dec	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30

Figure 77 : DesignBuilder - Activity - Planning Circulations

Les heures indiquées sur la Figure 77 servent à modéliser une occupation moyenne d'1h par jour et mais ne correspondent pas aux périodes réelles d'occupation des lieux.

ix. La Salle de Bain

La Salle de Bain étant une pièce où l'on se trouve généralement moins vêtu que dans les autres pièces de la maison, j'y ai appliqué une température de chauffage légèrement plus élevée que dans les pièces principales (Figure 78). J'ai considéré qu'elle était occupée en moyenne 1h par jour (Figure 79).

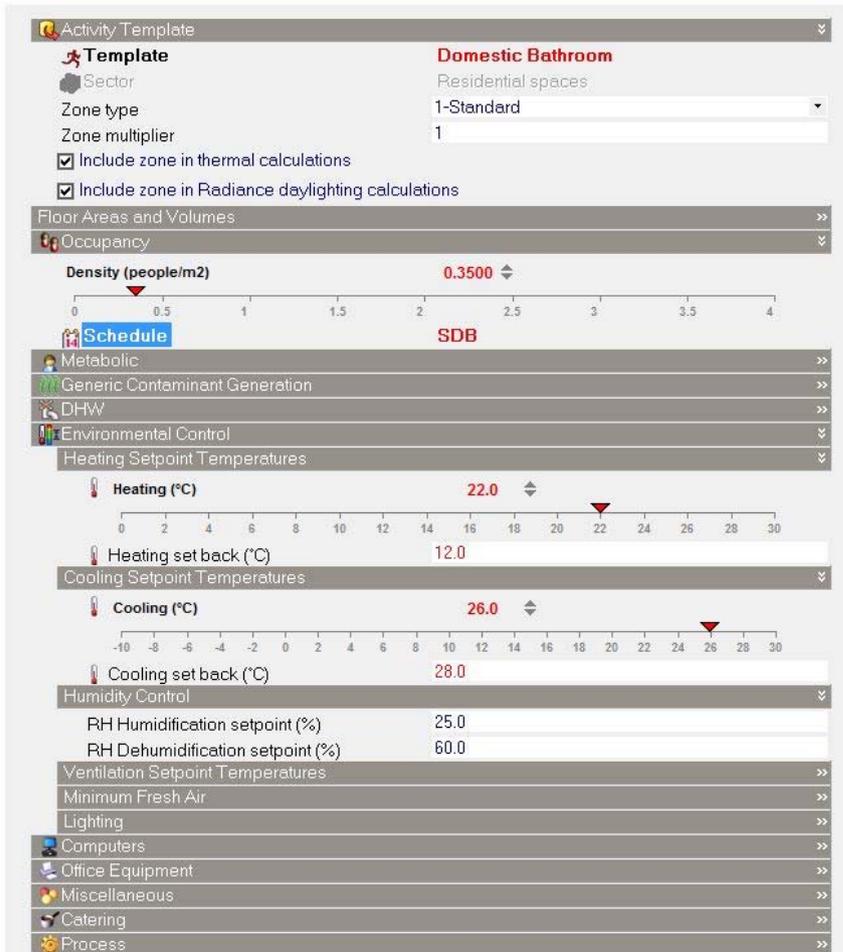


Figure 78 : DesignBuilder - Activity - Salle de Bain

Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Feb	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Mar	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Apr	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
May	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Jun	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Jul	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Aug	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Sep	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Oct	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Nov	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30
Dec	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30	12:30 - 13:30

Figure 79 : DesignBuilder - Activity - Planning Salle de Bain

Les heures indiquées sur la Figure 79 servent à modéliser une occupation moyenne d'1h par jour et mais ne correspondent pas aux périodes réelles d'occupation des lieux.

x. Les Chambres

Les chambres sont chauffées comme les pièces principales de la maison (Figure 80). J'ai considéré qu'elles étaient occupées la nuit avec un léger décalage entre la semaine et les week-ends (Figure 81, Figure 82 et Figure 83).

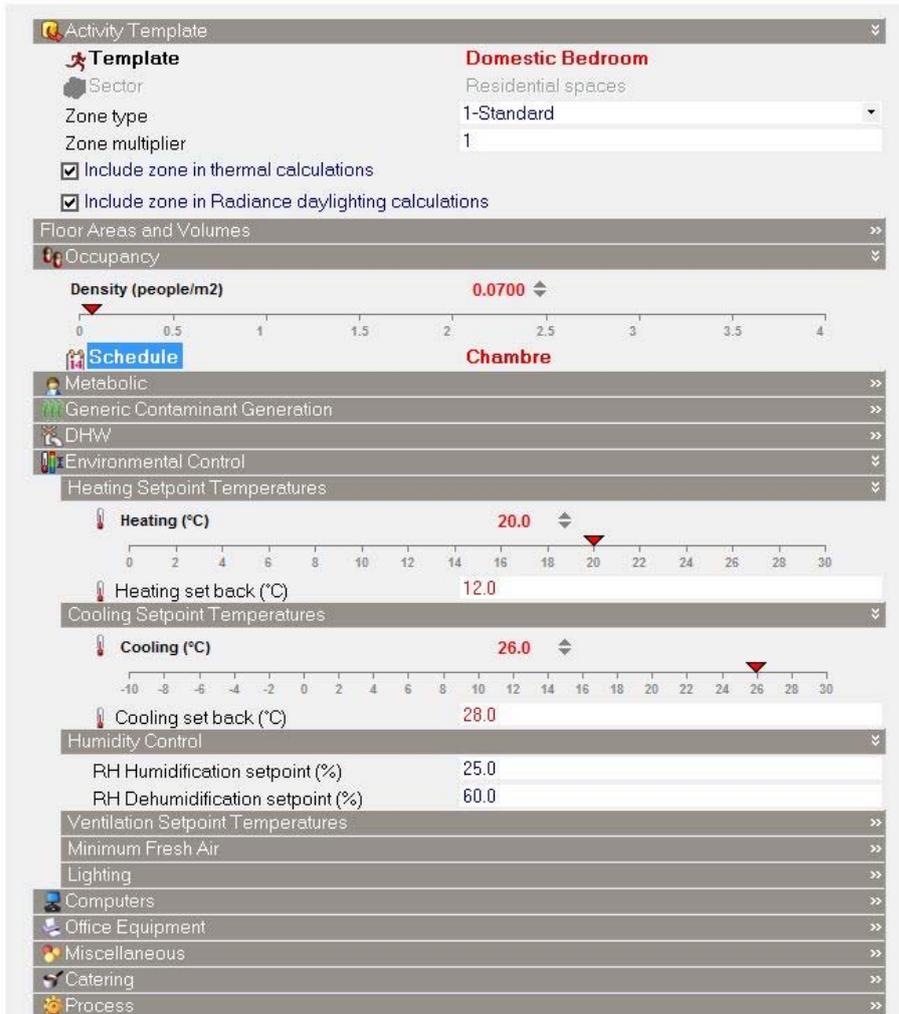


Figure 80 : DesignBuilder - Activity - Chambres

Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Chambre Occupation Semaine	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occupation Wk	Chambre Occ...
Feb	Chambre Occupation Semaine	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occupation Wk	Chambre Occ...
Mar	Chambre Occupation Semaine	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occupation Wk	Chambre Occ...
Apr	Chambre Occupation Semaine	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occupation Wk	Chambre Occ...
May	Chambre Occupation Semaine	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occupation Wk	Chambre Occ...
Jun	Chambre Occupation Semaine	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occupation Wk	Chambre Occ...
Jul	Chambre Occupation Semaine	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occupation Wk	Chambre Occ...
Aug	Chambre Occupation Semaine	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occupation Wk	Chambre Occ...
Sep	Chambre Occupation Semaine	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occupation Wk	Chambre Occ...
Oct	Chambre Occupation Semaine	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occupation Wk	Chambre Occ...
Nov	Chambre Occupation Semaine	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occupation Wk	Chambre Occ...
Dec	Chambre Occupation Semaine	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occ...	Chambre Occupation Wk	Chambre Occ...

Figure 81 : DesignBuilder - Activity - Planning Chambres

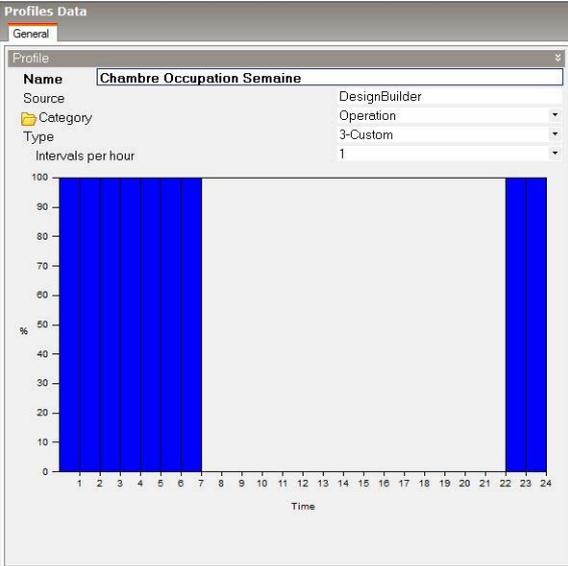


Figure 82 : DesignBuilder - Activity - Planning Chambres Semaine

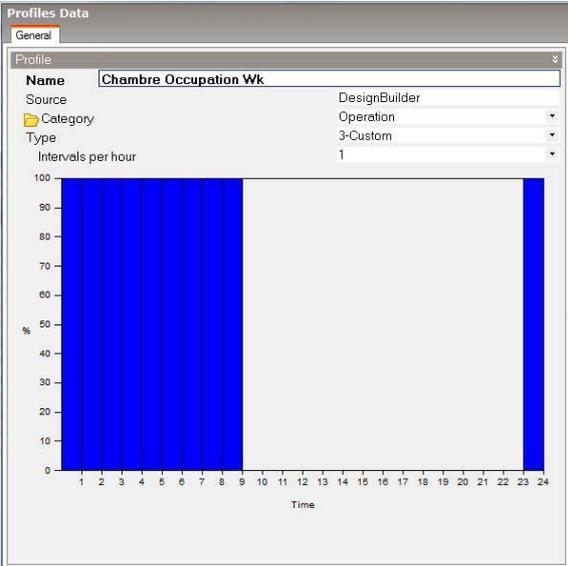


Figure 83 : DesignBuilder - Activity - Planning Chambres Week-End

g) Eclairage et Planning

Pour la plupart des pièces, j'ai fait l'hypothèse qu'elles pouvaient être éclairées lors de leur période d'occupation. Cela signifie que pour ces pièces DesignBuilder considère que les lampes y sont allumées s'il n'y a pas assez de lumière naturelle dans les périodes définies.

Les seules exceptions sont les pièces de type « chambre » qui doivent être éteintes lorsque leurs occupants dorment (Figure 84, Figure 85 et Figure 86).

General							
Name	Chambre Eclairage						
Description							
Source	UK NCM						
Category	Residential spaces						
Region	General						
Schedule type	1-7/12 Schedule						
Design Days							
Design day definition method	1-End use defaults						
Use end-use default	2-Occupancy						
Profiles							
Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Chambre Eclairage Se...	Chambre Eclairage Wk	Chambre Eclairage Wk				
Feb	Chambre Eclairage Se...	Chambre Eclairage Wk	Chambre Eclairage Wk				
Mar	Chambre Eclairage Se...	Chambre Eclairage Wk	Chambre Eclairage Wk				
Apr	Chambre Eclairage Se...	Chambre Eclairage Wk	Chambre Eclairage Wk				
May	Chambre Eclairage Se...	Chambre Eclairage Wk	Chambre Eclairage Wk				
Jun	Chambre Eclairage Se...	Chambre Eclairage Wk	Chambre Eclairage Wk				
Jul	Chambre Eclairage Se...	Chambre Eclairage Wk	Chambre Eclairage Wk				
Aug	Chambre Eclairage Se...	Chambre Eclairage Wk	Chambre Eclairage Wk				
Sep	Chambre Eclairage Se...	Chambre Eclairage Wk	Chambre Eclairage Wk				
Oct	Chambre Eclairage Se...	Chambre Eclairage Wk	Chambre Eclairage Wk				
Nov	Chambre Eclairage Se...	Chambre Eclairage Wk	Chambre Eclairage Wk				
Dec	Chambre Eclairage Se...	Chambre Eclairage Wk	Chambre Eclairage Wk				

Figure 84 : DesignBuilder - Lighting - Planning Chambres

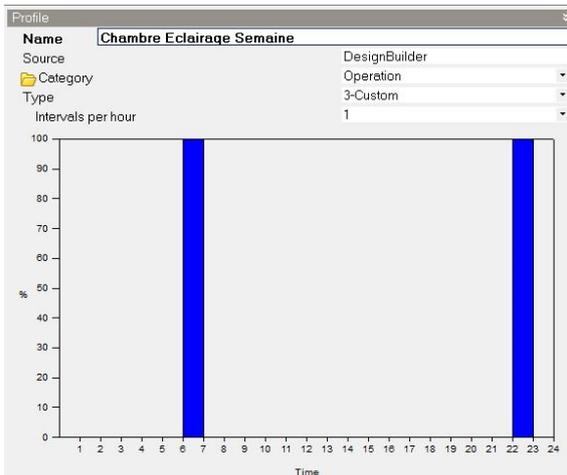


Figure 85 : DesignBuilder - Lighting - Planning Chambres Semaine

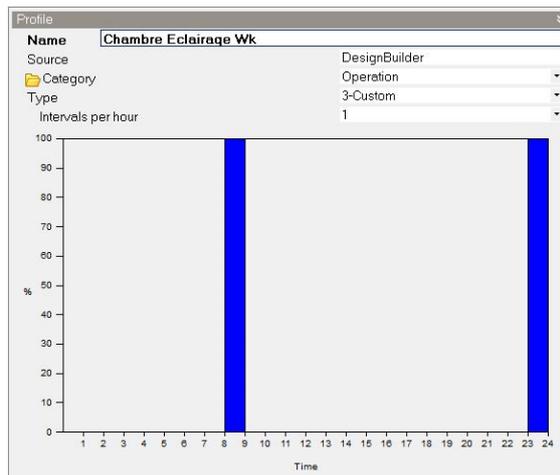


Figure 86 : DesignBuilder - Lighting - Planning Chambres Week-End

h) HVAC

i. Ventilation Mécanique

La maison comporte un système de ventilation double-flux de type D associé à un récupérateur de chaleur (Meester, 2008, p. 35). Celui-ci fonctionne toute l'année (Figure 87 et Figure 88).

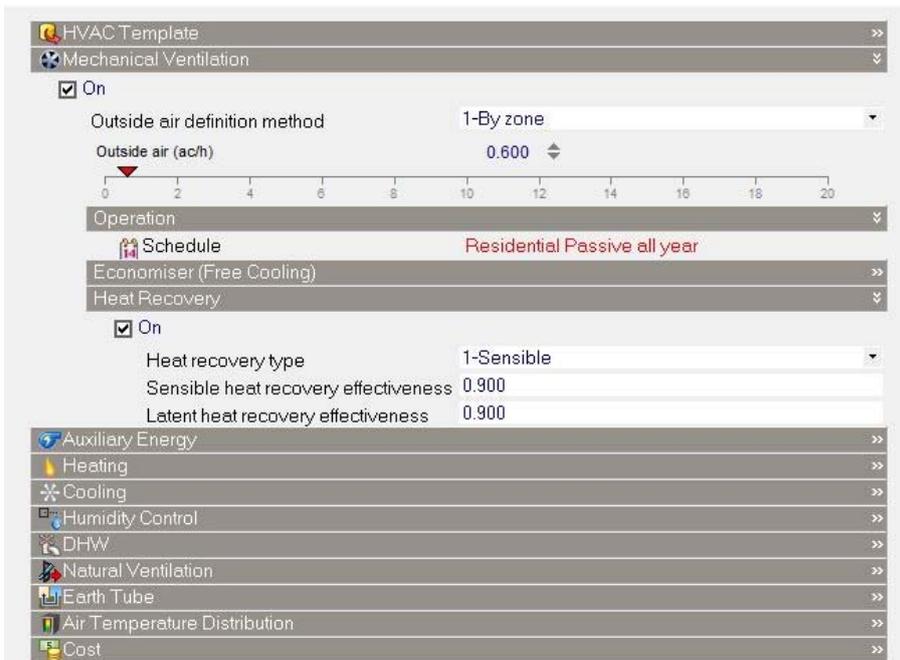


Figure 87 : DesignBuilder - HVAC - Ventilation mécanique

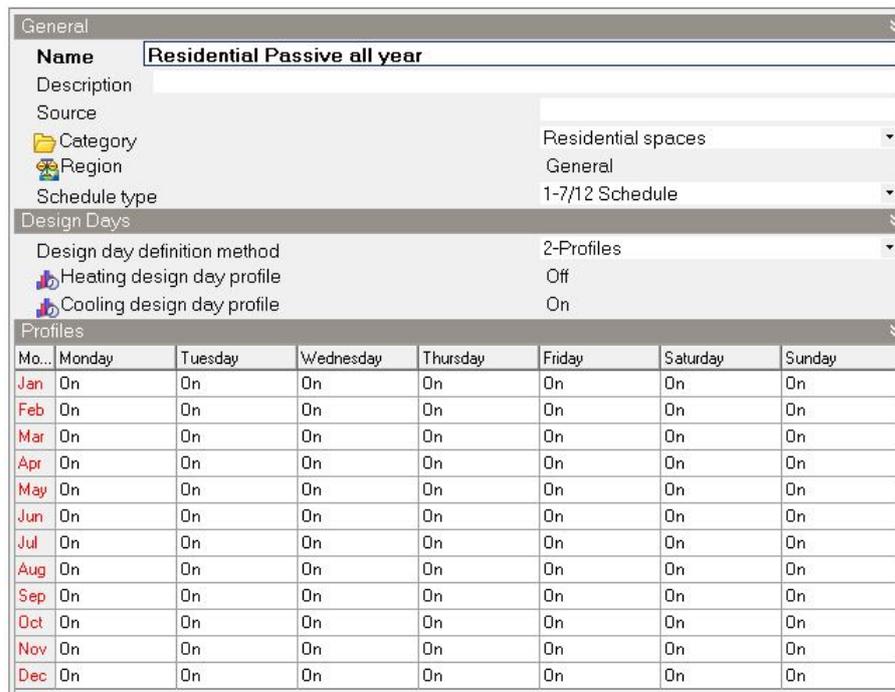


Figure 88 : DesignBuilder - HVAC - Planning Ventilation mécanique

ii. Chauffage et Refroidissement

La maison est chauffée par un poêle à pellets qui se trouve sous l'escalier du Rez-De-Chaussée. Parmi les propositions de DesignBuilder, j'ai choisi le modèle de Biomass qui me semblait le plus représentatif des caractéristiques de ce poêle.

J'ai également considéré dans mon modèle que le Garage, l'Entrée, les Toilettes et les Locaux Techniques étaient des espaces non chauffés, alors que toutes les autres pièces étaient chauffées d'Octobre à Avril (Figure 89 et Figure 90). Nous notons que la maison ne comporte pas de système de climatisation.



Figure 89 : DesignBuilder - HVAC - Chauffage et Refroidissement

General							
Name	Residential Passive all year except summer						
Description							
Source							
Category	Residential spaces						
Region	General						
Schedule type	1-7/12 Schedule						
Design Days							
Design day definition method	2-Profiles						
Heating design day profile	Off						
Cooling design day profile	On						
Profiles							
Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	On	On	On	On	On	On	On
Feb	On	On	On	On	On	On	On
Mar	On	On	On	On	On	On	On
Apr	On	On	On	On	On	On	On
May	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Jun	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Jul	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Aug	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Sep	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Oct	On	On	On	On	On	On	On
Nov	On	On	On	On	On	On	On
Dec	On	On	On	On	On	On	On

Figure 90 : DesignBuilder - HVAC - Planning Chauffage

iii. Ventilation Naturelle

J'ai considéré que la ventilation naturelle était libre et donc possible toute l'année (Figure 91 et Figure 92).

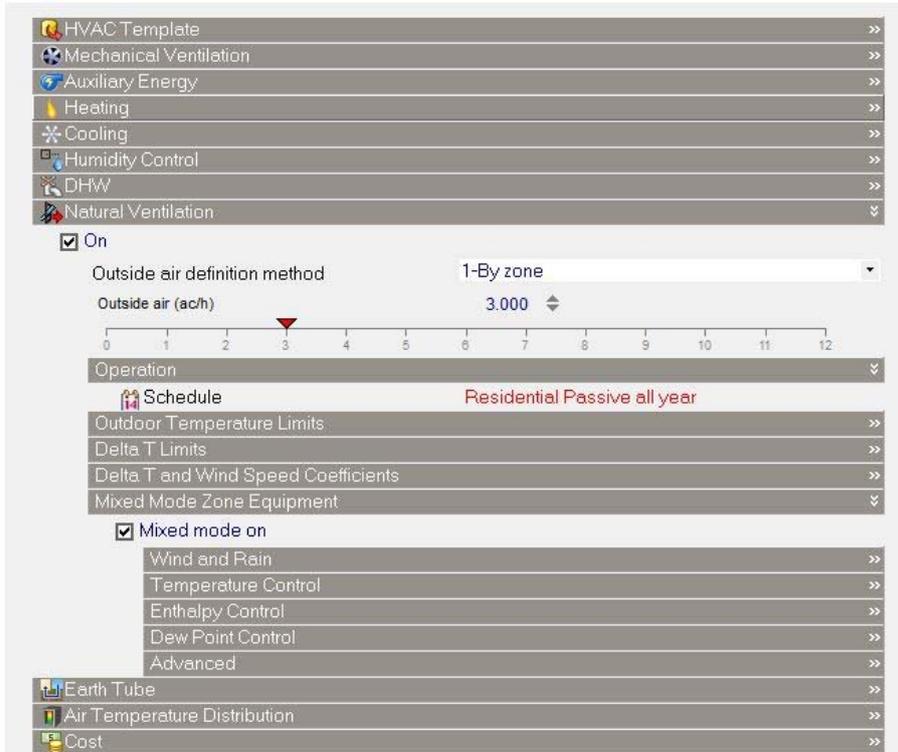


Figure 91 : DesignBuilder - HVAC - Ventilation naturelle

General							
Name	Residential Passive all year						
Description							
Source							
Category	Residential spaces						
Region	General						
Schedule type	1-7/12 Schedule						
Design Days							
Design day definition method	2-Profiles						
Heating design day profile	Off						
Cooling design day profile	On						
Profiles							
Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	On	On	On	On	On	On	On
Feb	On	On	On	On	On	On	On
Mar	On	On	On	On	On	On	On
Apr	On	On	On	On	On	On	On
May	On	On	On	On	On	On	On
Jun	On	On	On	On	On	On	On
Jul	On	On	On	On	On	On	On
Aug	On	On	On	On	On	On	On
Sep	On	On	On	On	On	On	On
Oct	On	On	On	On	On	On	On
Nov	On	On	On	On	On	On	On
Dec	On	On	On	On	On	On	On

Figure 92 : DesignBuilder - HVAC - Planning Ventilation naturelle

iv. Puits Canadien

La maison est dotée d'un puits canadien (Figure 93 et Figure 94).

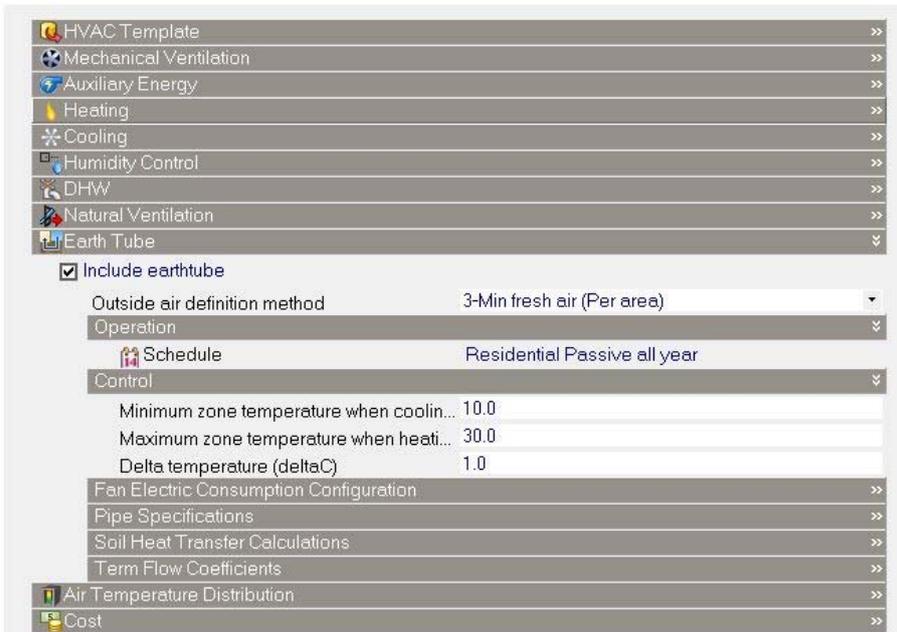


Figure 93 : DesignBuilder - HVAC - Puits canadien

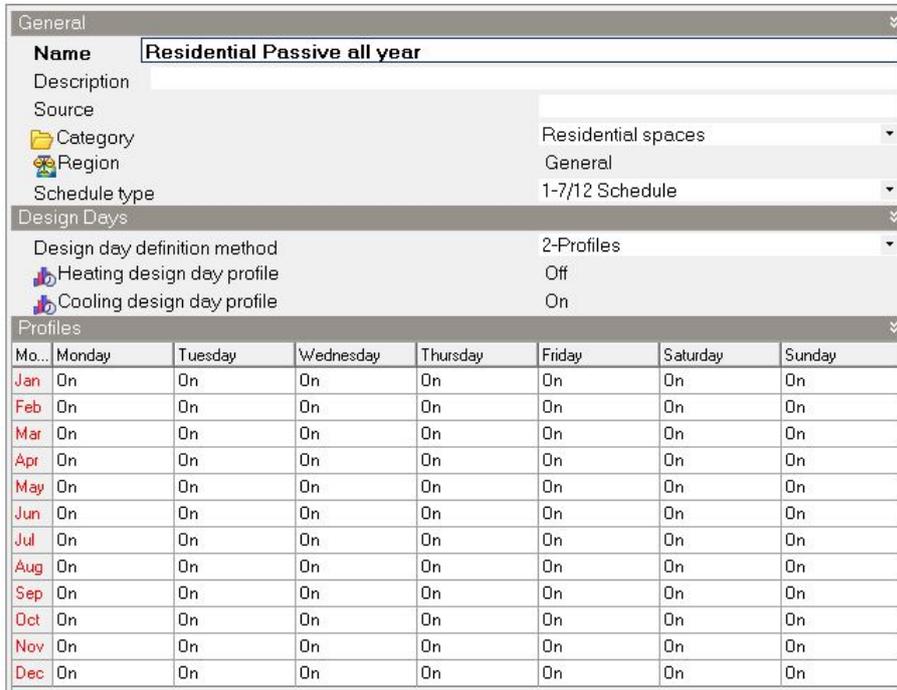


Figure 94 : DesignBuilder - HVAC - Planning Puits canadien

Un puits canadien (Figure 95) offre deux avantages majeurs en termes de confort thermique et économie d'énergie :

- En hiver, lorsque le sol extérieur est plus chaud que l'air extérieur, l'air est préchauffé avant d'être pulsé dans le système de ventilation.
- En été, lorsque le sol extérieur est plus froid que l'air extérieur, l'air est rafraîchi avant d'être pulsé dans le système de ventilation.

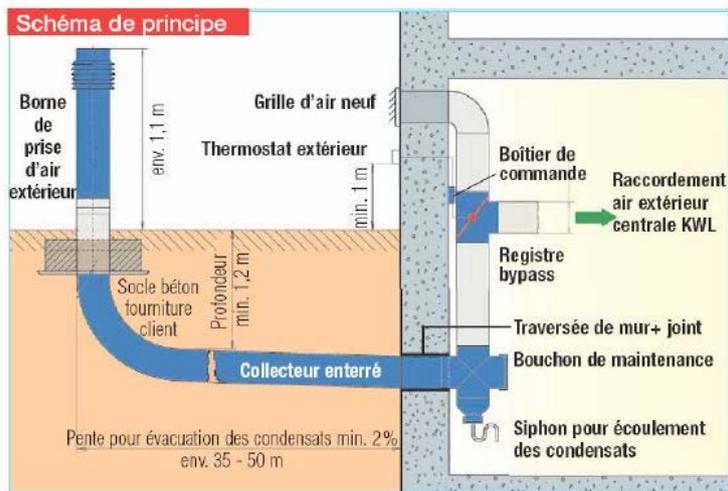


Figure 95 : Schéma de principe d'un puits canadien (Meester, 2008, p. 42)

7) Calibration du Modèle

Le modèle que j'ai créé a nécessité plusieurs itérations de mise au point pour obtenir des résultats cohérents.

Pour le calibrer je me suis basée sur trois critères caractéristiques d'une maison passive que je comptais étudier par la suite :

- La Surchauffe
- La Consommation énergétique en Chauffage
- La Consommation énergétique totale

J'ai considéré qu'à « l'état initial », c'est-à-dire avec le climat « actuel » des années 2000, la maison devait respecter les standards passifs.

Ce qui signifie que la surchauffe ne devait pas excéder les 5% par an soit 438h/an, la consommation énergétique en chauffage 15kWh/m².an et la consommation énergétique totale 42 kWh/m².an.

Dans ma première modélisation, aucun de ces critères n'était respecté. J'ai commencé par m'intéresser à la surchauffe. J'ai étudié les éléments du modèle que je n'avais pas encore paramétré et qui pouvaient être à l'origine de cette différence. C'est ainsi que j'ai notamment précisé les plannings d'occupation, d'éclairage, de ventilation et de chauffage, notant que le logiciel laissait par défaut des plannings qui n'avaient pas de sens. J'ai également retiré les équipements de bureaux et ordinateurs des pièces où ils étaient présents sans logique.

J'ai alors réussi à obtenir une valeur de surchauffe correcte, presque idéale. Les consommations énergétiques restaient malgré tout incohérentes (Tableau 21).

Tableau 21 : Calibration du Modèle - 2e Essai

Critères	H2 : Confort moyen (20°C<T<26°C ; 25%<H<60%)		
	Surchauffe (h/an)	Chauffage (kWh/m ² .an)	Consommation totale (kWh/m ² .an)
Passifs	438	15	42
2010	97	81,84	108,41
2100 - A1B	645	67,1	93,67
2100 - A2	780	65,09	91,65
2100 - B1	297	74,59	101,16

J'ai alors cherché à réduire ces consommations énergétiques étonnantes. Je me suis principalement intéressée au chauffage puisque celui-ci semblait être à l'origine de « l'erreur » dans la consommation totale.

J'ai alors précisé l'efficacité des différents systèmes (poêle à pellets 94% (Région Wallone, 2004, p. 2), récupérateur de chaleur 90%, ...) et changer la méthode de calcul de l'impact du puits canadien.

J'ai ainsi obtenu des valeurs énergétiques cohérentes, mais ai constaté en retour une augmentation drastique des valeurs de surchauffe (Tableau 22).

Tableau 22 : Calibration - 3e Essai

Critères	H2 : Confort moyen (20°C<T<26°C ; 25%<H<60%)		
	Surchauffe (h/an)	Chauffage (kWh/m ² .an)	Consommation totale (kWh/m ² .an)
Passifs	438	15	42
2010	876	15,4	32
2100 - A1B	1955	12,4	28,9
2100 - A2	2090	12,1	28,6
2100 - B1	1471	13,8	30,3

J'ai alors ajouté aux fenêtres les auvents qui étaient supposés les surplomber, auvents jusqu'ici ignorés car ils n'existent pas sur la maison telle qu'elle a été construite. Pourtant, ils sont nécessaires à la validation de la maison en tant que « maison passive » et dans son modèle, Tatiana de Meester (2008) les prend en compte. Je les ai donc mis en place sur les fenêtres concernées, c'est-à-dire celles des façades Sud et Ouest. Ce dernier ajustement m'a permis cette fois-ci d'obtenir des résultats cohérents (Tableau 23).

Tableau 23 : Calibration - Modèle final

Critères	H2 : Confort moyen (20°C<T<26°C ; 25%<H<60%)		
	Surchauffe (h/an)	Chauffage (kWh/m ² .an)	Consommation totale (kWh/m ² .an)
Passifs	438	15	42
2010	339	16,6	33,1
2100 - A1B	1270	13,2	29,7
2100 - A2	1497	12,9	29,4
2100 - B1	790	14,8	31,3

J'ai considéré que la différence entre les 16,6kWh/m².an obtenus et les 15kWh/m².an attendus était acceptable.

8) Bilan de la méthodologie

L'étude réalisée ici a nécessité l'utilisation de plusieurs logiciels notamment pour intégrer différents éléments tels que le modèle initial, le climat et les critères d'une maison passive. Si elle n'a pas été basée sur un protocole déjà utilisé, elle a cependant été faite de manière systématique, en suivant la logique de modélisation des logiciels. La méthode appliquée est ainsi reproductible pour un autre modèle de bâtiment, situé ailleurs dans le monde.

La méthodologie mise en place au cours de ce travail a donc été basée sur une approche rigoureuse et multi-critère avec l'objectif de produire des résultats inédits.

Chapitre 4 : Résultats obtenus

Pour l'observation des trois scénarios d'utilisation de l'habitation, j'ai défini et suivi le même déroulé d'étude de l'impact du réchauffement climatique sur différents critères. J'ai appliqué successivement 3 scénarios d'évolution climatique à savoir A1B, A2, B1 pour 2100, scénarios précédemment décrits au Chapitre 3 – 3) Détails des modèles climatiques. Pour chaque cas étudié, seront rappelées les conditions prises en compte, l'hypothèse d'utilisation, le critère analysé, le scénario climat appliqué d'une part et les résultats observés illustrés par un graphe marquant l'évolution du critère dans ces conditions sur une année et le résultat moyen obtenu sur la période 2010 à 2100, d'autre part.

Les températures consignes et températures résultats sont des températures opératives (cf p32). Ce qui m'a amené à configurer le logiciel de façon à prendre en compte l'option température opérative (Figure 96) pour les températures consignes et sélectionner les températures opératives parmi les résultats obtenus.

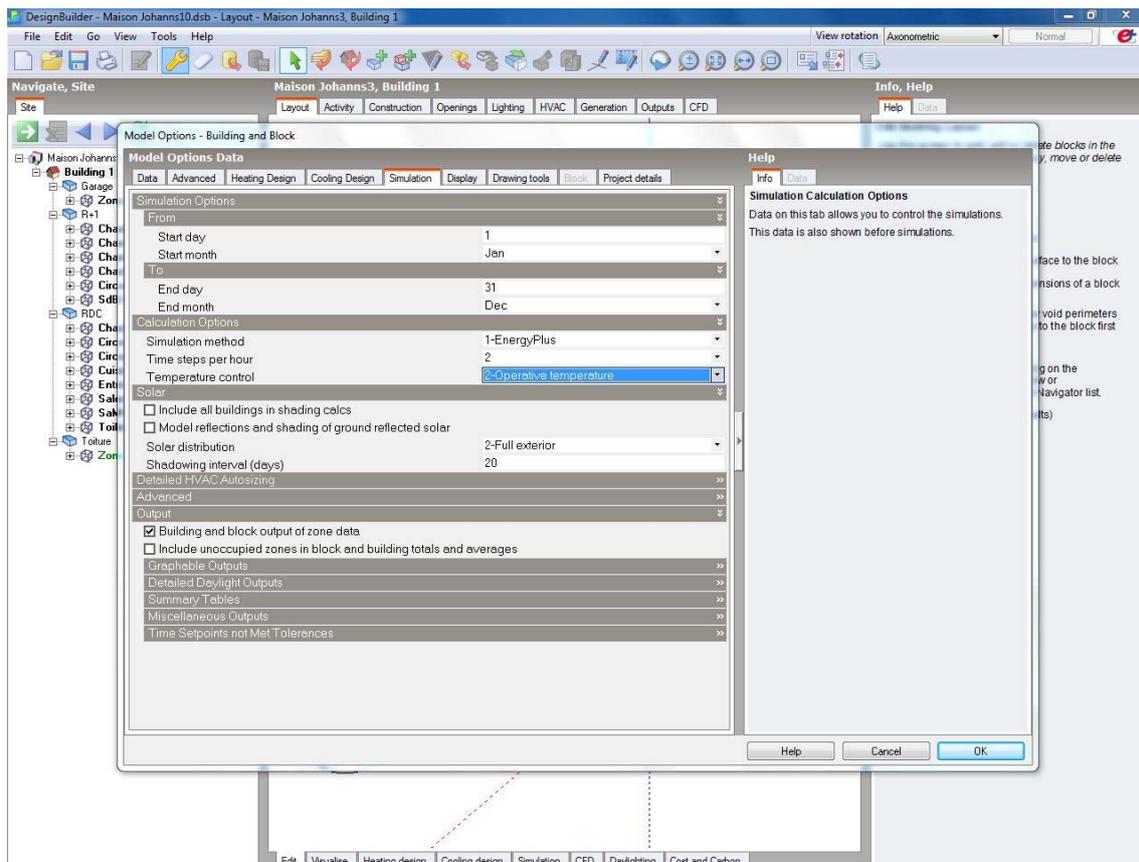


Figure 96 : DesignBuilder - Options - Température opérative

1) Hypothèse 1 : Scénario de confort optimal (H1)

Ce premier scénario d'utilisation de l'habitation a pour but de simuler un confort thermique intérieur « optimal ». Les températures consignes appliquées (Figure 97) correspondent à la 1^{ère} catégorie d'habitation de la norme NBN EN 15251 (Tableau 18). Elles sont généralement utilisées en cas de présence de personnes particulièrement sensibles aux températures telles que des enfants en bas âge ou des personnes âgées.



Figure 97 : DesignBuilder - Scénario H1 – Consignes

a) Confort thermique

J'ai commencé par étudier l'impact du réchauffement climatique sur le confort thermique intérieur.

Simulation 1 :

- ✓ Hypothèse : H1
- ✓ Critère : Confort thermique intérieur
- ✓ Scénario climatique : A1B pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 98, l'évolution de la température intérieure sur une année.
- Résultat entre 2010-2100 : augmentation moyenne de 0,9°C de la température intérieure

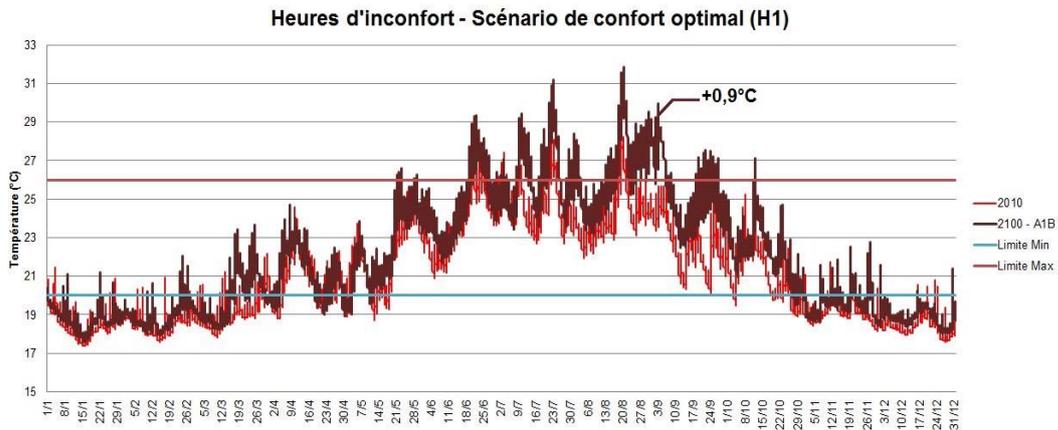


Figure 98 : Scénario H1 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur A1B

Simulation 2 :

- ✓ Hypothèse : H1
- ✓ Critère : Confort thermique intérieur
- ✓ Scénario climatique : A2 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 99, l'évolution de la température intérieure sur une année.
- Résultat entre 2010-2100 : augmentation moyenne de 1,1°C de la température intérieure

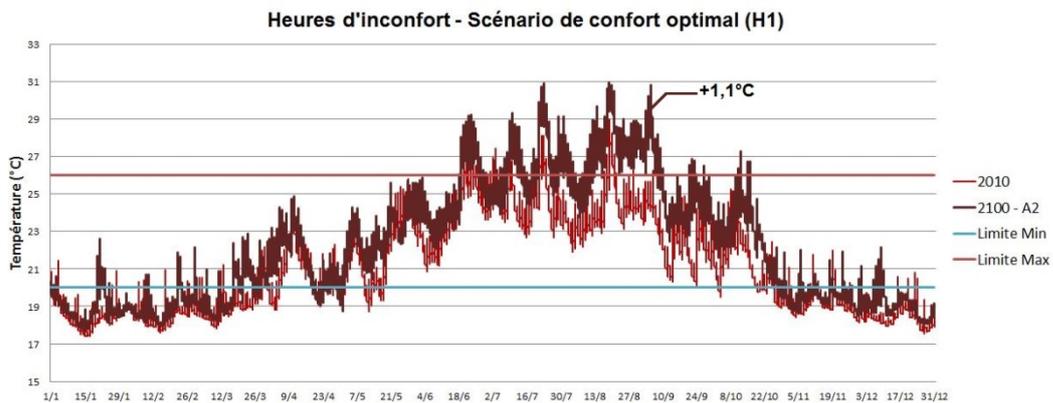


Figure 99 : Scénario H1 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur A2

Simulation 3 :

- ✓ Hypothèse : H1
- ✓ Critère : Confort thermique intérieur

- ✓ Scénario climatique : B1 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 100, l'évolution de la température intérieure sur une année.
- Résultat entre 2010-2100 : augmentation moyenne de 0,4°C de la température intérieure

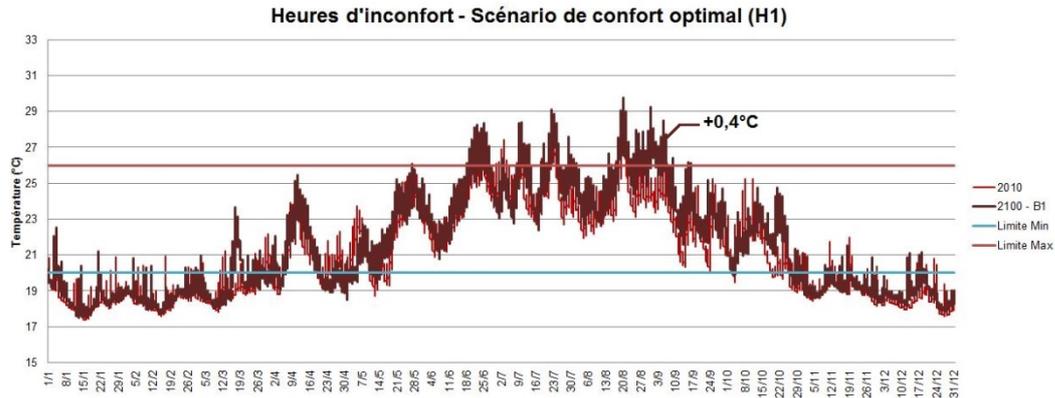


Figure 100 : Scénario H1 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur B1

Ces différentes simulations m'ont permis d'obtenir le nombre total d'heures de surchauffe sur une année pour chacun de ces scénarios climatiques (Figure 101). Dans les trois scénarios étudiés, le critère des 5% maximal de surchauffe (438h/an) d'une « maison passive » est largement dépassé.

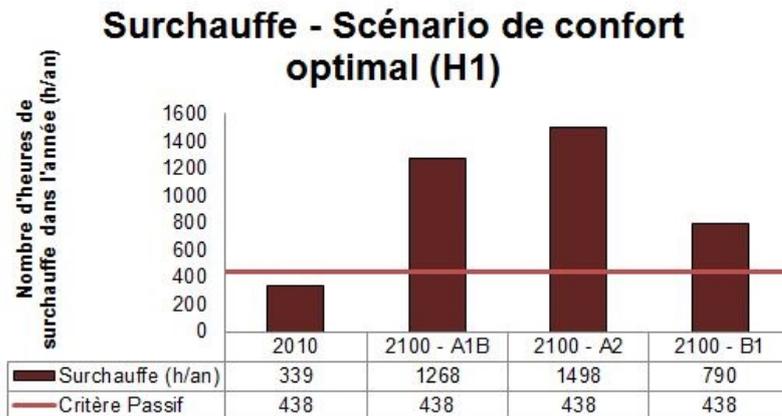


Figure 101 : Scénario H1 – Nombre d'heures de surchauffe dans l'année

b) Consommation énergétique

Je me suis ensuite intéressée à l'impact du réchauffement climatique sur la consommation énergétique.

i. Chauffage

Tout d'abord, j'ai étudié la consommation énergétique réalisée en termes de chauffage.

Simulation 1 :

- ✓ Hypothèse : H1
- ✓ Critère : Consommation énergétique en chauffage
- ✓ Scénario climatique : A1B pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 102, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 13% de la consommation

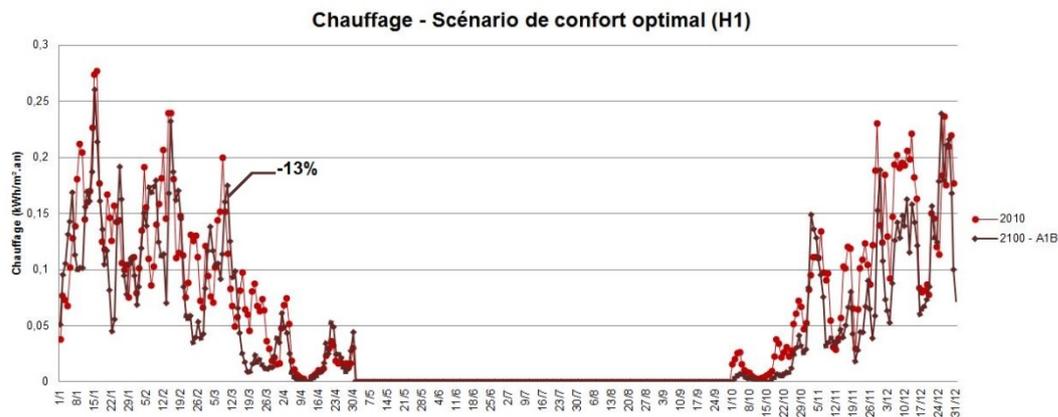


Figure 102 : Scénario H1 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur A1B

Simulation 2 :

- ✓ Hypothèse : H1
- ✓ Critère : Consommation énergétique en chauffage
- ✓ Scénario climatique : A2 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 103, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 15% de la consommation

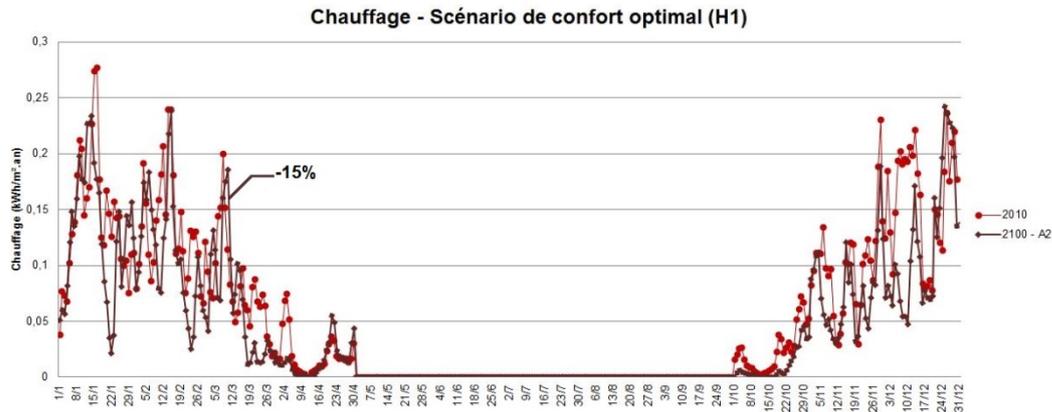


Figure 103 : Scénario H1 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur A2

Simulation 3 :

- ✓ Hypothèse : H1
- ✓ Critère : Consommation énergétique en chauffage
- ✓ Scénario climatique : B1 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 104, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : pas de changement dans la consommation moyenne

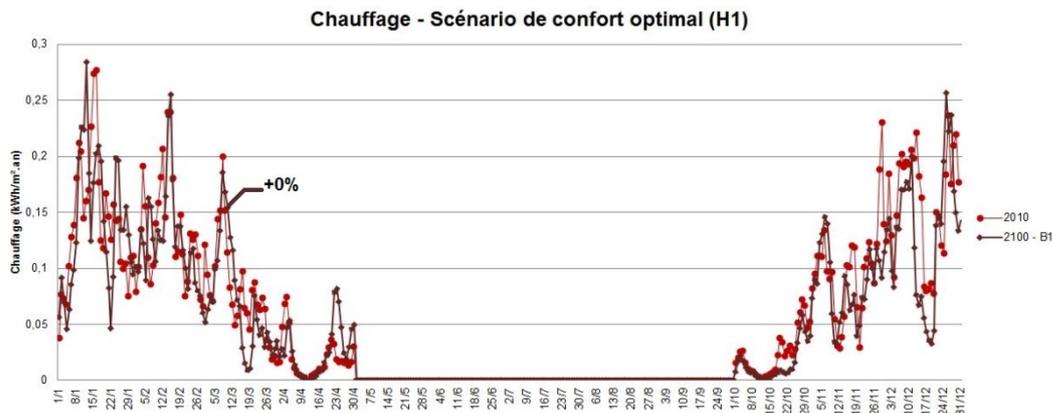


Figure 104 : Scénario H1 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur B1

A partir de ces différentes simulations j'ai calculé consommation annuelle en chauffage par m² pour chacun de ces scénarios climatiques (Figure 105). Dans ce cas particulier d'utilisation de l'habitation, pour les trois scénarios climatiques futurs, la consommation énergétique en chauffage annuelle par m² se rapproche du critère passif à respecter (15kWh/m².an).

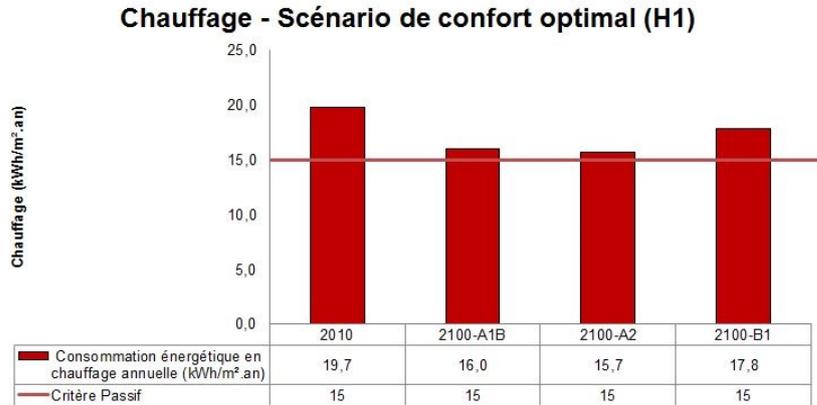


Figure 105 : Scénario H1 - Consommation énergétique en chauffage totale dans l'année

ii. Totale

J'ai ensuite étudié la consommation énergétique totale de la maison.

Simulation 1 :

- ✓ Hypothèse : H1
- ✓ Critère : Consommation énergétique totale
- ✓ Scénario climatique : A1B pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 106, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 6% de la consommation

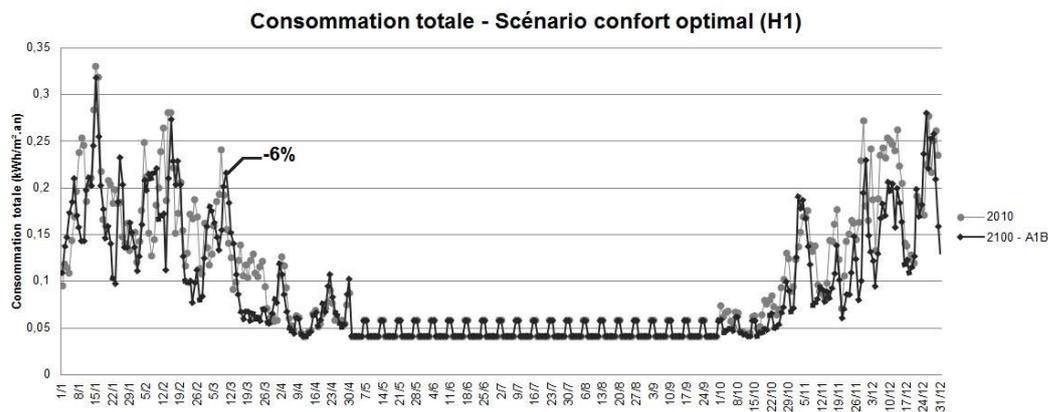


Figure 106 : Scénario H1 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur A1B

Simulation 2 :

- ✓ Hypothèse : H1
- ✓ Critère : Consommation énergétique totale
- ✓ Scénario climatique : A2 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 107, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 7% de la consommation

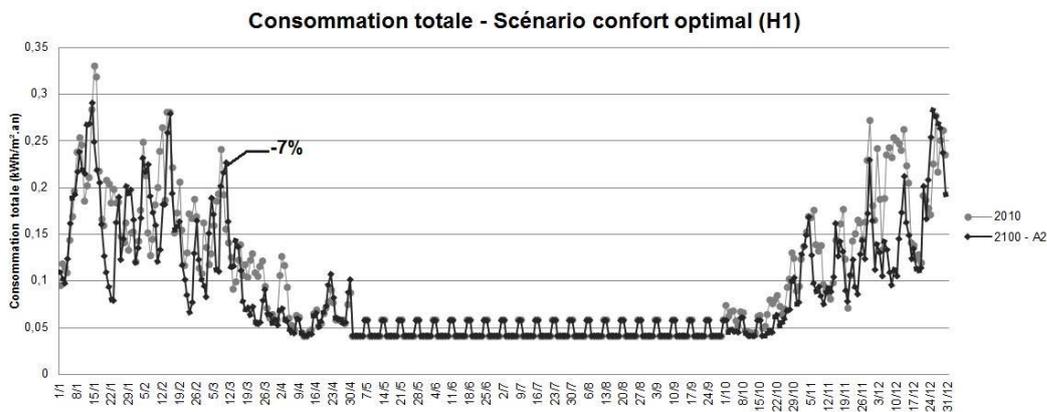


Figure 107 : Scénario H1 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur A2

Simulation 3 :

- ✓ Hypothèse : H1
- ✓ Critère : Consommation énergétique totale
- ✓ Scénario climatique : B1 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 108, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 2% de la consommation

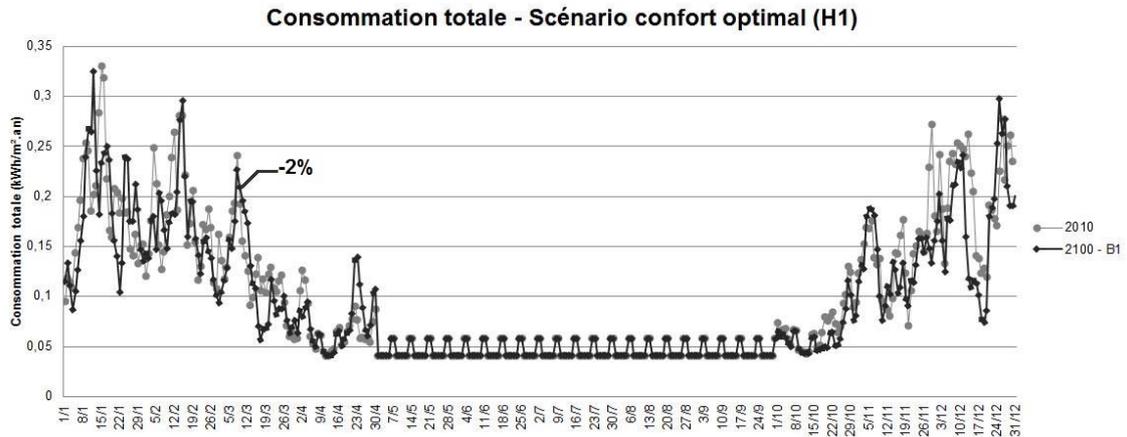


Figure 108 : Scénario H1 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur B1

Sur la Figure 109, qui présente la consommation énergétique totale de la maison par m² sur une année, on remarque que le critère passif (42kWh/m².an) est respecté dans tous les scénarios.

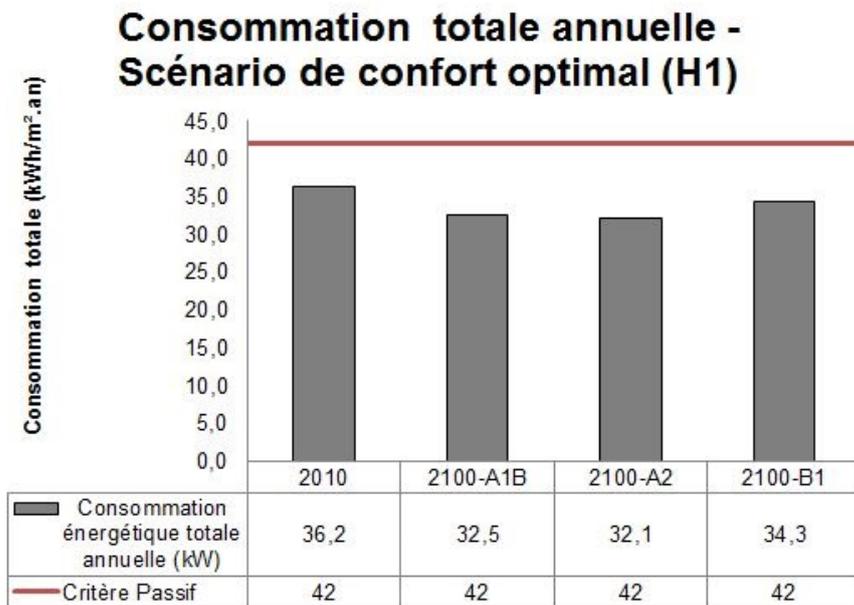


Figure 109 : Scénario H1 - Consommation énergétique totale dans l'année

2) Hypothèse 2 : Scénario de confort intermédiaire (H2)

Ce deuxième scénario d'utilisation de l'habitation a pour but de simuler un confort thermique intérieur « intermédiaire ». Les températures consignes appliquées (Figure 110) correspondent à la 2^e catégorie d'habitation de la norme NBN EN 15251 (Tableau 18). Ces consignes doivent être respectées dans le cas d'un bâtiment neuf. C'est probablement le scénario d'utilisation le plus cohérent avec le profil de la maison. C'est pourquoi je me suis basée sur cette hypothèse pour calibrer le modèle (Calibration du Modèle p69).

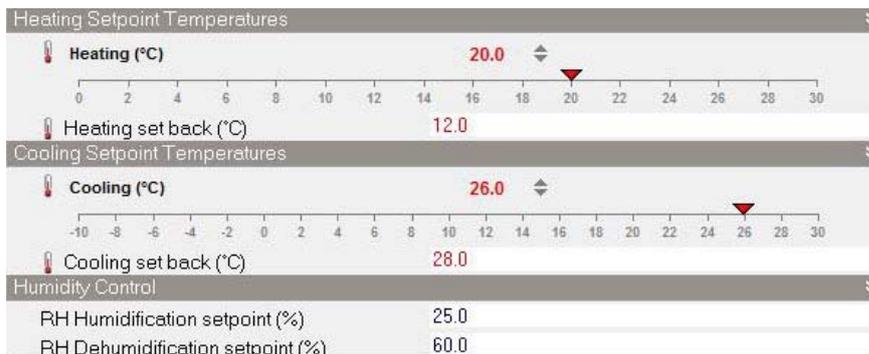


Figure 110 : DesignBuilder - Scénario H2 - Consignes

a) Confort thermique

J'ai commencé par étudier l'impact du réchauffement climatique sur le confort thermique intérieur.

Simulation 1 :

- ✓ Hypothèse : H2
- ✓ Critère : Confort thermique intérieur
- ✓ Scénario climatique : A1B pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 111, l'évolution de la température intérieure sur une année.
- Résultat entre 2010-2100 : augmentation moyenne de 1,0°C de la température intérieure

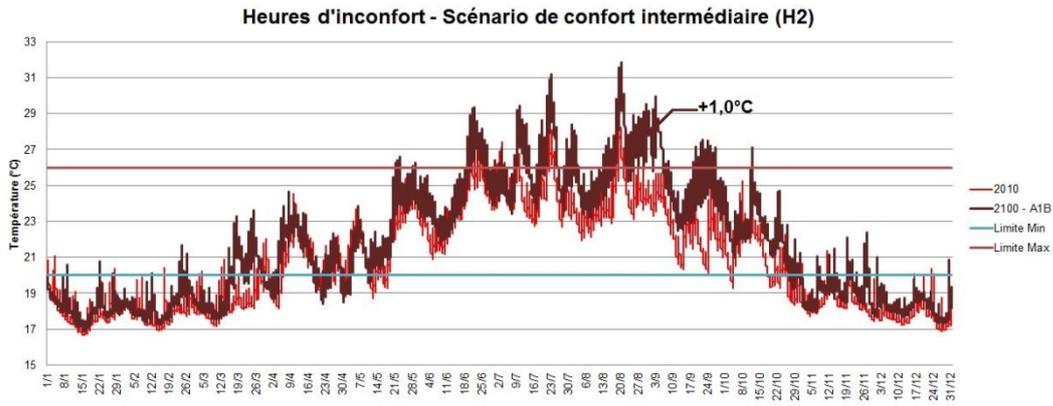


Figure 111 : Scénario H2 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur A1B

Simulation 2 :

- ✓ Hypothèse : H2
- ✓ Critère : Confort thermique intérieur
- ✓ Scénario climatique : A2 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 112, l'évolution de la température intérieure sur une année.
- Résultat entre 2010-2100 : augmentation moyenne de 1,2°C de la température intérieure

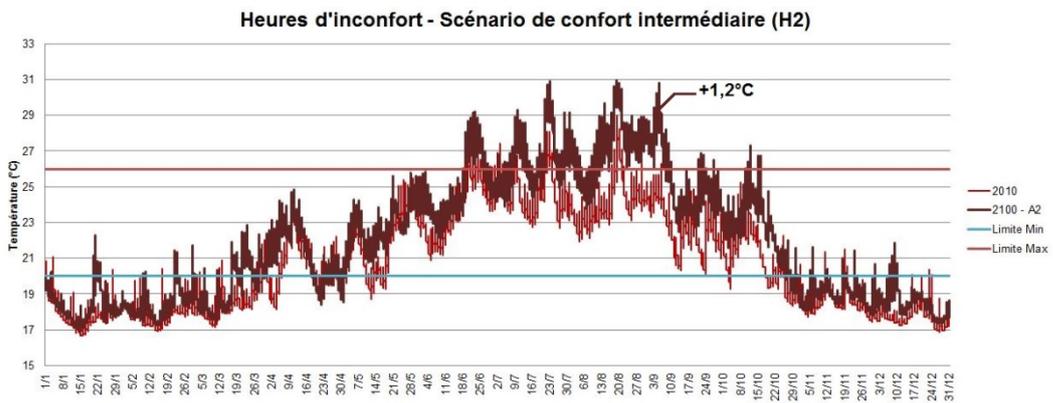


Figure 112 : Scénario H2 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur A2

Simulation 3 :

- ✓ Hypothèse : H2
- ✓ Critère : Confort thermique intérieur

- ✓ Scénario climatique : B1 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 113, l'évolution de la température intérieure sur une année.
- Résultat entre 2010-2100 : augmentation moyenne de 0,4°C de la température intérieure

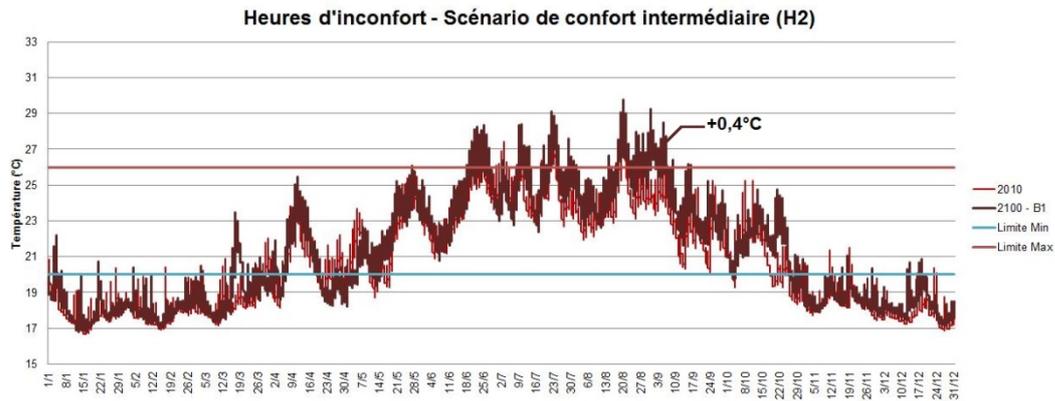


Figure 113 : Scénario H2 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur B1

Ces différentes simulations m'ont permis d'obtenir le nombre total d'heures de surchauffe sur une année pour chacun de ces scénarios climatiques (Figure 114). Dans les trois scénarios futurs, le critère des 5% maximal de surchauffe d'une « maison passive » (438h/an) est largement dépassé.

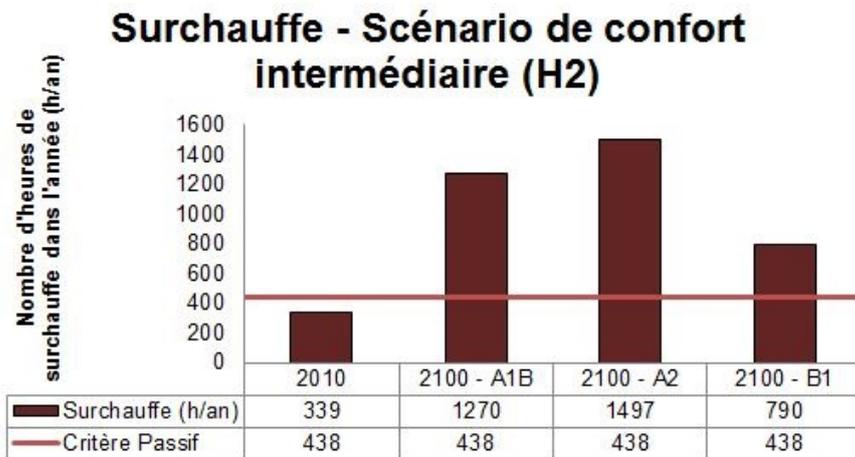


Figure 114 : Scénario H2 – Nombre d'heures de surchauffe dans l'année

b) Consommation énergétique

Je me suis ensuite intéressée à l'impact du réchauffement climatique sur la consommation énergétique.

i. Chauffage

Tout d'abord, j'ai étudié la consommation énergétique réalisée en termes de chauffage.

Simulation 1 :

- ✓ Hypothèse : H2
- ✓ Critère : Consommation énergétique en chauffage
- ✓ Scénario climatique : A1B pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 115, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 14% de la consommation

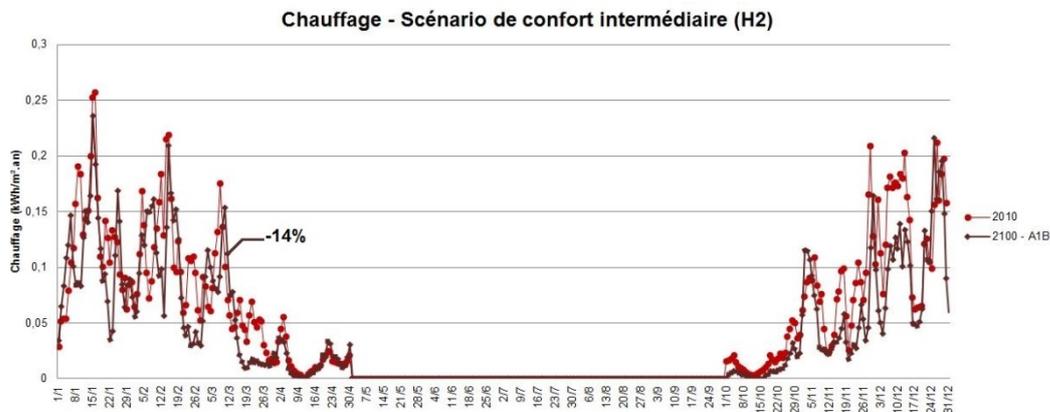


Figure 115 : Scénario H2 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur A1B

Simulation 2 :

- ✓ Hypothèse : H2
- ✓ Critère : Consommation énergétique en chauffage
- ✓ Scénario climatique : A2 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 116, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 16% de la consommation

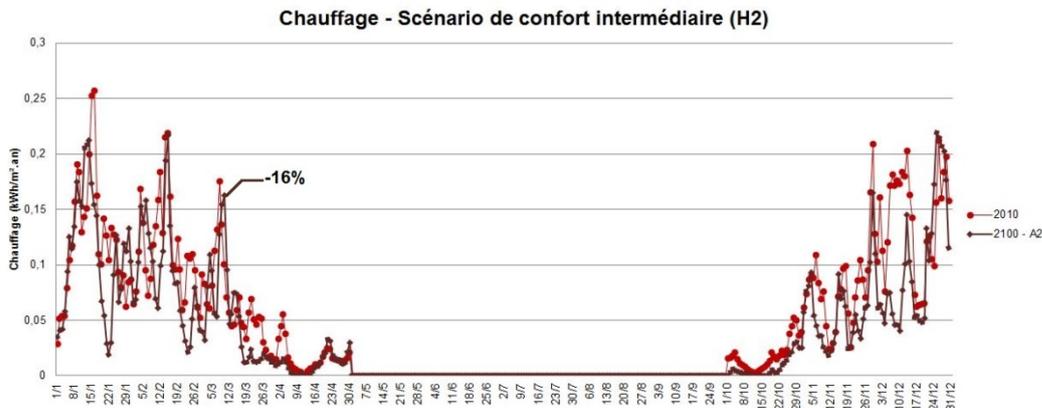


Figure 116 : Scénario H2 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur A2

Simulation 3 :

- ✓ Hypothèse : H2
- ✓ Critère : Consommation énergétique en chauffage
- ✓ Scénario climatique : B1 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 117, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 3% de la consommation

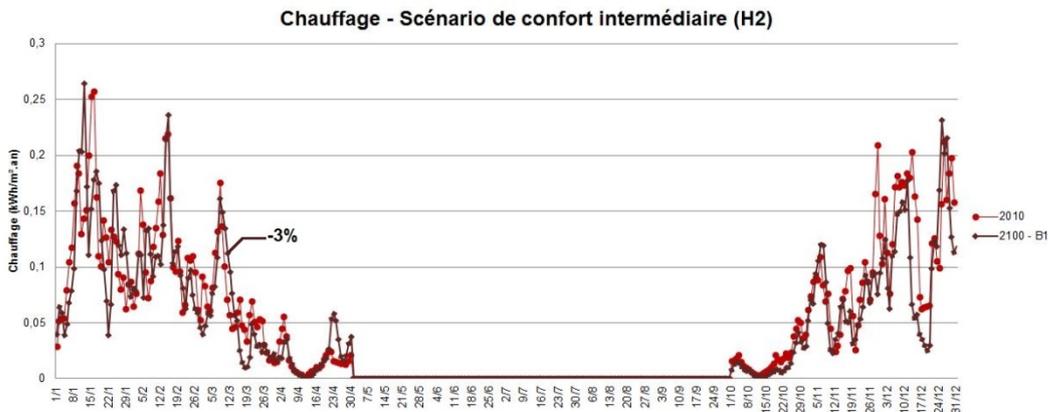


Figure 117 : Scénario H2 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur B1

A partir de ces différentes simulations j'ai calculé consommation annuelle en chauffage par m² pour chacun de ces scénarios climatiques (Figure 118). On remarque que pour les trois scénarios climatiques futurs, la consommation énergétique en chauffage annuelle par m² passe sous la limite du critère passif à respecter (15kWh/m².an).

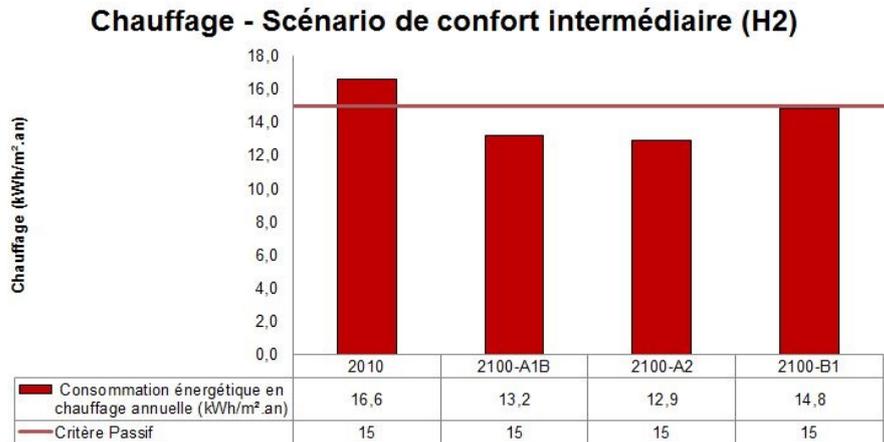


Figure 118 : Scénario H2 - Consommation énergétique en chauffage totale dans l'année

ii. Totale

J'ai ensuite étudié la consommation énergétique totale de la maison.

Simulation 1 :

- ✓ Hypothèse : H2
- ✓ Critère : Consommation énergétique totale
- ✓ Scénario climatique : A1B pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 119, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 6% de la consommation

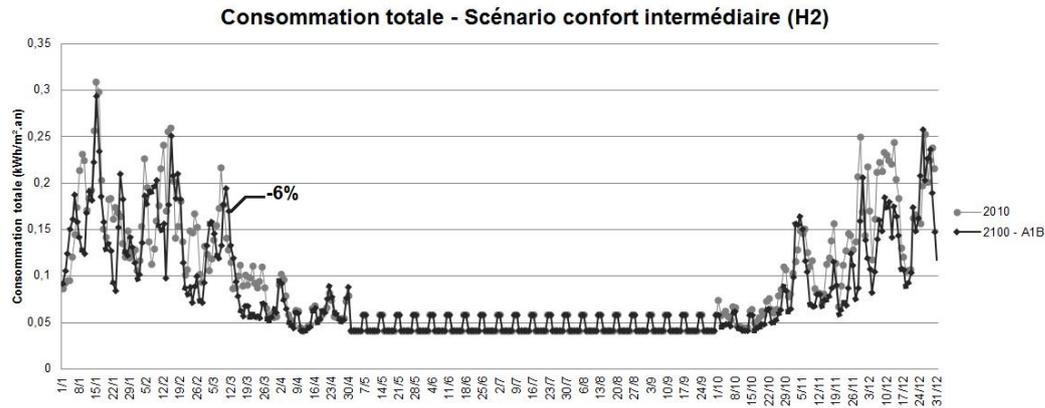


Figure 119 : Scénario H2 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur A1B

Simulation 2 :

- ✓ Hypothèse : H2
- ✓ Critère : Consommation énergétique totale
- ✓ Scénario climatique : A2 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 120, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 7% de la consommation

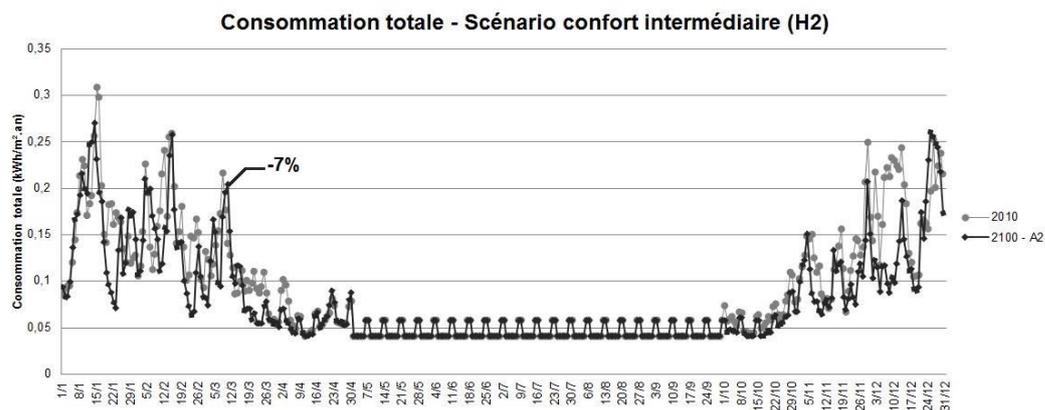


Figure 120 : Scénario H2 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur A2

Simulation 3 :

- ✓ Hypothèse : H2
- ✓ Critère : Consommation énergétique totale

- ✓ Scénario climatique : B1 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 121, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 2% de la consommation

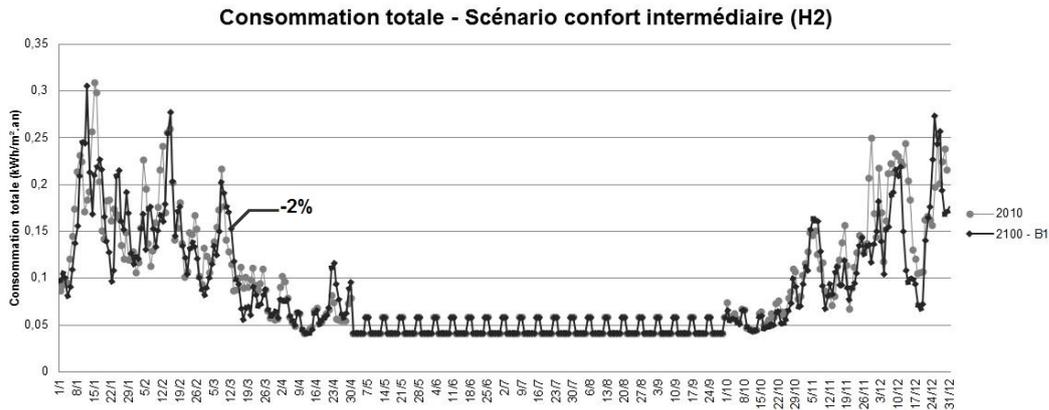


Figure 121 : Scénario H2 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur B1

Sur la Figure 122, qui présente la consommation énergétique totale de la maison par m² sur une année, on remarque que le critère passif (42kWh/m².an) est respecté dans tous les scénarios.

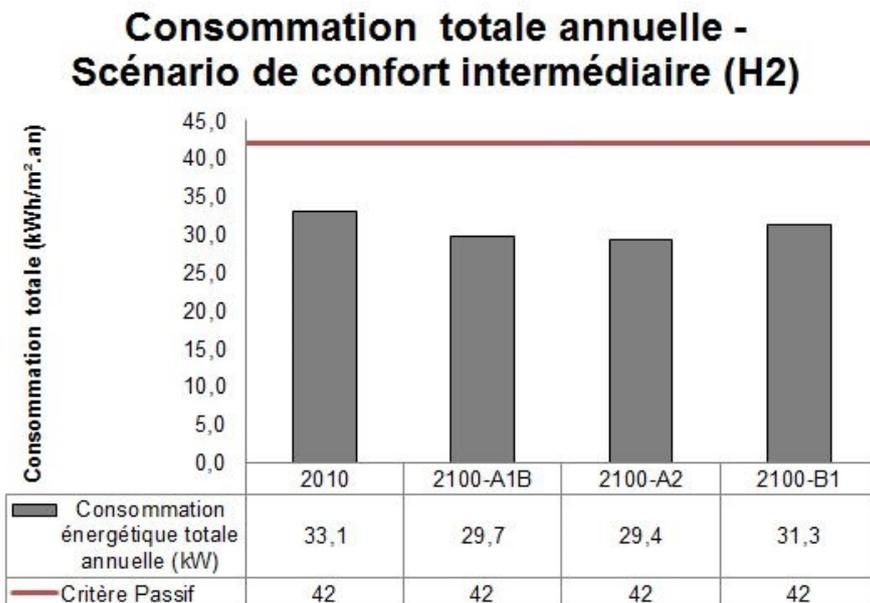


Figure 122 : Scénario H2 - Consommation énergétique totale dans l'année

3) Hypothèse 3 : Scénario de confort acceptable (H3)

Ce troisième scénario d'utilisation de l'habitation a pour but de simuler un confort thermique intérieur « acceptable ». Les températures consignes appliquées (Figure 123) correspondent à la 3^e catégorie d'habitation de la norme NBN EN 15251 (Tableau 18). Ce sont des consignes qui sont tolérées dans le cas d'un bâtiment existant.



Figure 123 : DesignBuilder - Scénario H3 - Consignes

a) Confort thermique

J'ai commencé par étudier l'impact du réchauffement climatique sur le confort thermique intérieur.

Simulation 1 :

- ✓ Hypothèse : H3
- ✓ Critère : Confort thermique intérieur
- ✓ Scénario climatique : A1B pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 124, l'évolution de la température intérieure sur une année.
- Résultat entre 2010-2100 : augmentation moyenne de 1,0°C de la température intérieure

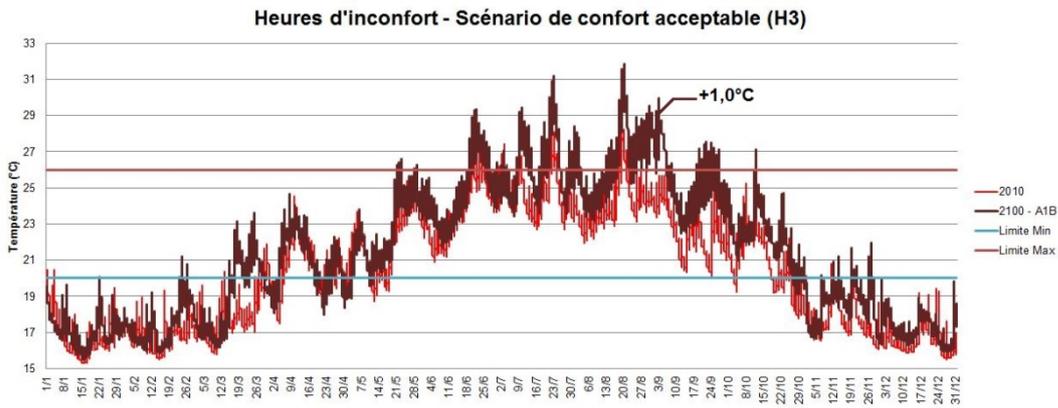


Figure 124 : Scénario H3 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur A1B

Simulation 2 :

- ✓ Hypothèse : H3
- ✓ Critère : Confort thermique intérieur
- ✓ Scénario climatique : A2 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 125, l'évolution de la température intérieure sur une année.
- Résultat entre 2010-2100 : augmentation moyenne de 1,2°C de la température intérieure

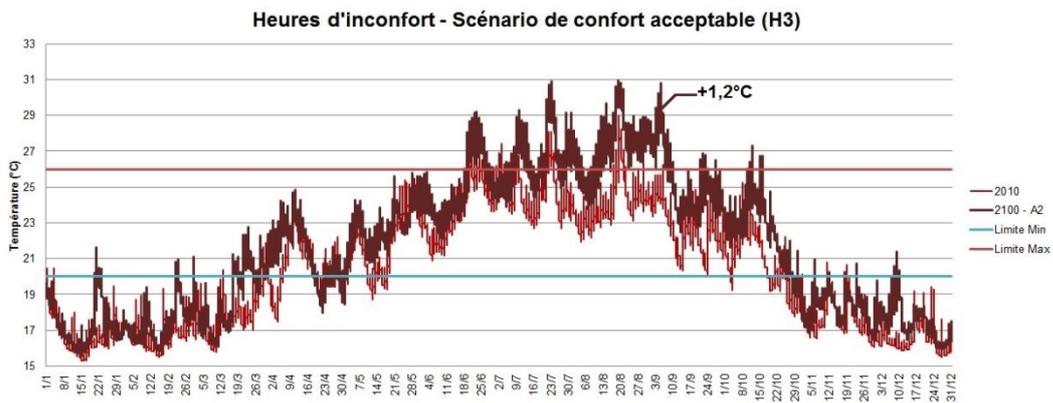


Figure 125 : Scénario H3 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur A2

Simulation 3 :

- ✓ Hypothèse : H3
- ✓ Critère : Confort thermique intérieur
- ✓ Scénario climatique : B1 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 126, l'évolution de la température intérieure sur une année.
- Résultat entre 2010-2100 : augmentation moyenne de 0,5°C de la température intérieure

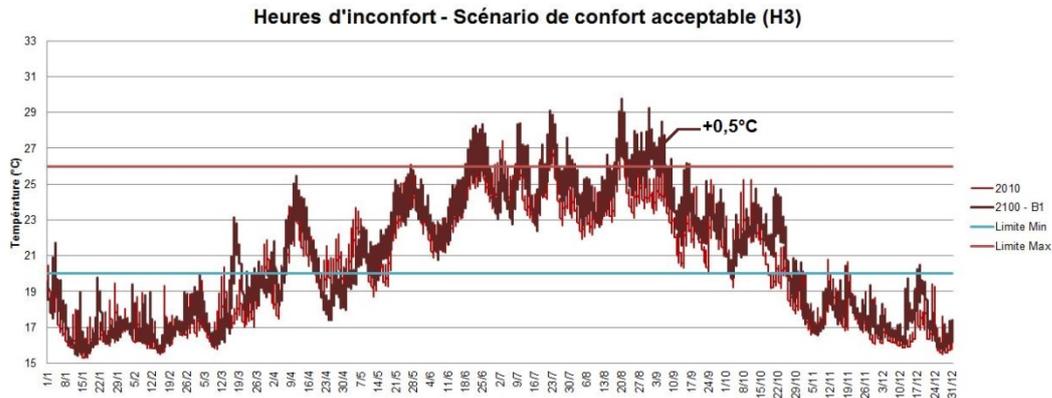


Figure 126 : Scénario H3 – Température opérative intérieure - Comparaison des climats actuel et futur B1

Ces différentes simulations m'ont permis d'obtenir le nombre total d'heures de surchauffe sur une année pour chacun de ces scénarios climatiques (Figure 127). Dans les trois scénarios futurs, le critère des 5% maximal de surchauffe d'une « maison passive » (438h/an) est largement dépassé.

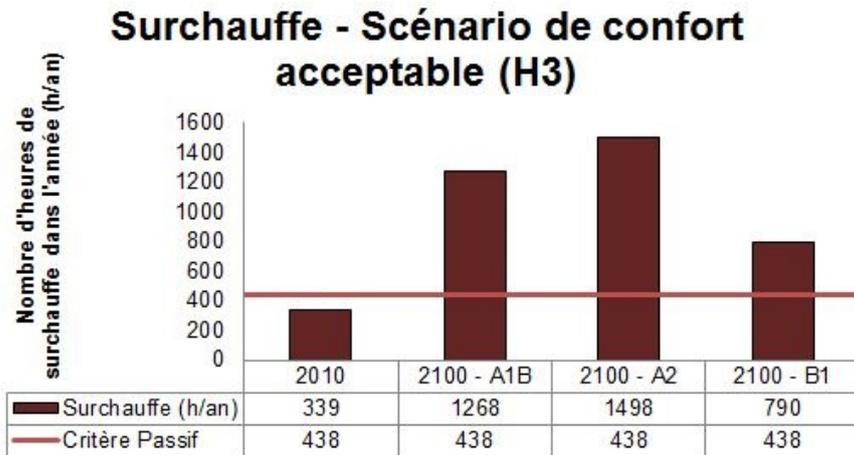


Figure 127 : Scénario H3 – Nombre d'heures de surchauffe dans l'année

b) Consommation énergétique

Je me suis ensuite intéressée à l'impact du réchauffement climatique sur la consommation énergétique.

i. Chauffage

Tout d'abord, j'ai étudié la consommation énergétique réalisée en termes de chauffage.

Simulation 1 :

- ✓ Hypothèse : H3
- ✓ Critère : Consommation énergétique en chauffage
- ✓ Scénario climatique : A1B pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 128, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 14% de la consommation



Figure 128 : Scénario H3 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur A1B

Simulation 2 :

- ✓ Hypothèse : H3
- ✓ Critère : Consommation énergétique en chauffage
- ✓ Scénario climatique : A2 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 129, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 17% de la consommation

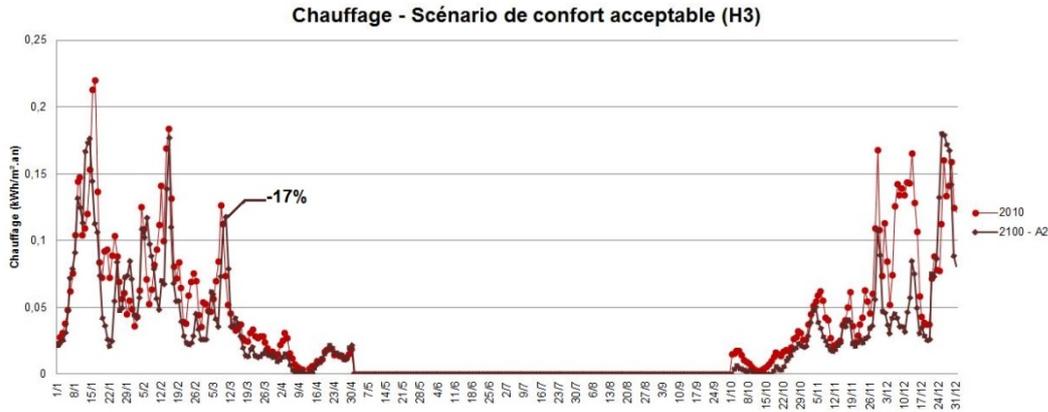


Figure 129 : Scénario H3 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur A2

Simulation 3 :

- ✓ Hypothèse : H3
- ✓ Critère : Consommation énergétique en chauffage
- ✓ Scénario climatique : B1 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 130, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 5% de la consommation



Figure 130 : Scénario H3 - Consommation énergétique en chauffage - Comparaison entre les climats actuel et futur B1

A partir de ces différentes simulations j'ai calculé consommation annuelle en chauffage par m² pour chacun de ces scénarios climatiques (Figure 131). Dans ce cas particulier d'utilisation de l'habitation, pour les trois scénarios climatiques futurs, la consommation énergétique en chauffage annuelle par m² reste sous la limite du critère passif à respecter (15kWh/m².an).

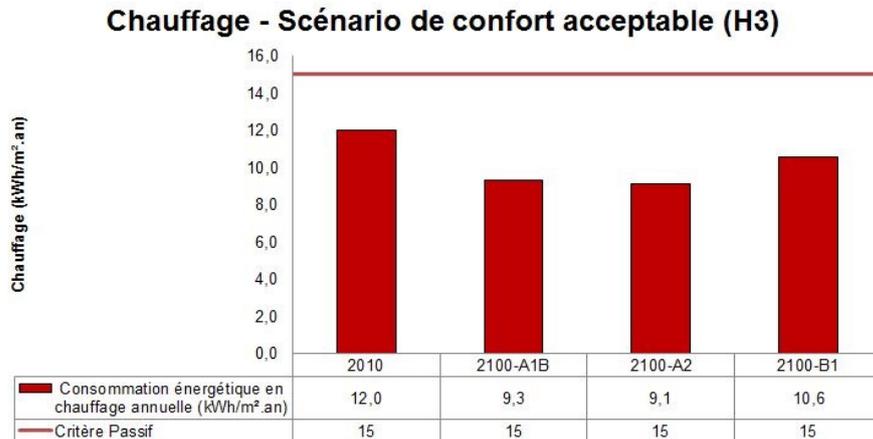


Figure 131 : Scénario H3 - Consommation énergétique en chauffage totale dans l'année

ii. Totale

J'ai ensuite étudié la consommation énergétique totale de la maison.

Simulation 1 :

- ✓ Hypothèse : H3
- ✓ Critère : Consommation énergétique totale
- ✓ Scénario climatique : A1B pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 132, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 6% de la consommation

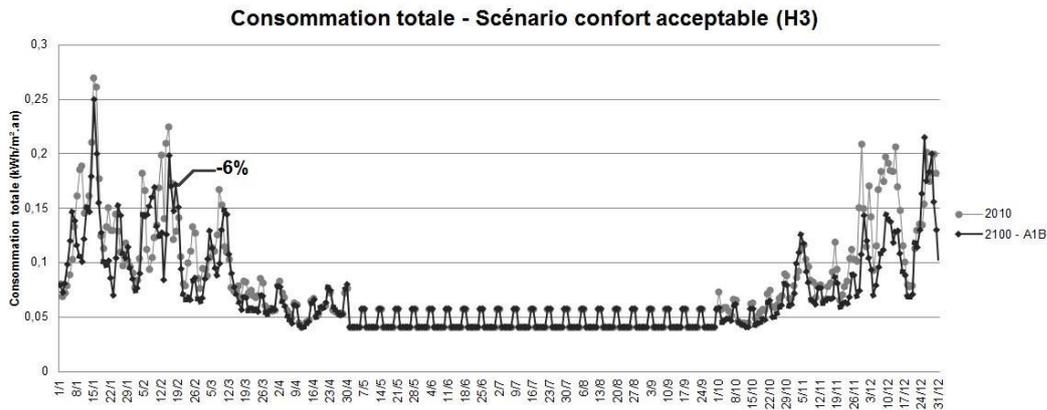


Figure 132 : Scénario H3 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur A1B

Simulation 2 :

- ✓ Hypothèse : H3
- ✓ Critère : Consommation énergétique totale
- ✓ Scénario climatique : A2 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 133, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 7% de la consommation

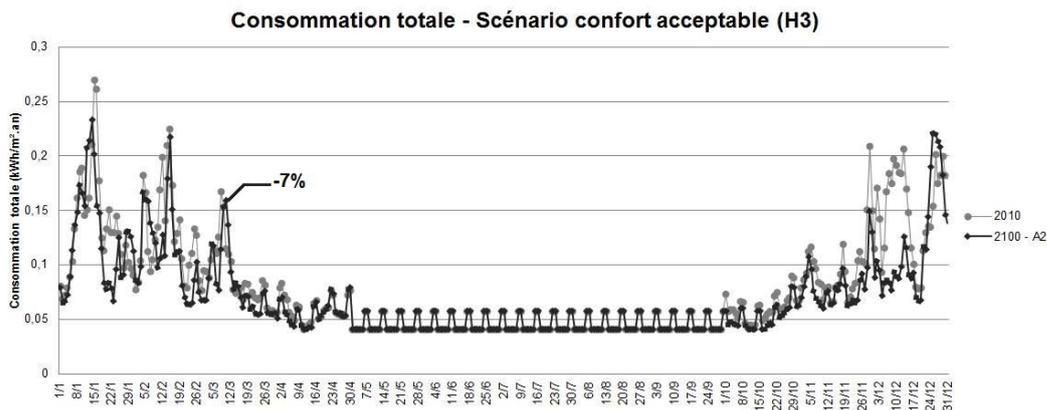


Figure 133 : Scénario H3 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur A2

Simulation 3 :

- ✓ Hypothèse : H3
- ✓ Critère : Consommation énergétique totale

- ✓ Scénario climatique : B1 pour 2100

Résultats :

- Graphe : Figure 134, l'évolution de la consommation énergétique en chauffage sur une année
- Résultat entre 2010-2100 : diminution moyenne de 3% de la consommation

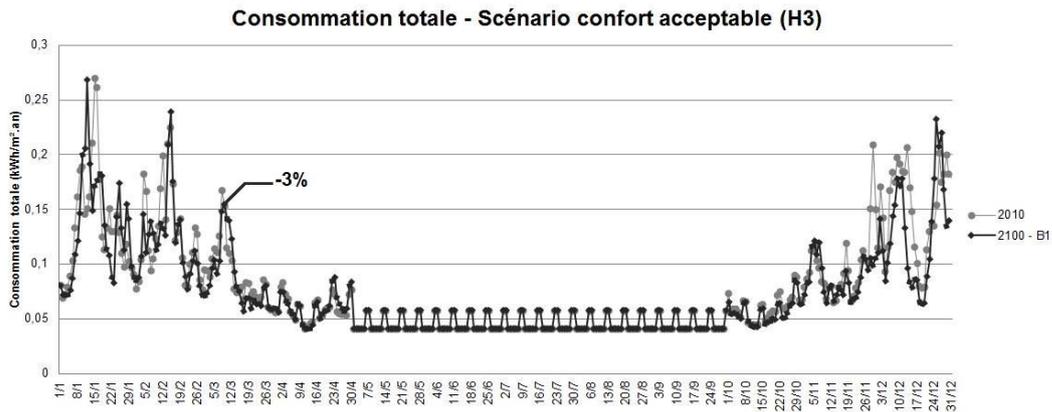


Figure 134 : Scénario H3 - Consommation énergétique totale - Comparaison entre les climats actuel et futur B1

Sur la Figure 135, qui présente la consommation énergétique totale de la maison par m² sur une année, on remarque que le critère passif (42kWh/m².an) est respecté dans tous les scénarios.

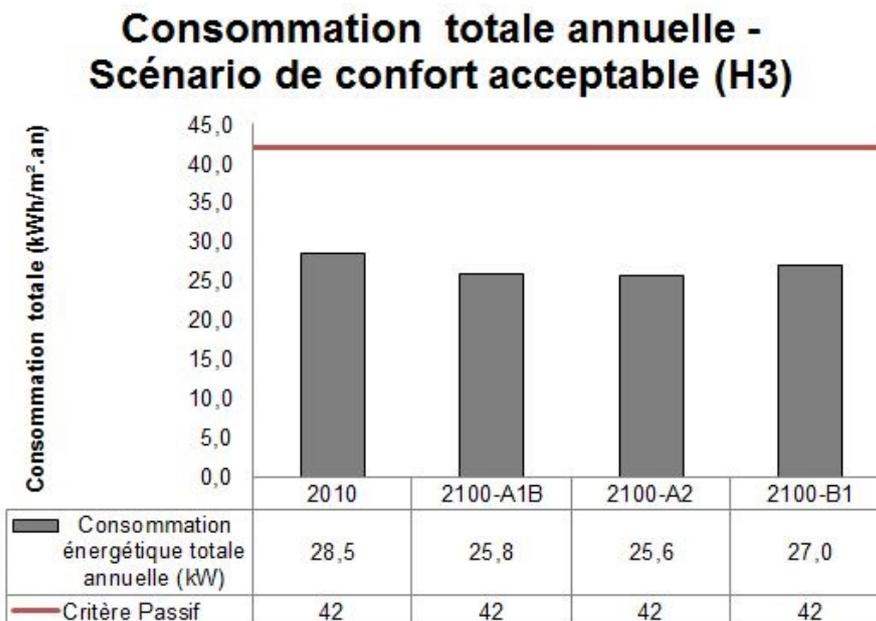


Figure 135 : Scénario H3 - Consommation énergétique totale dans l'année

Chapitre 5 : Discussion

1) Interprétations des résultats

L'ensemble des résultats présentés dans le chapitre précédent m'amène à exprimer un certain nombre de commentaires et conclusions.

a) Surchauffe

Tout d'abord, concernant le confort thermique intérieur et particulièrement la surchauffe dans la habitation : on observe que quel que soit le scénario d'utilisation (H1, H2 ou H3) modélisé et quelles que soient les données climatiques appliquées, l'habitation se trouve avoir davantage d'heures de surchauffe dans l'année que ce que le critère « maison passive » autorise en termes de confort intérieur.

Les résultats issus de ces différents scénarios d'utilisation démontrent que ce phénomène de surchauffe se produira indépendamment des habitudes des habitants. D'autre part, on constate que quel que soit le scénario climatique appliqué (A1B, A2 et B1), correspondant à différentes évolutions possibles du monde, la maison Kettenis ne satisfera pas les critères requis sur le long terme. Quel que soit le scénario futur, elle se retrouve avec un nombre d'heures de surchauffe dans l'année trop élevé.

Maintenant, si l'on considère la maison Kettenis ; elle respecte aujourd'hui les différents critères d'une « maison passive ». On est alors tenté d'étendre les résultats de cette étude à toutes les maisons passives, de Belgique et d'ailleurs. Il faudrait mener d'avantage d'études pour le vérifier, mais les résultats obtenus ici amènent à se demander si le standard de la « maison passive » est un modèle durable. On a déjà constaté que son application dans le cas de la maison Kettenis ne l'est pas.

b) Chauffage et Energie

Si l'on observe ensuite les résultats obtenus en termes de consommation énergétique, qu'il s'agisse de chauffage ou du total consommé, on remarque une légère baisse de ces consommations. La diminution de la consommation énergétique totale et de chauffage sont corrélées. On peut en conclure que le réchauffement climatique, se traduisant par une élévation des températures, permet de réduire la consommation énergétique en chauffage laquelle entraîne une diminution de la consommation énergétique totale.

Aux vues des problèmes de surchauffe à venir, cette diminution, même légère, est peut-être le début d'une solution. En effet, l'énergie économisée lors des saisons froides pourrait être réinvestie lors des saisons chaudes pour réduire le risque de surchauffe.

2) Limites

Les résultats obtenus dans cette étude sont toutefois à manipuler avec précautions. En effet, certains facteurs ont pu influencer la précision du modèle et par là même la précision des résultats.

a) Limites de l'étude

Tout d'abord, au fur et mesure de ce travail, il m'a fallu faire des choix, poser certaines hypothèses que j'ai essayé de rendre aussi proches que possible de la réalité. Pour autant, ils ne l'étaient pas tout à fait. Par exemple, pour contourner une limite du logiciel, j'ai dû faire quelques approximations en utilisant des fenêtres pour modéliser des portes. Même si j'ai ensuite encodé les paramètres de celles-ci de manière à correspondre à des portes, il est possible que certaines données internes ou algorithmes, non accessibles, aient influencé le modèle sans que j'en aie eu connaissance. De même pour la modélisation des « murs ouverts » ou du poêle à pellets.

De plus, j'ai posé un certain nombre d'hypothèses quant à l'utilisation de la maison. J'ai considéré qu'elle était habitée par une famille de quatre personnes et j'ai fait des hypothèses sur leur mode de vie et donc sur leur occupation des différentes pièces. Ces différents choix ont défini des conditions qui ont influencées le modèle. De même, mes différents « scénarios d'utilisation » pour lesquels je propose plusieurs températures de consigne, permettent de voir apparaître une tendance générale. Cependant je ne peux affirmer que ces scénarios correspondent exactement à la réalité.

Enfin, un dernier point à ne pas négliger est le choix des scénarios climatiques futurs. En effet, ceux-ci correspondent aux scénarios SRES (Figure 9) développés pour le 4e Rapport du GIEC diffusé en 2000 (Chapitre 2 – 2) b) Scénarios du réchauffement climatique futur). Or, de nouveaux scénarios climatiques et économiques ont depuis été développés pour le 5e Rapport du GIEC (Tableau 16). L'évolution des technologies et les nouvelles données collectées permettent l'élaboration de nouveaux scénarios plus précis. Si l'utilisation de trois scénarios différents tend à montrer que la surchauffe sera effectivement un problème pour les maisons passives dans les années à venir, le fait que ces scénarios manquent peut-être de précision ne permet pas de conclure sur l'ampleur que présentera ce problème.

b) Limites des logiciels

Un autre point ayant influencé la précision des résultats obtenus est les logiciels utilisés.

En effet, une grande partie des hypothèses décrites dans la partie précédente (a) Limites de l'étude), vient du fait que les éléments « réels présents dans la maison

Kettenis n'existaient pas ou ne pouvaient être créés dans le logiciel DesignBuilder. Il m'a donc fallu trouver des solutions aussi fidèles que possibles pour pallier à ces manques.

Le logiciel Meteonorm est aussi à l'origine de possibles imprécisions dans les résultats obtenus. Comme expliqué dans la présentation de celui-ci (dans la partie v. Limites du logiciel), les données climatiques qu'il fournit sont des interpolations calculées à partir des données mesurées dans les stations météorologiques les plus proches. Afin d'en évaluer la précision, j'ai comparé (Figure 136) les données climatiques en termes de températures obtenues avec Meteonorm pour un climat actuel avec les données climatiques obtenues par le Laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie de l'Université de Liège qui m'ont été fournies par M Xavier Fettweis et Mme Coraline Wyard.

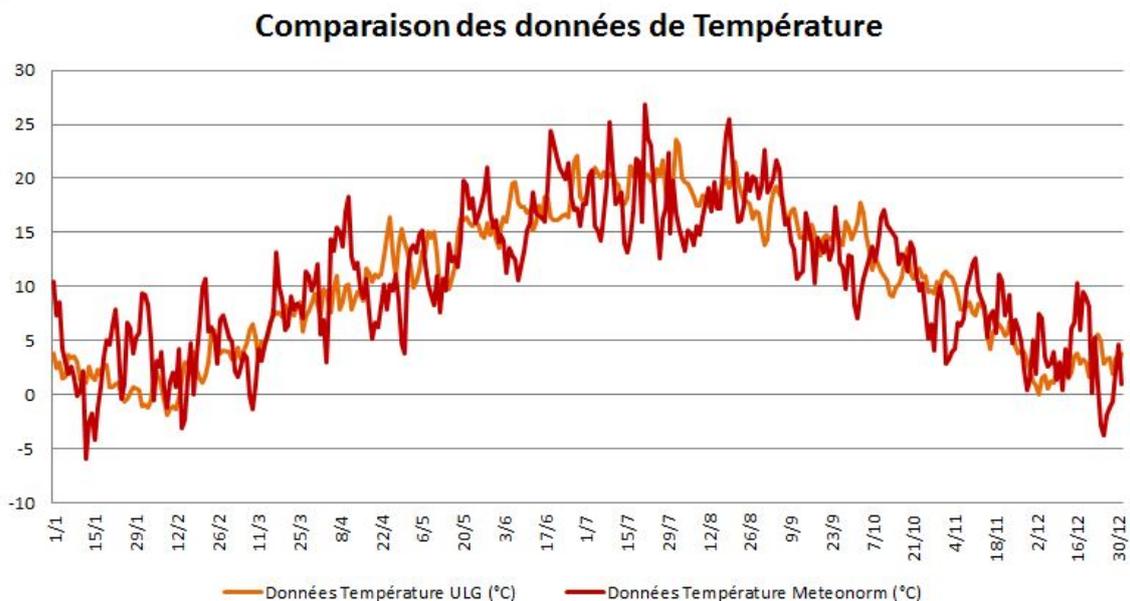


Figure 136 : Comparaison des données de température obtenues par Meteonorm et par le Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie de l'ULG

En valeur absolue, la différence moyenne entre les températures comparées est de 3,2°C. Une telle différence n'est pas négligeable. Surtout si l'on considère le fait qu'une maison est en surchauffe dès que sa température intérieure dépasse les 25°C. Cependant cette valeur étant en valeur absolue cela signifie que ce sont parfois les données de Meteonorm et parfois les données du Laboratoire qui sont plus élevées. Cela se confirme si l'on regarde la différence moyenne qui est de 0,0°C. Enfin, si l'on regarde cette même différence moyenne mais uniquement sur les mois d'été (de mai à septembre), on observe que les données du Laboratoire sont plus élevées de 0,5°C.

Il serait intéressant de voir l'impact généré par les données fournies par le Laboratoire sur le modèle DesignBuilder.

3) Conséquences et solutions possibles

a) Santé/Population

Un problème de surchauffe dans un bâtiment constitue un point de vigilance. Un bâtiment est considéré comme étant en surchauffe si sa température intérieure dépasse les 25°C. Or d'après l'Institut de Veille Sanitaire (InVS), lors des épisodes de chaleur, on observe chaque année des recours aux soins pour « des symptômes spécifiquement ou grande partie dus à l'exposition à la chaleur » français (Températures élevées et risques pour la santé, 2015). Les atteintes les plus graves peuvent même conduire au décès ou à des séquelles très importantes. La canicule de 2003 a causé près de 15 000 décès en 15 jours en France.

Si tout le monde peut souffrir de la chaleur, certaines personnes y sont plus sensibles que d'autres. « Les personnes les plus à risques sont les personnes âgées, car elles cumulent plusieurs facteurs de risque, et les très jeunes enfants (<1 an) » (Températures élevées et risques pour la santé, 2015). Les jeunes enfants sont particulièrement vulnérables car leur corps contient moins de réserve d'eau, ils se déshydratent donc très vite et risquent l'insolation ou le coup de chaleur (Baekelandt, 2014). Cependant, les personnes jeunes et en bonne santé peuvent également être à risque, notamment si elles pratiquent une activité physique pendant les périodes de chaleur : l'activité physique augmente la température du corps et le risque de déshydratation.

Avoir de la surchauffe dans son habitation implique que même une fois rentré chez soi, on n'y trouve pas le confort souhaité puisque la chaleur s'y trouve aussi. Les risques santé demeurent donc, y compris dans sa propre maison.

b) Pistes de solutions

Lorsqu'un bâtiment fait face à des problèmes de surchauffe, il existe différentes solutions pour y remédier ou en tout cas pour atténuer le problème. Je présente ici certaines de ces solutions en les séparant en deux parties. Tout d'abord, je parle des solutions dites passives, celles qui une fois mise en place fonctionnent sans recours à un système mécanique. Ensuite, j'aborde les solutions dites actives, qui fonctionnent avec un système mécanique. Dans ces deux parties, certaines solutions sont modélisées afin d'en illustrer l'impact. Cependant, les résultats obtenus ne seront pas à considérer comme absolus : ils auront plus une valeur d'indicateur de tendance qu'une valeur « réelle ».

i. Solutions « passives »

Ventilation naturelle

Une solution passive possible est l'utilisation, voire l'optimisation de l'utilisation, de la ventilation naturelle. La ventilation est dite « naturelle » lorsqu'elle est générée par des forces naturelles (poussée d'Archimède ou force du vent) (DGO4, 2002). Utilisée en été, elle consiste à « refroidir le bâtiment par ventilation en utilisant l'énergie gratuite de l'air extérieur » (DGO4, 2002) lorsque celui-ci présente une température inférieure à la température intérieure.

Ce type de système fonctionnant à partir de forces naturelles, il doit être réfléchi à l'étape de conception du bâtiment (orientation, placement d'ouvertures, ...).

Dans le cas de la maison Kettenis, si ce système existe comme dans la plupart des habitations, il pourrait probablement être amélioré. Cependant ces améliorations auraient dû être pensées à l'étape de conception du bâtiment. Elles seront difficiles voire impossibles à mettre en place sur un bâtiment construit sur lequel on ne souhaite pas réaliser de modifications structurelles majeures.

Protections solaires

Une autre solution passive possible est l'utilisation de protections solaires. Celles-ci peuvent intérieures ou extérieures, bien qu'elles soient plus efficaces si placées à l'extérieur « car elles arrêtent les rayons du soleil avant qu'ils n'atteignent le vitrage » (DGO4, 2002). Elles peuvent également être mobiles, fixes ou permanentes. Il faut étudier le besoin du bâtiment et trouver la solution qui lui convient le mieux.

Suivant le type de protection nécessaire, il peut être ajouté après la construction du bâtiment ou doit être prévu lors de la conception.

En ce qui concerne la maison Kettenis, les fenêtres situées sur les façades Sud et Ouest comportent déjà des protections solaires : elles sont surmontées d'auvents. Cependant, ces protections pourraient être complétées.

Afin de voir l'impact de protections solaires complémentaires, j'ai ajouté en plus de l'auvent des protections latérales permanentes de même profondeur que celui-ci sur les fenêtres des façades Sud et Ouest. J'ai ensuite observé les changements que cela aurait provoqués dans le cas du scénario A1B avec une utilisation de l'habitation en tant que bâtiment neuf (H2).

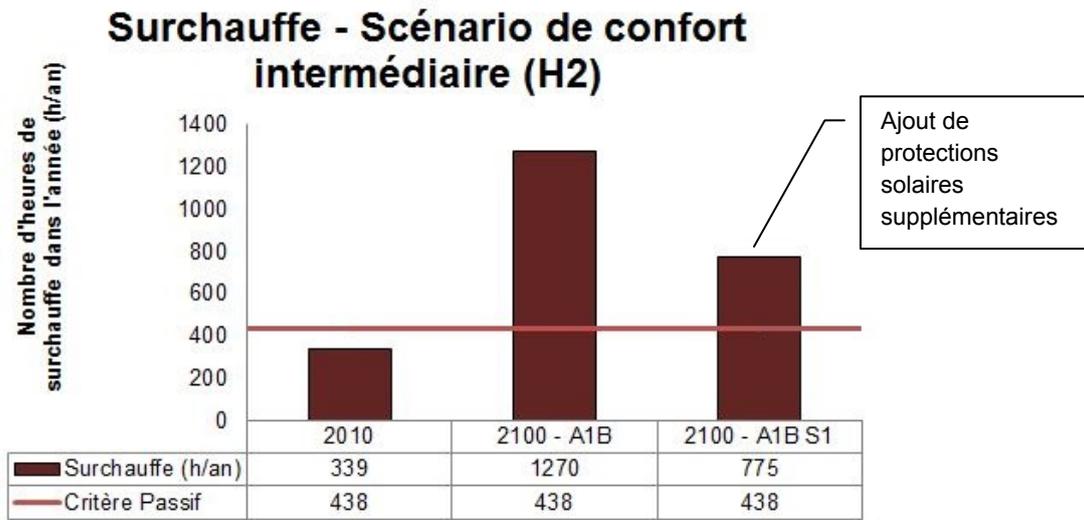


Figure 137 : Scénario H2 - Solution S1 Protections solaires - Surchauffe

Avec cet ajout, on peut voir la Figure 137 que le nombre d'heures de surchauffe dans l'année diminue de 39% (-495h).

Il semblerait donc que les protections solaires existantes sur la maison puissent être complétées avec de nouvelles pour en améliorer l'efficacité.

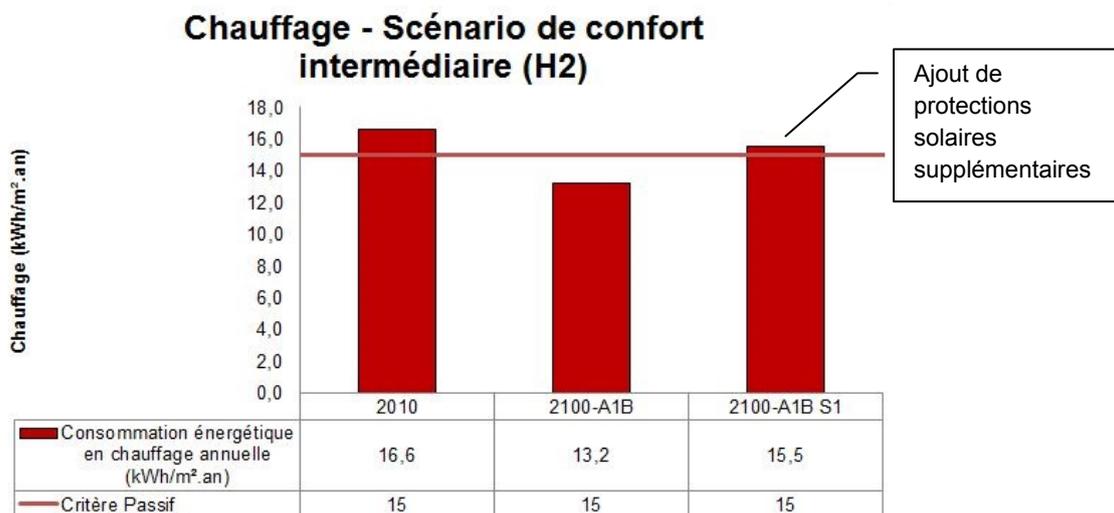


Figure 138 Scénario H2 - Solution S1 Protections solaires - Chauffage

Il est aussi intéressant de noter (Figure 138) que l'impact de cet ajout sur la consommation de chauffage reste minimale (+2,3kWh/m² sur l'année soit +17%).

ii. Solutions « actives »

Puits canadien

« Le puits canadiens permet de préchauffer (pré-refroidir) l'air neuf d'un système de pulsion mécanique par l'intermédiaire d'un conduit d'amenée d'air enfoui dans le sol » (DGO4, 2012). En cas de problème de surchauffe, c'est donc une solution possible puisqu'il permet d'apporter de l'air plus froid dans le système de ventilation en été.

C'est un système qu'il est très coûteux de mettre en place. En effet, il nécessite d'être, pour la majeure partie, enterré entre 2 et 4m de la surface.

Ce système est déjà présent dans le cas de la maison Kettenis.

Ventilation mécanique

Suivant le même principe que la ventilation naturelle, la ventilation mécanique peut elle aussi être utilisée pour diminuer le risque de surchauffe dans un bâtiment. Contrairement à la ventilation naturelle, elle est générée par une force mécanique : un ventilateur (DGO4, 2014). De même que la ventilation naturelle, elle consiste à refroidir le bâtiment en été par ventilation « en utilisant l'énergie gratuite de l'air extérieur » (DGO4, 2014) lorsque celui-ci présente une température inférieure à la température intérieure.

Ce type de système est assez facile à mettre en place bien qu'il faille faire attention au dimensionnement du dispositif.

En ce qui concerne la maison Kettenis, elle est déjà équipée de ce type de système.

Système de climatisation

Une autre solution pour limiter les risque de surchauffe, et c'est probablement la plus connue, est la mise en place d'un système de climatisation. Il existe de nombreux systèmes de climatisation différents. Ceux-ci sont classés dans trois grandes familles en fonction du mode de transport de l'énergie frigorifique (DGO4, 2002). Ainsi le rafraichissement intérieur peut se faire par :

- L'intermédiaire d'un réseau d'air ;
- L'intermédiaire d'un réseau d'eau froide ou d'eau glacée ;
- Contact direct entre l'air à refroidir et l'évaporateur de la machine frigorifique.

Afin de voir l'impact causé par un système de refroidissement, j'en ai ajouté un fonctionnant en été dans mon modèle sur DesignBuilder (Figure 139).

Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Feb	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Mar	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Apr	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
May	On	On	On	On	On	On	On
Jun	On	On	On	On	On	On	On
Jul	On	On	On	On	On	On	On
Aug	On	On	On	On	On	On	On
Sep	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Oct	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Nov	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Dec	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off

Figure 139 : DesignBuilder – Solution S2 Climatisation - HVAC - Planning Climatisation

Le logiciel ne permet pas de choisir le type de système utilisé puisqu’il n’en possède qu’un seul encodé : le système « par défaut ». De plus, il n’est pas précisé à quelle famille appartient ce système.

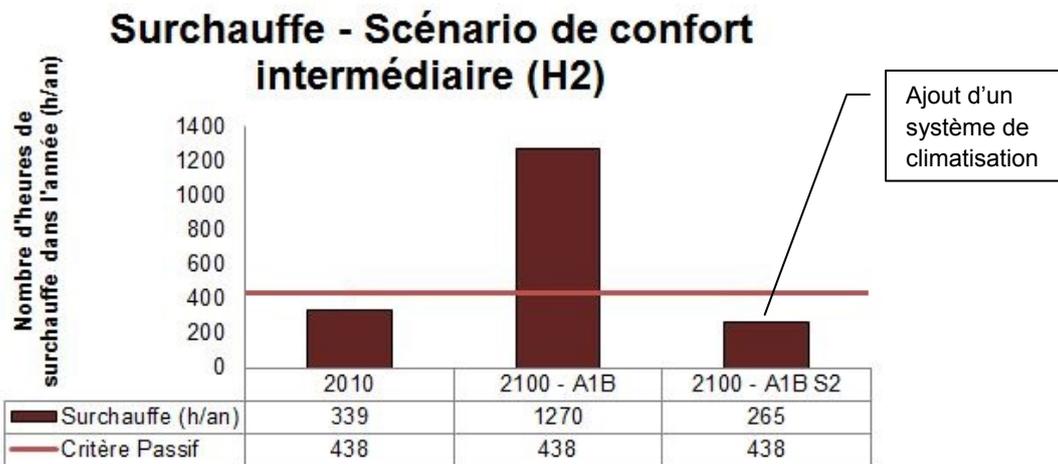


Figure 140 Scénario H2 - Solution S2 Climatisation - Surchauffe

Sur la Figure 140, on voit tout de suite que cet ajout a un impact majeur sur la surchauffe dans le bâtiment. Le nombre d’heures de surchauffe sur l’année diminue de 79% et descend ainsi en dessous du critère « maison passive ».

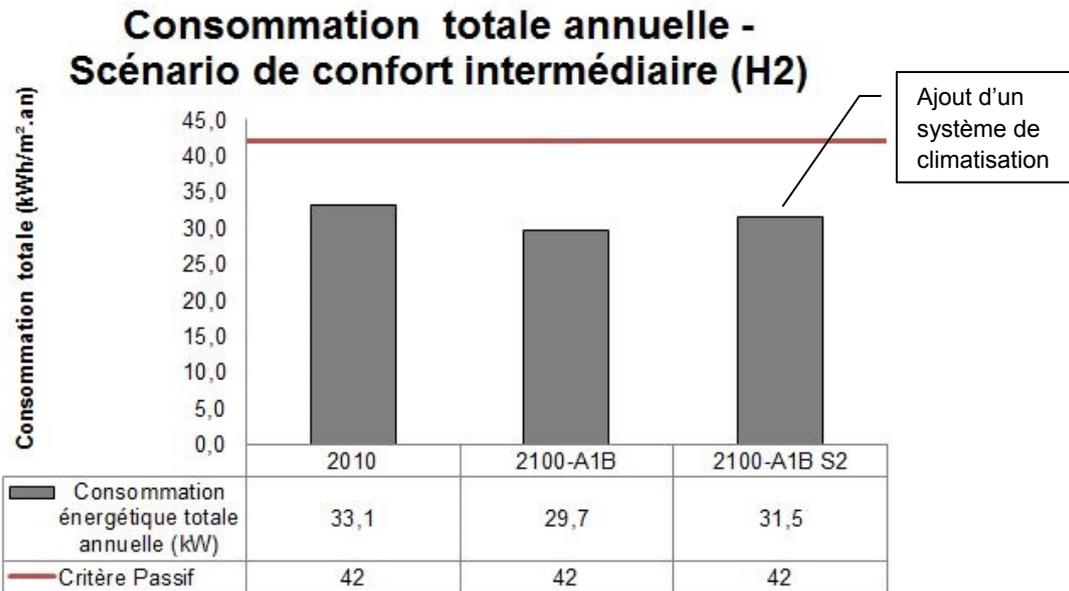


Figure 141 Scénario H2 - Solution S2 Climatisation - Energie totale

J'ai aussi voulu voir l'impact de cet ajout sur la consommation énergétique de la maison. Sur la Figure 141, on voit que cet ajout ne cause qu'une très légère augmentation de la consommation énergétique de l'habitation (+1,8kWh/m² soit 6%) sur l'année. La valeur reste d'ailleurs en dessous du critère « maison passive » correspondant.

4) Bilan de la discussion

Cette étude a permis la production de nouveaux résultats sur un sujet dont les thèmes ont déjà été abordés mais jamais considérés les uns par rapport aux autres. Ils permettent notamment d'affirmer qu'il existe un risque non négligeable que les maisons passives soient fortement sujettes à la surchauffe dans les années à venir.

Les résultats obtenus dans cette étude sont toutefois à manipuler avec précautions. En effet, certains facteurs ont pu influencer la précision du modèle et par là même la précision des résultats.

Il est aussi important de savoir que les maisons déjà construites ne sont pas pour autant condamnées. Il existe des solutions dites « passives » de conception architecturale et des solutions dites « actives » pour lutter contre la surchauffe dans les habitations et un certain nombre d'entre elles peuvent être mises en place même après la construction de l'habitation.

Chapitre 6 : Conclusion

1) Bilan du travail effectué

Dans ce travail, une « maison passive » existante a été modélisée afin d'observer l'impact sur celle-ci de scénarios futurs tenant compte du réchauffement climatique. L'objectif était de comprendre l'impact du réchauffement climatique sur une habitation dite « passive » en Belgique (au niveau thermique) et de proposer, face aux résultats obtenus, des recommandations qui pourront être approfondies dans un travail ultérieur. L'étude réalisée ici a vocation à servir de base pour des recherches futures orientées :

- sur la rénovation de bâtiments existants pour mieux les adapter au réchauffement climatique en Belgique
- ou sur la conception de bâtiments neufs adaptés au réchauffement climatique en Belgique.

Dans un premier temps, il a fallu produire les fichiers climatiques correspondants aux quatre scénarios étudiés, un actuel et trois futurs (2100), à l'aide du logiciel Meteonorm. Ceux-ci ont été produits par rapport à l'emplacement du cas d'étude considéré, une maison passive unifamiliale située dans l'est de la Belgique. Ce cas d'étude a été modélisé et calibré sur le logiciel DesignBuilder en lui appliquant les climats choisis. Sur les neuf scénarios de changement climatique et d'utilisation simulés, on observe une augmentation moyenne de la température intérieure entre 0,4°C et 1,2°C. On y observe également une diminution moyenne de la consommation énergétique en chauffage entre 0% et 17%. Enfin, on constate une augmentation du nombre d'heures de surchauffe entre 451 h et 931 h.

Les résultats obtenus tendent donc à montrer que cette maison ne serait pas viable sur le long terme. En effet, dans tous les scénarios observés, le nombre d'heures de surchauffe sur une année se retrouvait bien au-delà de la limite du critère passif correspondant.

Cette étude n'est qu'un premier pas, mais elle amène une question d'importance : le modèle de la maison passive doit-il être amélioré afin d'éviter les risques de surchauffe ? C'est le cas de la maison que j'ai étudié : il faut trouver des solutions à mettre en œuvre afin d'éviter les risques identifiés lors de ce travail.

La course actuelle pour trouver au plus vite la meilleure solution pour l'habitat en termes énergétiques, ne nous pousse-t-elle pas trop vite vers des modèles qui dans quelques années ne seront plus habitables ? Comment améliorer ces modèles afin d'en assurer la durabilité ?

2) Recommandations pour constructions neuves de rénovations

Ces questions étant posées, il est aussi important de savoir que les maisons déjà construites ne sont pas pour autant condamnées. Il existe des solutions passives de conception architecturale et des solutions actives pour lutter contre la surchauffe dans les habitations et un certain nombre d'entre elle peuvent être mises en place même après la construction de l'habitation.

De plus, le réchauffement climatique semble avoir également des conséquences positives, puisqu'il permet notamment de réduire la consommation énergétique en chauffage. Ces économies pourraient par exemple servir pour la mise en place de solutions (ventilation mécanique, système de refroidissement, ...)

L'étude des solutions pouvant être mises place et leur optimisation pourraient, à mon avis, faire l'objet d'un travail complémentaire, ultérieur. Le modèle utilisé dans cette étude pourrait être réutilisé afin de tester plusieurs solutions, d'en évaluer l'efficacité et éventuellement d'en calculer le coût pour déterminer les meilleurs choix possibles.

3) Bilan personnel

J'ai trouvé ce projet à la pointe de la recherche très intéressant. Il m'a permis d'approfondir et de confronter ces deux notions fortes de l'actualité que sont la maison passive et le réchauffement climatique en utilisant mes compétences et connaissances acquises. Il a été également l'occasion d'une ouverture et collaboration avec des experts de domaines connexes.

Ce fut aussi l'occasion d'accroître ma maîtrise des deux logiciels Meteonorm et DesignBuilder.

Enfin, aux vues des résultats obtenus, ce travail m'a confortée dans l'idée qu'une solution qui semble « parfaite » ou « séduisante » et qui est présentée comme telle, doit néanmoins être considérée avec le recul nécessaire. Face à la proposition de tels modèles il faut conserver sa capacité d'analyse pour s'assurer de leur pertinence et de leur conformité notamment en cernant les facteurs pouvant les impacter et ainsi révéler de possibles lacunes ou insuffisances. Ce type de projet montre l'importance de conserver un esprit critique, d'utiliser ses connaissances et sa capacité à prendre du recul pour envisager que cette solution conviendra ou non à certaines situations ou même sur le long terme.

Bibliographie

- ANR (Agence Nationale de la Recherche). (2014). *MUSCADE - Modélisation Urbaine et Stratégie d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Energétique*. France.
- Aries, M., & Bluysen, P. (2009). Climate change consequences for the indoor environment. *HERON*, 54(1), 49-70.
- Baekelandt, L. (2014, Juin 5). *Les effets de la chaleur sur la santé*. Récupéré sur Plus Magazine: <http://plusmagazine.levif.be/sante/les-effets-de-la-chaleur-sur-la-sante/article-normal-459469.html>
- CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques). (2012). *Projet EPICEA (Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne)*. Paris.
- Coley, D., & Kershaw, T. J. (2010). Changes in internal temperatures within the built environment as a response to a changing climate. *Building and Environment*(45), 89-93.
- DesignBuilder. (2016, Avril 4). *Home*. Récupéré sur DesignBuilder: <http://www.designbuilder.co.uk/>
- DGO4. (2002, Avril 1). *Choisir entre une protection intérieure ou extérieure*. Récupéré sur Energie +: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15430>
- DGO4. (2002, Avril 1). *La ventilation intensive naturelle d'été*. Récupéré sur Energie +: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10851>
- DGO4. (2002, Avril 1). *Les grandes familles de systèmes de refroidissement*. Récupéré sur Energie +: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18453>
- DGO4. (2009, Décembre 10). *L'inertie thermique*. Récupéré sur Energie +: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10330>
- DGO4. (2012, Juillet 3). *Le puits canadien*. Récupéré sur Energie +: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10862>
- DGO4. (2014, Novembre 16). *La norme NBN EN 15251:2007 : Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique*. Récupéré sur Energie +: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18183>
- DGO4. (2014, Octobre 10). *La ventilation intensive mécanique d'été*. Récupéré sur Energie +: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18213>

- Dubois, C. (2014). *Adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique; Une feuille de route pour accompagner les architectes et les designers urbains québécois*. Laval .
- Flanders Environment Agency. (2015). *MIRA Climate Report 2015, about observed and future climate changes in Flanders and Belgium*. Belgique.
- GIEC. (2014). *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse, Résumé à l'intention des décideurs*. Copenhague.
- Google. (2016, Février 20). *Hoeschhof 9, 4701 Eupen*. Récupéré sur Google Maps: <https://www.google.be/maps/place/Hoeschhof+9,+4701+Eupen/@50.6517984,6.054201,487m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x47c084f9636fbd6d:0x732bd6c5404cf7e0!8m2!3d50.6517813!4d6.0541617>
- Guerriat, A. (2008, octobre). *Contexte Général*. Récupéré sur La Maison Passive : <http://lamaisonpassive.be/contexte-general>
- Guerriat, A. (2008, Octobre). *Introduction*. Récupéré sur La Maison Passive: <http://lamaisonpassive.be/introduction>
- Guerriat, A. (2008, Octobre). *Les standards de la maison passive*. Récupéré sur La Maison Passive: <http://lamaisonpassive.be/standard-maison-passive>
- Haak, A. (2012). *Climate change and heat stress in residential buildings*. Eindhoven.
- Harvard University - Graduate School of Design. (2009, Septembre 30). *Teaching Ressources*. Récupéré sur MIT Massachusetts Institute of Technology: http://web.mit.edu/tito_/www/Tutorials/EnergyModellingI_GettingStarted.pdf
- Holmes, M., & Hacker, J. (2007). Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century. *Energy and Buildings*(39), 802–814.
- Hurk, B. v., Klein Tank, A., Lenderink, G., Ulden, A. v., Oldenborgh, G. J., Katsman, C., . . . Drijfhout, S. (2006). *KNMI climate change scenarios 2006 for the Netherlands*. De Bilt: KNMI.
- Hurk, B. v., Klein Tank, A., Lenderink, G., Ulden, A. v., Oldenborgh, G. J., Katsman, C., . . . Drijfhout, S. (2006). Sharpening the IPCC conclusions into New Climate Change Scenarios for The Netherlands. *KNMI Research Biennial Reports*, 12-16.
- INSEE. (2002, Février 1). *Energie primaire*. Récupéré sur site Web INSEE Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques, Mesurer pour Comprendre: <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/energie-primaire.htm>

- Institut de Veille Sanitaire. (2015, Juin 30). *Températures élevées et risques pour la santé*. Récupéré sur site Web InVS: <http://www.invs.sante.fr/Dossiers-thematiques/Environnement-et-sante/Climat-et-sante/Chaleur-et-sante/Temperatures-elevees-et-risques-pour-la-sante>
- IPCC. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios*.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014 - Synthesis Report*. Genève.
- IRM (Institut Royal Météorologique de Belgique). (2015). *Vigilance Climatique*. Belgique.
- Klein Tank, A., & Lenderink, G. (2009). *Climate change in the Netherlands; Supplements to the KNMI'06 scenarios*. De Bilt.
- Maller, C., & Strengers, Y. (2011). Housing, heat stress and heat in a changing climate: promoting the adaptative capacity of vulnerable house holds, a suggested way forward. *Health Promotion International*, 26(4), 492-498.
- Meester, T. D. (2008). *Etude du comportement thermique et énergétique d'une maison passive par modélisation dynamique*. Louvain-la-Neuve : Université Catholique de Louvain: Mémoire de Maîtrise.
- Meteotest. (2014, Mars). *Meteonorm 7.1 Product Brochure*. Retrieved from Meteonorm: http://www.meteonorm.com/images/uploads/downloads/flyer_meteonorm_7.pdf
- Meteotest. (2016, Mars 30). *Homepage*. Récupéré sur Meteonorm: <http://www.meteonorm.com/>
- Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie. (2013). *Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC*. France.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. (2015). *Chiffres clés du climat France et Monde*.
- Moss et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*(463), 747-756.
- Nigel, A., Kram, T., Carter, T., Ebi, K., Edmonds, J., Hallegatte, S., . . . Zwickel, T. (2013). *A framework for a new generation of socioeconomic scenarios for climate change impact, adaptation, vulnerability and mitigation research*. Springer.
- PMP asbl. (2013). *Les critères*. Récupéré sur Plate-forme Maison Passive a.s.b.l.: <http://www.maisonpassive.be>
- Région Wallone. (2004). *Une maison à ossature bois*. Wallonie: Construire avec l'Energie.

Annexe 1 : Extrait du travail de fin d'étude « *Etude du comportement thermique et énergétique d'une maison passive par modélisation dynamique* » de Tatiana de Meester

2.2. La Maison Kettenis

2.2.1. Construire avec énergie

L'action « Construire avec énergie » est une initiative du Ministre wallon en charge de l'énergie. Cette action a pour but (depuis 2004), de favoriser la construction de logements neufs à moindre consommation d'énergie, sur base volontaire des acteurs, et de préparer les professionnels à la future réglementation de la PEB (Performance Energétique des Bâtiments).

Certains critères techniques, au nombre de cinq, doivent être respectés pour pouvoir participer à cette action qui donne droit à l'attestation Construire avec l'énergie.

Ils sont définis dans une charte d'efficacité énergétique. Ces critères anticipent les exigences qui seront liées à la future réglementation. Depuis le 1er octobre 2007, ils ont trait :⁹

- au degré d'isolation des différentes parois de l'enveloppe, fonction du coefficient de transmission thermique (valeurs $U \leq U_{max}$) ;
- au niveau d'isolation globale du logement (niveau $K \leq 45$) ;
- au système de ventilation (respect de la norme NBN D50-001) ;
- au niveau de consommation d'énergie primaire du logement (niveau $E_w \leq 100$) ;
- à la limitation du risque de surchauffe.

L'intérêt de cette action est, pour les professionnels (architectes, bureaux d'études, entreprises), de se préparer à la future réglementation, de profiter d'un soutien technique fourni par le CSTC et par des équipes universitaires, ainsi que de formations techniques.

Dans le cas des maîtres d'ouvrage, leur intérêt réside dans le fait de bâtir une maison à la fois économe en énergie et saine, c'est-à-dire offrant un bon climat intérieur. Ce que garantissent les cinq critères techniques.

Un subside est également octroyé en plus de l'attestation « Construire avec énergie » (subside à partager entre l'architecte et le maître d'ouvrage).

2.2.2. Choix de cette maison

Ce mémoire analysera une maison passive pour tenter de comprendre son mode de fonctionnement thermique et la manière dont celle-ci interagit. Le cas étudié sera celui de la Maison Kettenis qui a été construite près d'Eupen en Belgique.

La maison Kettenis a participé à l'opération « Construire avec énergie ». L'intérêt de cette maison est qu'il existe assez bien de documents et de données la concernant. De plus,

⁹<http://energie.wallonie.be/>

même si cette construction passive va être un des enjeux de cette étude, cette maison ne représente pas un cas « optimal » d'un point de vue énergétique, par le simple fait qu'elle est une maison « quatre façades ». Il sera donc intéressant de voir comment des améliorations peuvent être faites du point de vue de la conception.

L'intérêt du simulateur dynamique TRNsys est de permettre l'étude de cette maison en la modélisant au moyen de zones et en définissant les interactions entre chaque zone ou pièce. La maison a été « modélisée » dans le but de correspondre le plus possible avec la situation existante (composition des murs, toit en pente, garage annexe,...).

Elle offre une orientation assez exploitable parce que optimale (nord-sud). Le living s'ouvre vers le sud et la partie nord, moins vitrée, se protège des déperditions thermiques et assure l'intimité.

2.2.3. Description de cette maison

La maison Kettenis est une maison passive construite pour les Johanns par l'architecte Léo Michaelis. Il s'agit d'une maison unifamiliale de quatre façades à ossature bois construite dans un lotissement proche d'Eupen. Cette maison s'élève sur deux niveaux avec un toit en pente (35°C) et comporte un garage en annexe.

La maison occupe une surface de 174 m² pour un volume protégé de 536 m³. Cette maison, très bien isolée, est chauffée par un poêle à pellets ou à granulés de bois. L'eau chaude sanitaire est, quant à elle, produite par un chauffe-eau au gaz, assisté d'un préchauffage par des capteurs solaires (6 m²). Cette maison est équipée d'un système de ventilation mécanique double flux (système D) avec un récupérateur de chaleur (90 %). Notons qu'un puits canadien a été prévu lors de la construction mais qu'il est actuellement sous eau et donc inutilisable.

Afin d'obtenir le label passif, cette maison assure donc une très bonne isolation vu que le niveau d'isolation thermique globale (K) est de 16 (et le besoin net en énergie pour le chauffage du bâtiment [MJ/m²an] - est de 150). La consommation annoncée de la maison est de 25 kWh/m²an. L'étanchéité à l'air a été testée par le test d'étanchéité à l'air et est de 0,5 (n₅₀) sous 50 Pa.

2.2.4. Plan, coupe et élévation

Les plans, coupes et élévations sont disponibles en Annexe et en schéma à la Figure 2.10.

La maison Kettenis a été construite dans un lotissement aux abords d'Eupen. Nous pouvons constater que la recherche d'économie d'énergie est très importante dans ce projet. Cependant, d'un point de vue énergétique, cette logique n'a pas été poussée à un maximum pour des raisons de confort et de choix personnel. Car il semble évident que des maisons mitoyennes consomment encore moins que des maisons quatre façades telle la maison Kettenis. Le fait de s'installer dans un lotissement implique aussi la mise en place de tout un réseau de connexions. Sans compter que le fait d'habiter un lotissement, développe plus facilement l'emploi de la voiture.

La maison s'implante dans une orientation Nord-Sud. Cette orientation est primordiale pour une maison passive car cela permettra de bénéficier des apports solaires en été et même en hiver. Cependant il faudra veiller à prévoir des protections solaires pour se prémunir des surchauffes en été (il en sera question plus loin dans le texte).

Le rez-de-chaussée est composé d'un hall d'entrée donnant sur un vestiaire, sur un local technique et sur le living comprenant le salon et la salle à manger. Le living s'ouvre sur le jardin côté sud-sud-ouest. Il est très intéressant de rassembler le salon et la salle à manger pour bénéficier des sources de chaleur produites dans la cuisine. Sans cela, la cuisine serait sujette à des surchauffes et serait donc peu viable. La sensibilité d'une maison passive est telle que le simple fait de cuisiner un certain temps pourrait provoquer une surchauffe dans le living. Actuellement le living profite donc de l'apport énergétique de la cuisine. Il est à noter qu'il est toujours plus avantageux de placer les pièces apportant le plus de chaleur au centre de la maison pour éviter une plus grande déperdition de la chaleur au travers des murs extérieurs. Il s'agit de choix à faire et de compromis entre gains d'énergie et confort personnel ou d'équilibre en terme de bien-être et gains énergétique qui doivent pouvoir être trouvés. La composition du living procure pourtant un avantage considérable : celui d'être une pièce traversant (Nord-Sud). En effet, le living donne sur la façade nord (côté cuisine) et également sur toute la longueur de la façade sud. Ceci permet une ventilation naturelle transversale ce qui est très précieux en été.

Le rez-de-chaussée est relié au deuxième niveau par un escalier en bois situé dans le living. La maison est chauffée au moyen d'un poêle à pellets placé sous l'escalier. A cet endroit stratégique, la chaleur pourra se diffuser aisément dans toute la maison : le poêle chauffera le living ainsi que tout l'étage.

Le deuxième niveau est composé de deux chambres au sud, dont celle des parents, et d'une troisième au nord. La salle de bain se trouve également côté nord. Nous pouvons à nouveau constater que idéalement d'un point de vue énergétique, cette pièce devrait se trouver au centre de la maison ou alors à la place du local technique qui se trouve en face de l'escalier (côté est). Il faut remarquer que l'air est extrait de la salle de bain donc le confort « respiratoire » est pris en compte. Cependant, le fait d'avoir une fenêtre dans une salle de bain apporte beaucoup plus de confort et de bien-être. Or, dans une maison passive, il n'est pas nécessaire d'ouvrir les fenêtres pour maintenir un certain niveau de confort ou plutôt, le besoin d'ouvrir les fenêtres ne se fait pas ressentir. Mais ces fenêtres interviennent au nom du bien-être dans une pièce, du confort visuel et de la luminosité qui sont également des paramètres très importants. Rappelons que dans une maison passive, les débits d'air hygiéniques nécessaires sont prévus par la ventilation mécanique.

Un garage est annexé à la maison côté est où il protège la plus grande surface du mur.

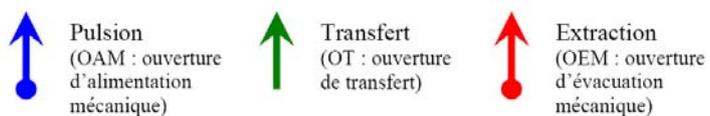
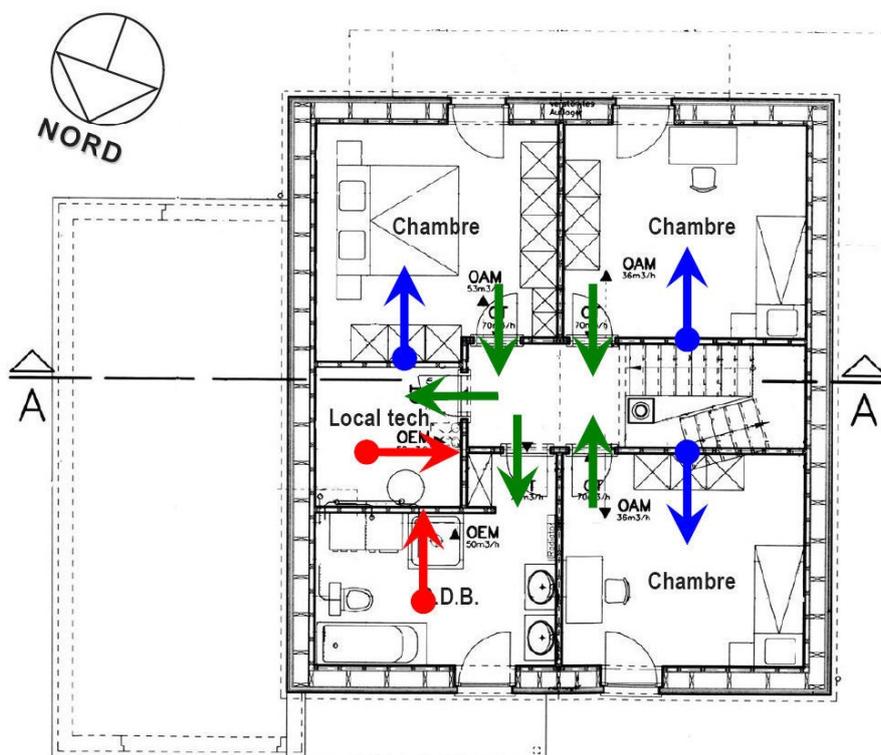
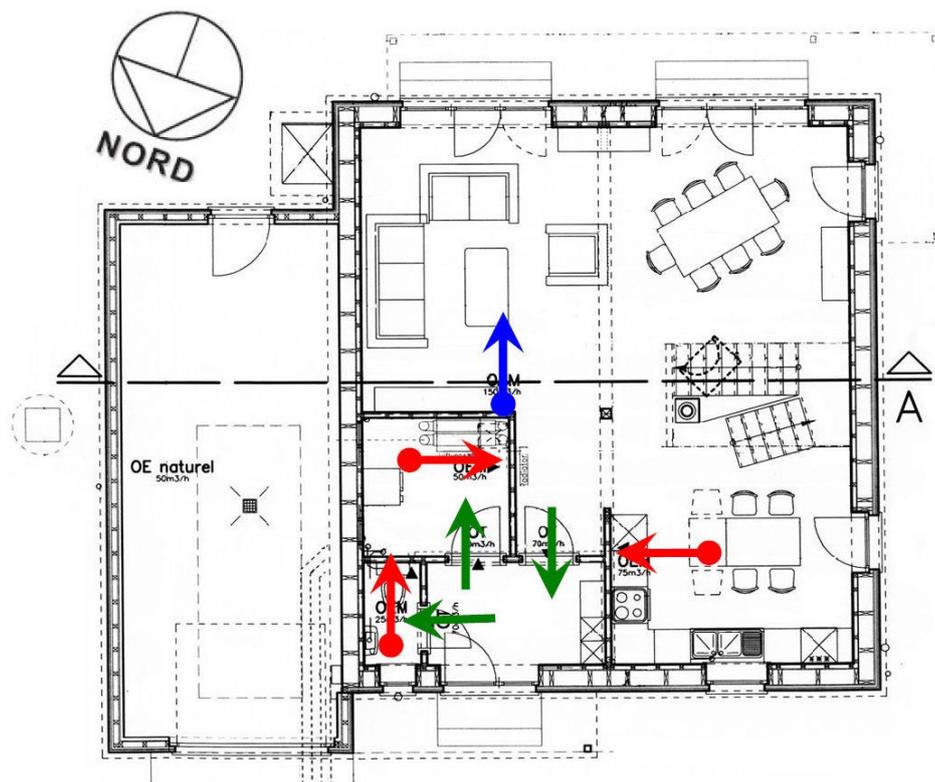


Figure 2.10 : Plan du rez-de-chaussée et du premier étage illustrant les endroits de pulsion, de transfert et d'extraction d'air

2.2.5. Description du cas de base

2.2.5.1. Composition des parois

Les murs extérieurs

Les murs extérieurs sont composés d'une ossature en bois. Cela permet de gagner de la place car la cellulose a été insufflée entre les différents montants. Afin d'éviter le léger pont thermique, 6 cm de laine minérale ont été rajoutés sur la longueur extérieure de l'ossature. Le coefficient de déperdition thermique U est de 0,132 W/m²K. En tout, ce mur contient 30 cm d'isolant. Le tableau ci-dessous reprend la composition de la paroi. Cette paroi est montrée Figure 2.11.

MUR EXTERIEUR (45 cm)	Epaisseur e [mm]	Conductivité thermique λ [W/mK]	Conductivité thermique λ [kJ/hmK]	Capacité thermique c [kJ/kgK]	Densité ρ [kg/m ³]	Résistance thermique R [m ² K/W]
Revêtement int : Planche de bois	18	0,13	0,47	1,88	600	0,014
Isolation laine minérale	60	0,04	0,144	0,84	80	1,500
Ossature-lattage	60	0,13	0,468	1,88	800	0,462
Panneau OSB	15	0,13	0,468	1,88	650	0,115
Cellulose insufflée	250	0,04	0,144	0,84	110	6,250
Ossature 60/250	250	0,13	0,468	1,88	800	1,923
Panneau de fibre de bois	20	0,045	0,162	1,88	110	0,444
Lattage-contre lattage	30	0,13	0,468	1,88	800	0,231
Vide ventilé	30	0,163	0,587	1,017	1,25	0,184
Bardage: bois (résineux) vertical	30	0,163	0,587	1,88	600	0,184

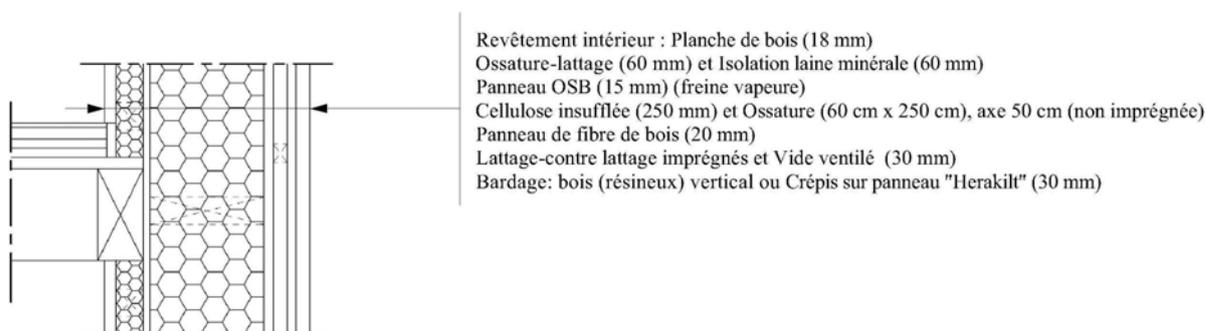


Figure 2.11 : Détail et composition du mur

Rappelons qu'une des particularités des maisons passives est l'épaisseur de leur paroi. Pour approcher cela de manière plus concrète, il est possible de calculer leur emprise en terme de surface au sol. La maison fait :

$$8.9 \text{ m} \times 9.8 \text{ m} \times 2 \text{ (pour les 2 étages)} = 174,44 \text{ m}^2$$

Les murs ont une épaisseur de 45 cm ce qui donne pour surface :

$$(9.8 - 0.45 + 8.9 - 0.45) \times 2 \times 0.45 = 16.02 \text{ m}^2$$

où $(9.8 - 0.45 + 8.9 - 0.45) \times 2$ représente le périmètre

Comme la maison est composée de deux étages, cela correspond à 32 m² de mur (contre 20 m² pour une maison traditionnelle (30 cm d'épaisseur de mur)). Cette surface est considérable. Cela a un réel impact quand il s'agit de construire une maison mitoyenne. Car 32 m² est déjà la taille d'une pièce et la « perte » d'un point de vue spatial est de 10 m² par rapport à une maison traditionnelle.

Le mur donnant sur le garage

L'est de la maison est relié au garage. La composition de ce mur, bien que fort proche de celle du mur extérieur varie légèrement. La différence tient dans les dernières couches côté garage, voici la composition :

- revêtement intérieur (finition en bois)
- isolation laine minérale avec l'ossature-lattage
- panneau OSB, cellulose insufflée avec l'ossature 60/250
- panneau de fibre de bois

Le coefficient de transmission thermique de cette paroi est de $U = 0,129 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Les fenêtres

Les fenêtres sont multi fonctions et sont donc assez complexes à élaborer car elles doivent garantir une vue vers l'extérieur, elles doivent pouvoir s'ouvrir et se fermer, elles doivent aussi pouvoir capter un maximum d'énergie solaire et malgré tout ça, elles doivent garantir un certain niveau d'isolation.

Les fenêtres sont ultra-performantes. Leurs coefficients U (global) est celui annoncé pour une fenêtre triple vitrage complète, soit $0.81 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ces fenêtres sont composées d'un triple vitrage avec du krypton et des couches réfléchissantes. Ce sont les vitres extérieures qui sont réfléchissantes. Le triple vitrage possède un U de $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Le triple vitrage est composé de 3 vitres de 4 mm séparées les unes des autres par 12 mm d'un mélange d'Argon-Krypton. Ces gaz rares permettent de réduire le transfert de chaleur par convection. Les couches réfléchissantes, composées d'oxydes métalliques servent à laisser passer la lumière extérieure et bloquent le rayonnement de chaleur provenant de l'intérieur (côté maison). Ceci permet d'éviter les pertes et d'obtenir de hautes températures sur les surfaces, à l'intérieur. De cette manière le confort s'en trouve amélioré et les risques de condensation, diminués.

Tableau 2.1 : Triple verre isolant avec double couche et remplissage à l'argon-crypton 4b/12g/4/12g/b4

	W/m ² K	dB
Fenêtre	0,81	33
Vitrage	0,5	32

Le vitrage est directement collé sur le châssis. Il correspond au modèle « Dimension » du fabricant Internorm avec verre One du constructeur Internorm¹⁰.

Rappelons qu'un soin tout particulier doit être développé pour la mise en œuvre des châssis afin d'éviter tous ponts thermiques et fuites d'air.

Le toit

Le coefficient de transmission thermique du toit est de $U = 0,117 \text{ W/m}^2\text{K}$. Le toit est composé de 30 cm de cellulose insufflée ainsi que de 6 cm de laine minérale pour éviter le léger pont thermique dû à l'ossature. Au total, cela fait 36 cm d'isolant (Figure 2.12).

TOIT (48cm)	Epaisseur e [mm]	Conductivité thermique λ [W/mK]	Conductivité thermique λ [kJ/hmK]	Capacité thermique c [kJ/kgK]	Densité ρ [kg/m ³]	Résistance thermique R [m ² K/W]
Revêtement int : planche de bois	18	0,13	0,47	1,88	600	0,138
Laine minérale	60	0,04	0,144	0,84	80	1,500
Lattage 40/60	60	0,13	0,468	1,88	800	0,462
<i>Faite en LC 140/340</i>		0,13	0,468	1,88	800	
Cellulose insufflée	300	0,04	0,144	0,84	110	7,500
Chevron 6/30	300	0,13	0,468	1,88	800	2,308
Panneaux de bois	22	0,13	0,468	1,88	650	0,169
Lattage - contre lattage	50	0,13	0,468	1,88	800	0,385
Vide ventilé	50	0,271	0,976	1,017	1,25	0,185
Tuiles	20	1,4	5,04	0,84	2000	0,014

¹⁰ GEORGES B., *Vérification expérimentale du coefficient global de déperdition d'une maison passive à Kettenis*, Faculté des Sciences Appliquées de l'ULg, Laboratoire de Thermodynamique, Département PROMETHE, Juin 2005.

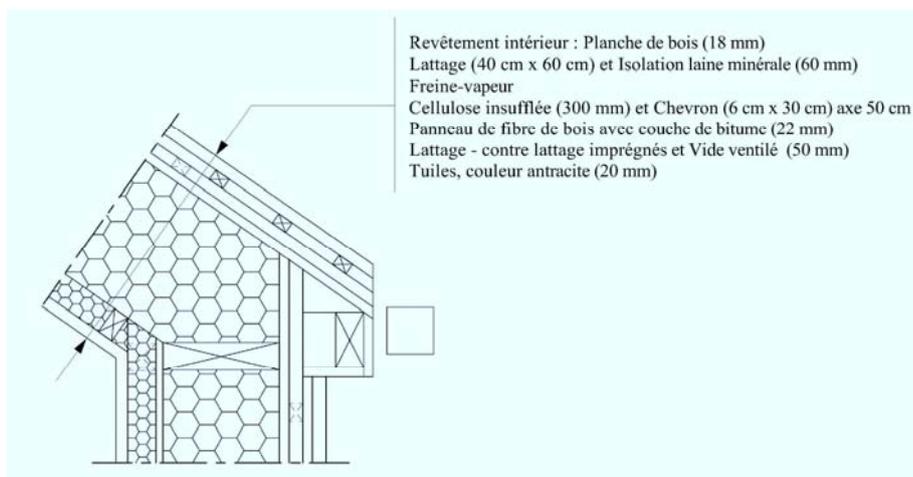


Figure 2.12 : Détail et composition du toit

Les murs intérieurs

Les murs intérieurs sont de type cloisons (Figure 2.13).

MUR INT	Epaisseur e [mm]	Conductivité thermique λ [W/mK]	Conductivité thermique λ [kJ/hmK]	Capacité thermique c [kJ/kgK]	Densité ρ [kg/m ³]	Résistance thermique R [m ² K/W]
Planche en bois	20	0,13	0,468	1,88	650	0,154
Ossature 60/60	60	0,13	0,468	1,88	800	0,462
Isolation laine minérale	60	0,04	0,144	0,84	80	1,500
Structure poteau poutre intégré en LC	18	0,13	0,468	1,88	650	0,138

Le plancher du rez-de-chaussée

Il s'agit de la seule paroi contenant un petit peu d'inertie grâce à son carrelage et à sa chape. Le coefficient de transmission thermique de cette paroi recouverte de carrelages est de $U = 0.179 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Figure 2.14).

PLANCHER DU REZ-DE-CHAUSSEE	Epaisseur e [mm]	Conductivité thermique λ [W/mK]	Conductivité thermique λ [kJ/hmK]	Capacité thermique c [kJ/kgK]	Densité ρ [kg/m ³]	Résistance thermique R [m ² K/W]
Carrelage	30	1,2	4,32	0,84	2000	0,025
Chape	60	1,44	5,2	0,84	2200	0,042
Panneau OSB	22	0,13	0,468	1,88	650	0,169
Cellulose insufflée	250	0,04	0,144	0,84	110	6,250
Gîtage 60/250	250	0,13	0,468	1,88	800	1,923
Panneau fibre-ciment	10	1,25	4,5	0,84	2000	0,008

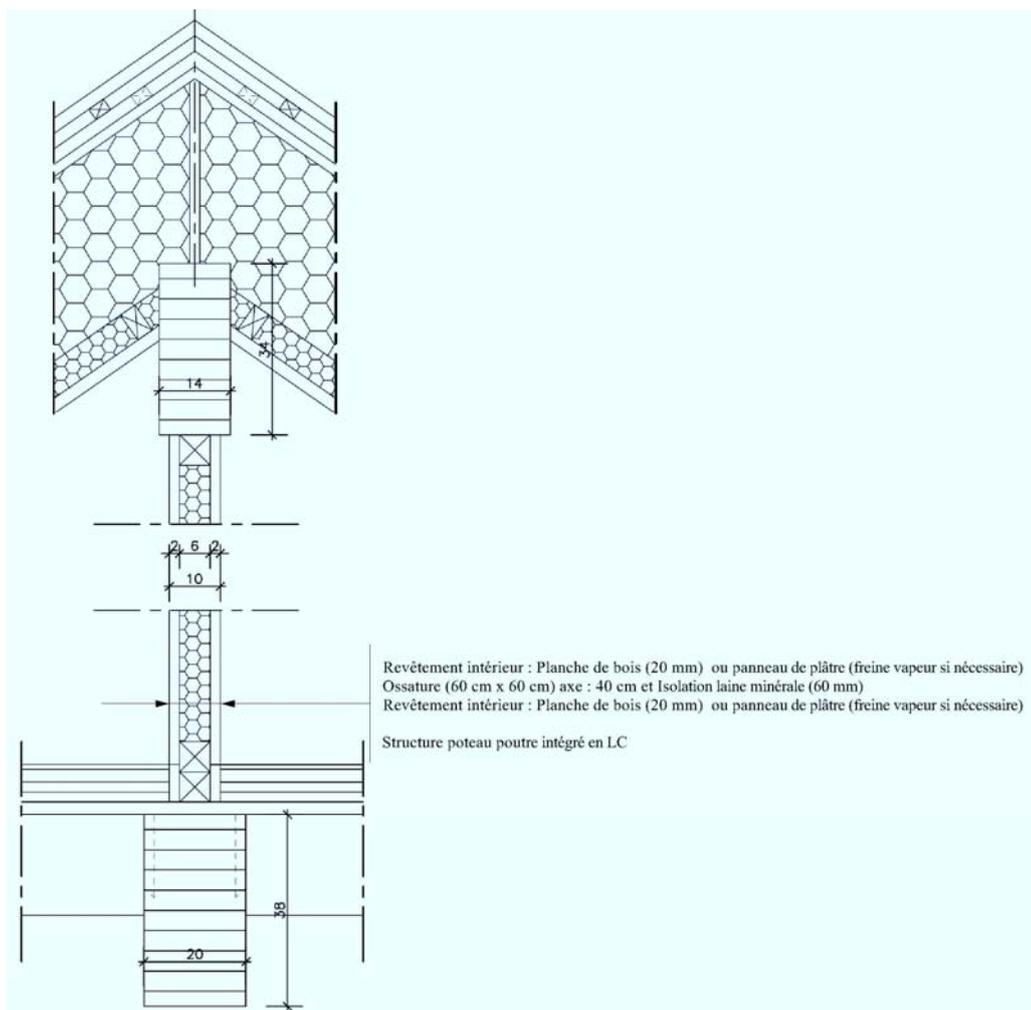


Figure 2.13 : Détail et composition des murs intérieurs

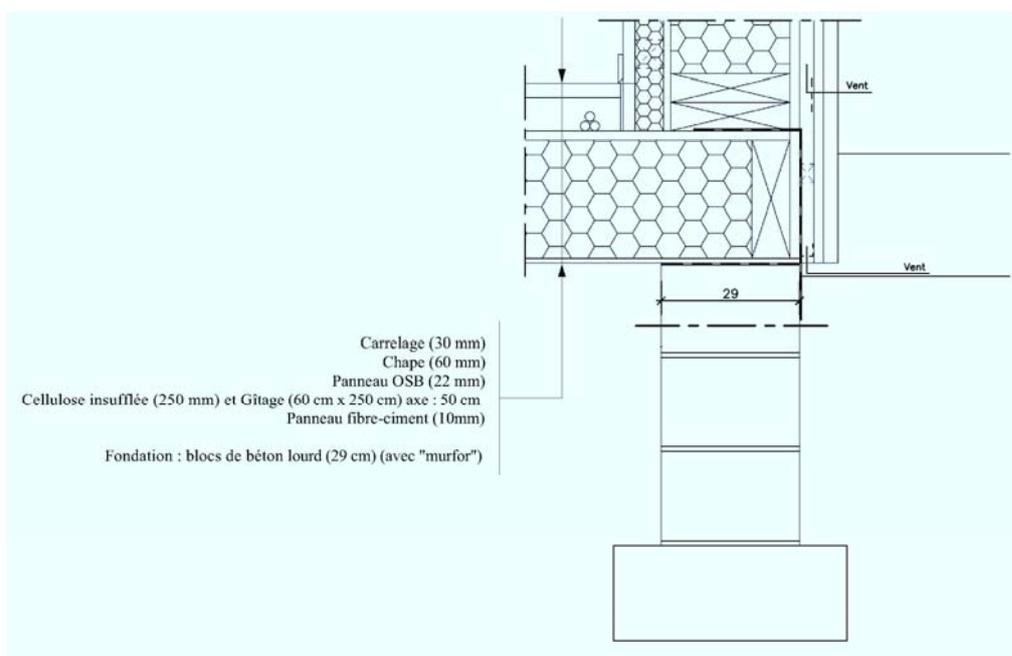


Figure 2.14 : Détail et composition du plancher du rez-de-chaussée

Le plancher du premier étage

Ce plancher laisse les poutres apparentes au living (Figure 2.15).

Plancher (étage)	Epaisseur e [mm]	Conductivité thermique λ [W/mK]	Conductivité thermique λ [kJ/hmK]	Capacité thermique c [kJ/kgK]	Densité ρ [kg/m ³]	Résistance thermique R [m ² K/W]
Plancher en bois	15 - 18	0,13	0,47	1,88	600	0,115 - 0,138
Isolation phonique	20 - 40	0,04	0,144	0,84	110	0,5 - 1
Planches de bois	24	0,055	0,2	1,88	300	0,436
Gîtage en LC 10/20	20 - 20	0,13	0,468	1,88	800	
Poutre principale LC 200/380	200/380	0,13	0,468	1,88	800	

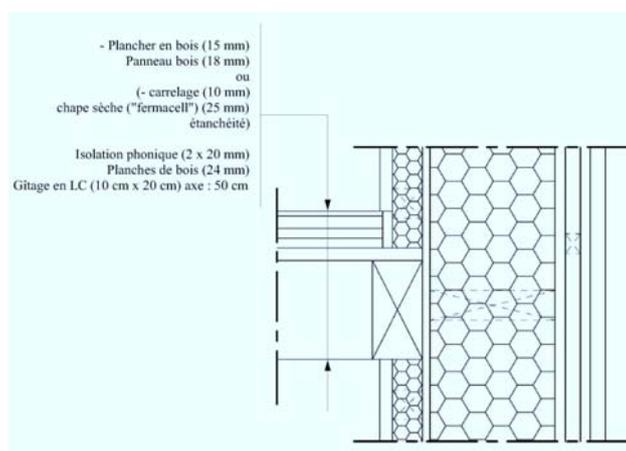


Figure 2.15 : Détail et composition du plancher du premier étage

2.2.5.2. L'étanchéité à l'air

Il est essentiel que l'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment soit très performante. Une mauvaise étanchéité peut induire des courants d'air involontaires et même incontrôlables qui peuvent perturber le sens du flux de la ventilation. Il faut par conséquent éviter les fuites. Celles-ci se trouvent principalement aux endroits de raccord avec les parois extérieures, le toit et les planchers mais également aux endroits de passage des tuyaux d'égout, d'eau chaude, de ventilation, des câbles électriques et au niveau des portes, des fenêtres,... Tous les raccords doivent être calfeutrés et dans les maisons à ossature bois, comme c'est le cas de la maison Kettenis, des pare-air ou feuilles étanches sont installés derrière les chevrons.

Pour assurer un maximum de précision dans cette mise en œuvre fort rigoureuse, le bâtiment sera pressurisé lors du test "Blowerdoor". Celui-ci permet de mesurer l'étanchéité à l'air des bâtiments au moyen d'un ventilateur réglable qui est calé de façon hermétique dans une ouverture du bâtiment où il va pouvoir créer une différence de pression entre l'intérieur du bâtiment et l'extérieur (toutes les portes et fenêtres sont fermées). Deux cas doivent être testés (NBN EN 13829) : en dépression (pour tracer de l'intérieur les

éventuelles fuites) et en surpression (traçage des fuites par fumée). Plusieurs mesures de débit d'air sont effectuées et au final, le rapport entre le débit d'air établi à une différence de pression de 50 Pascal (calculé par interpolation des mesures) et le volume de la pièce donne l'indice de renouvellement d'air n_{50} . Cet indice représente donc le nombre de renouvellement total du volume d'air de la pièce en une heure, pour une différence de pression de 50 Pa. Notons qu'un vent trop fort (maximum jusqu'au niveau 3 de l'échelle de Beaufort) peut influencer négativement les résultats du test.

Lors de ce test, les fuites d'air pourront être localisées soit par *thermographie infrarouge* où des zones refroidies par le passage de l'air provenant de l'extérieur sont visualisables soit par *anémomètre* où le déplacement de l'air à l'endroit de l'infiltration lors du test Blowerdoor est détecté (avec intérieur en dépression) soit par une *fumée artificielle* qui s'infiltré lors du test Blowerdoor aux endroits perméables permettant de visualiser facilement les fuites (avec intérieur en surpression).

L'étanchéité à l'air de la maison Kettenis a donc été calculée lors du test d'étanchéité à l'air sous 50 Pa, le Blowerdoor (Figure 2.16). Le renouvellement d'air sous une différence de pression de 50 Pascal (n_{50}) entre l'intérieur et l'extérieur est de 0,5 vol/h. Rappelons que la norme exige 0,6 vol/h pour une maison passive. Concrètement, il faut considérer l'atmosphère sous 2 Pa ce qui nous permet d'établir l'hypothèse que les infiltrations sont de 0,02 vol/h, en considérant une relation linéaire. Cela correspond pour un volume total annoncé de 536 m³ à « 10,72 m³/h » (et 268 m³/h sous 50 Pa) ce qui est très performant !



Figure 2.16 : Test Blowerdoor de la maison Kettenis

2.2.5.3. Protection solaire

Les maisons passives sont sujettes à des problèmes de surchauffe. Il est donc impensable ou peu réaliste de ne rien prévoir au niveau des fenêtres pour éviter ou contrôler les apports dûs au rayonnement solaire. Plusieurs systèmes sont envisageables comme les auvents, les stores,...

Remarque : Les plans prévoient ces auvents mais il faut constater que dans la réalité, les propriétaires ont finalement placé des stores intérieurs. Nous n'en avons pas tenu compte.

Sur les plans, les fenêtres sud et ouest sont équipées de protections solaires permanentes et fixes servant de balcons au niveau du premier étage. Les chambres au sud bénéficient également de protections solaires. Il faut remarquer que les auvents à l'ouest ne fonctionnent pas car le soleil est trop bas. A l'ouest, il faudrait presque installer alors des protections verticales.

Le dimensionnement de ces protections, d'une longueur de 1,1 m, assure que le 21 juin à midi (hauteur maximale du soleil à 62°C), la fenêtre soit ombragée. Cela correspond à un rapport de 1/2 entre la hauteur de la fenêtre et la longueur de la protection solaire.

2.2.5.4. Système énergétique : les installations

La ventilation

Le renouvellement d'air exigé est déduit d'une relation entre le débit d'air frais et le pourcentage prévisible de personnes insatisfaites (PPD - Predicted Percentage Dissatisfied) par la qualité de l'air ambiant. Cette relation est connue et est représentée à la Figure 2.17 sous la forme d'un pourcentage de PPD en fonction du volume d'air de ventilation en m³/h par personne.

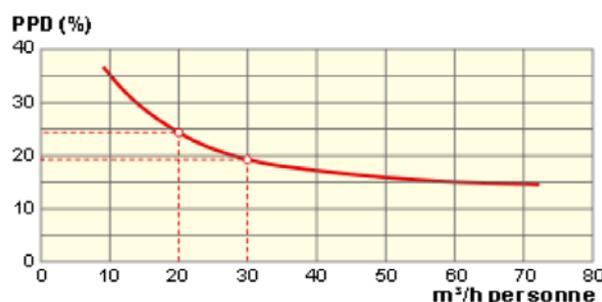


Figure 2.17 : Pourcentage de PPD en fonction du volume d'air de ventilation en m³/h et par occupant¹¹

« Les normes internationales suggèrent de n'admettre que 20 % maximum de personnes insatisfaites, ce qui correspond à un renouvellement d'air de 30 m³/h par personne. »¹² Cette valeur des 30 m³/h correspond donc à une quantité jugée nécessaire afin d'évacuer ou de diluer les odeurs corporelles, celle émises par les matériaux du bâtiment et l'humidité excédentaire.¹³ Les résultats obtenus en terme de débit suite à l'application de la norme traduisent cette quantité des 30 m³/h par personne.

Les renouvellements par heure obtenus pour la norme sont de plus ou moins 1 pour les pièces de vie. Pour les pièces de service, ce débit augmente un peu : 2,5 h⁻¹ dans la salle de bain. Et avec un maximum de +/- 6 h⁻¹ pour le hall d'entrée et le vestiaire.

La maison est équipée d'un système de ventilation mécanique double flux (système D) avec un récupérateur de chaleur (90%) de marque UBRINK. C'est via cette ventilation que de l'air frais sera amené dans la maison pour satisfaire le confort respiratoire.

¹¹ *Energie +, Conception et rénovation énergétique des bâtiments tertiaires*, Version 5, CD réal. Architecture et climat, UCL, 2006.

¹² Ibidem

¹³ CLAESSENS J., *AMCO 2363 Physique appliquée au bâtiment II : techniques spéciales*, UCL, année académique 2006-2007.

Dans la maison Kettenis, l'air est pris à l'extérieur, il passe dans l'échangeur de chaleur ou par le by-pass et est pulsé dans le living et dans les trois chambres à l'étage. L'air va être attiré dans les halls d'entrée et de nuit qu'il va traverser pour être repris à plusieurs endroits : dans le wc, local technique du rez-de-chaussée et du premier étage et jusque dans la salle de bain. Une prise d'air se fait également au niveau de la cuisine, dans le living. L'air une fois repris va repasser au travers de l'échangeur de chaleur pour récupérer la chaleur sortante puis sera évacué définitivement de la maison. La Figure 2.18, décrit le trajet de l'air au travers de la maison. La Figure 2.10 retrace le trajet au niveau des plans.

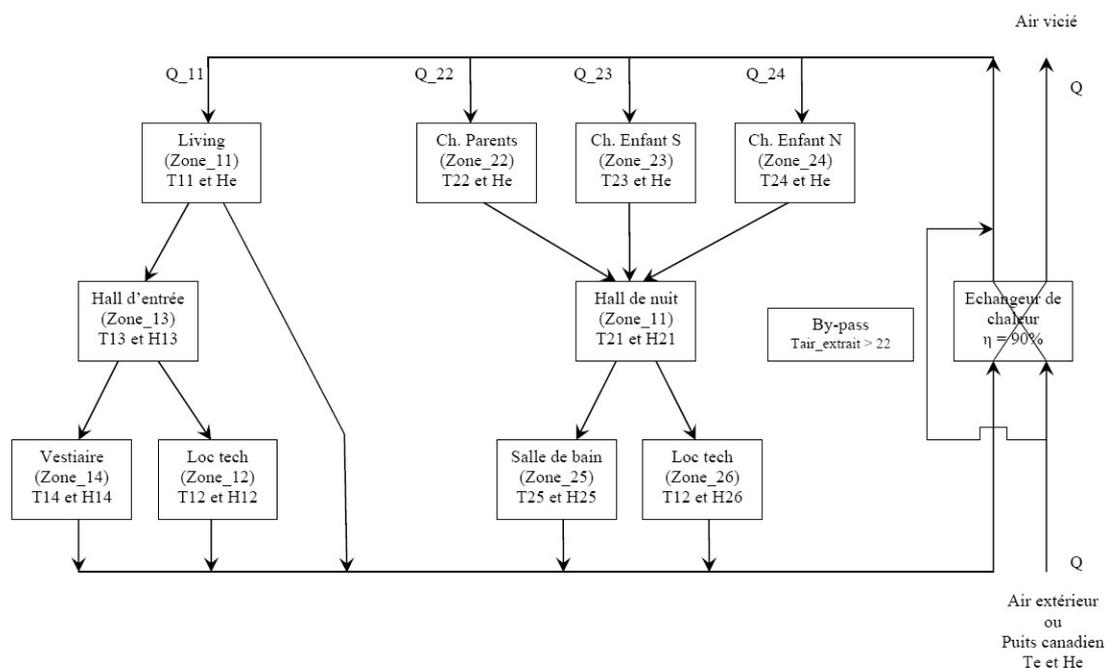


Figure 2.18 : Système de ventilation

Le calcul du renouvellement de l'air a été établi selon la norme NBN D50-001. La qualité de l'air peut être calculée en fonction de débits maximum et minimum. Le Tableau 2.2 reprend tout le calcul des débits et du renouvellement par heure dans les différentes pièces de la maison. La ventilation peut se régler sur trois positions. La vitesse maximale du débit correspond aux débits conformes à la norme. Dans ce cas, le débit d'air entrant qui est le même que celui sortant, est de 275 m³/h. Ce débit est assez important. Aussi, dans la réalité, les habitants de la maison Kettenis ont positionné la ventilation sur la première position (de manière permanente). Cette vitesse minimale assure un débit de 110 m³/h. Avec une masse volumique de 1.2 kg/m³, la masse d'air entrant est de 330 kg/h d'air pour le débit maximal et de 132 kg/h d'air pour le débit minimal. Si les débits de pulsion et d'extraction sont imposés, les débits de transfert d'une pièce à une autre en sont directement déduits. (Voir la Figure 2.10 pour mieux visualiser les différents transferts de l'air.)

Remarquons que le rapport entre le débit 1 et le 3 n'est pas de 1/3. Certains fabricants positionnent les débits des installations avec ce rapport. Ici ce rapport entre la position 1 et 3 est de 2/5. Le débit 1 est plus important qu'avec le rapport 1/3.

Tableau 2.2 : Calcul des débits de ventilation et de renouvellement d'air

Zone	Zone11	Zone12	Zone13	Zone14	Zone22	Zone23	Zone24	Zone25	Zone26
Pièce	Living	Local technique	Hall d'entrée	Vestiaire	Ch. Parent	Ch. Enfant Sud	Ch. Enfant Nord	Salle de bain	Local technique
Surface au sol	57,93	5,52	4,95	1,60	14,79	13,83	13,83	11,33	5,52
Volume	144,84	13,80	12,37	4,00	39,47	38,81	38,81	29,17	23,21
Débit de ventilation nominale m ³ /h/m ²	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60
Débit de ventilation calculé (m ³ /h)	208,56	19,87	17,81	5,75	53,23	49,77	49,77	40,77	19,87
Choix des débits en fonction de la réglementation (min ou max)	Min 75 m ³ /h et max 150 m ³ /h + Reprise dans la partie cuisine	du living	Zone de transfert d'air	Reprise d'une partie des débits venant du hall (pour wc : min 25 m ³ /h)	Min25 m ³ /h et max 36 m ³ /h par personne	Min25 m ³ /h et max 36 m ³ /h par personne	Min25 m ³ /h et max 36 m ³ /h par personne	Min 50 m ³ /h et max 75 m ³ /h reprise d'une partie des débits du premier étage	Reprise d'une partie des débits du premier étage
Débit (m ³ /h) (« vitesse 3 »)	150 + (-75)	-50	(75)	-25	53	36	36	-75	-50
Débit actuel (m ³ /h) (« vitesse 1 »)	60 + (-30)	-20	(30)	-10	21,20	14,40	14,40	-30	-20
Renouvellement de l'air (1/h) selon la réglementation	1,036	3,623	6,064	6,258	1,343	0,928	0,928	2,571	2,154
Renouvellement de l'air (1/h) selon la réalité (« vitesse 1 »)	0,414	1,449	2,426	2,503	0,537	0,371	0,371	1,028	0,862

Ces renouvellements d'air, conformes à la norme, correspondent à 30 m³/h/personne. Ce débit dépend de la fonction du local et de sa surface.

La ventilation permet d'éviter la condensation (absence de buée). Elle renouvelle l'air en continu tant le jour que la nuit, garantissant un air frais. Mais cette ventilation qui distribue l'air dans toute la maison force une température égale dans toutes les pièces : tant dans la salle de bain où généralement il est nécessaire d'avoir plus chaud que dans les chambres.

Il faut également observer qu'en hiver, plus les débits d'air entrant seront importants, plus l'humidité relative intérieure sera faible car l'air entrant, asséché par le préchauffage, dilue la vapeur d'eau produite par des sources internes.

Transfert entre les pièces

Une grande partie de l'air va être transférée d'une pièce à l'autre jusqu'à ce qu'elle soit extraite de la dernière pièce. Cette succession de transferts s'opère des lieux de vie vers les lieux plus humides. Ces transferts d'air se font via les portes qui dans le bas, possèdent une fente d'environ 1,2 cm comme toutes les portes standard. Les halls d'entrée et de nuit ne servent qu'au transfert. Les locaux techniques, wc et salle de bain permettent un transfert pour une extraction de l'air devenu vicié. L'idéal est de placer la bouche d'extraction juste au dessus de la source d'humidité.

Le récupérateur de chaleur

Le récupérateur de chaleur (Figure 2.19) joue un rôle essentiel dans le bilan énergétique du bâtiment. Placé sur le circuit de la ventilation de l'air, il permet de récupérer la chaleur de l'air sortant de la maison pour la transférer à l'air pulsé. Il constitue un moyen passif pour apporter de la chaleur dans les pièces. Dans les cas de surchauffe intérieure ou afin de les éviter, il permet d'être contourné au moyen d'un by-pass. Le by-pass permet donc de pulser l'air à température extérieure directement dans les pièces en contournant le récupérateur de chaleur. La chaleur de l'air sortant n'est alors plus récupérée et est expulsée sans avoir cédé sa chaleur. L'apport de bactéries est fort réduit par l'utilisation de filtres et tout simplement par le fait que l'air n'est pas recyclé car les flux entrant et sortant ne sont en aucun cas en contact.

Le récupérateur de chaleur de la maison Kettenis possède un rendement de 90%. Un by-pass est réglé sur la température sortant des pièces humides et lorsque cette température dépasse les 22°C, le by-pass s'ouvre. Cela peut se révéler traître dans certain cas : les températures des pièces nord ou sud pouvant varier. Notons que ce by-pass peut être enclenché manuellement.



Figure 2.19 : Récupérateur de chaleur

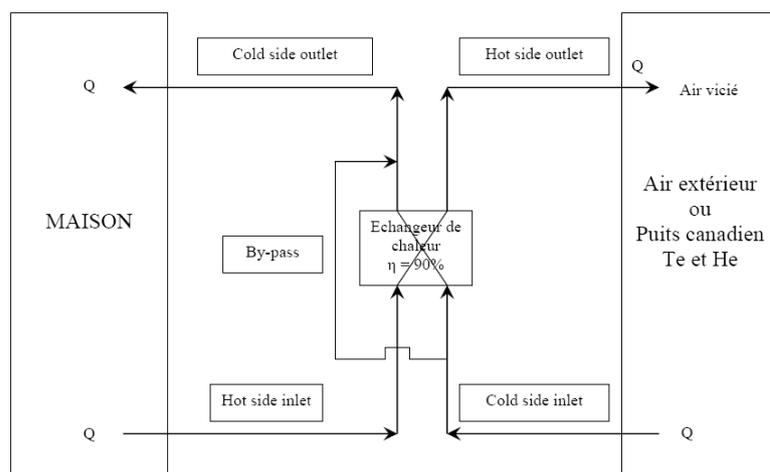


Figure 2.20 : Echangeur de chaleur

Les différentes températures du récupérateur de chaleur sont illustrées par la Figure 2.21 représentant une année moyenne (année chauffée comportant des gains internes). Cette figure reprend les deux températures entrant dans l'échangeur et les deux autres en sortant :

- T° sortant de l'échangeur vers l'extérieur = hot side outlet temperature
- T° pulsée dans la maison = cold side outlet temperature
- T° extérieure entrant dans l'échangeur = cold side inlet temperature
- T° de l'air vicié entrant dans l'échangeur = hot side inlet temperature

Les températures extraites de la maison (en jaune) sont fort proches de celles qui seront pulsées (en rose) et cela grâce au rendement de 90% du récupérateur de chaleur. Cette récupération rendra la température extraite de la pièce (en jaune puis bleu ciel) quasi équivalente à celle de l'air extérieur (bleu foncé). Ceci illustre bien l'intérêt de ce récupérateur et permet aussi de comprendre que les besoins de chaleur sont nettement moins importants par rapport à une maison ne possédant pas de ventilation double flux avec récupérateur de chaleur. Cependant, un appoint reste nécessaire.

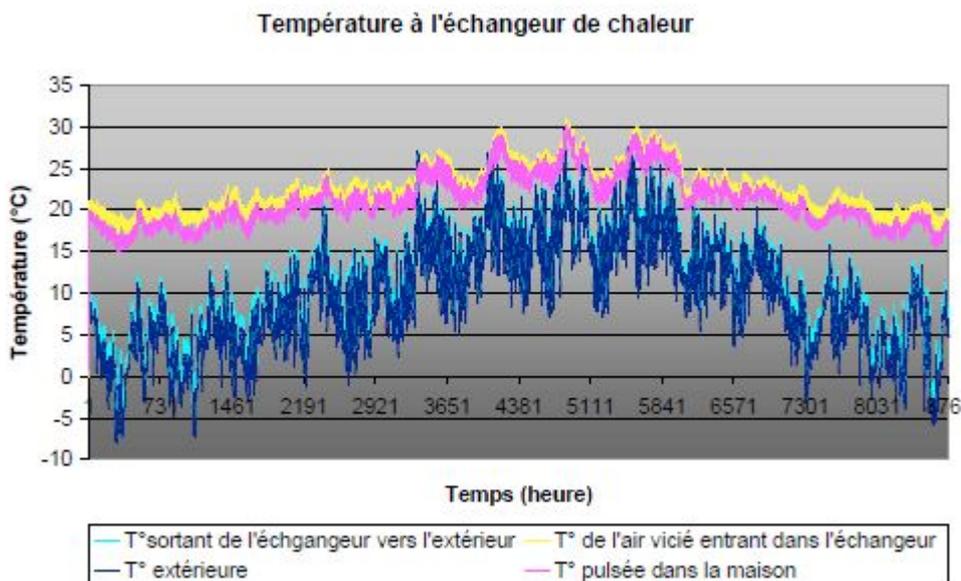


Figure 2.21 : Température au niveau du récupérateur de chaleur

L'effet du by-pass illustré par la Figure 2.22 est assez clair et permet de voir que quand le by-pass s'enclenche, c'est l'air extérieur qui sera pulsé dans la pièce. (Lorsque la courbe mauve se confond avec la courbe bleue). Le by-pass a été modélisé en tenant compte de la réalité c'est-à-dire de la consigne sur la température sortant des pièces humides (quand cette température $> 22^{\circ}\text{C}$, le by-pass s'enclenche) et d'un enclenchement éventuellement manuel. Pour ce faire, des conditions ont été imposées pour assurer la gestion de l'enclenchement du by-pass :

- T° de l'air extrait $> T^{\circ}$ extérieure
- T° de l'air extrait $> 22^{\circ}\text{C}$
- T° extérieure $> 16^{\circ}\text{C}$

Lorsque ces trois conditions sont remplies, alors le by-pass s'enclenche.

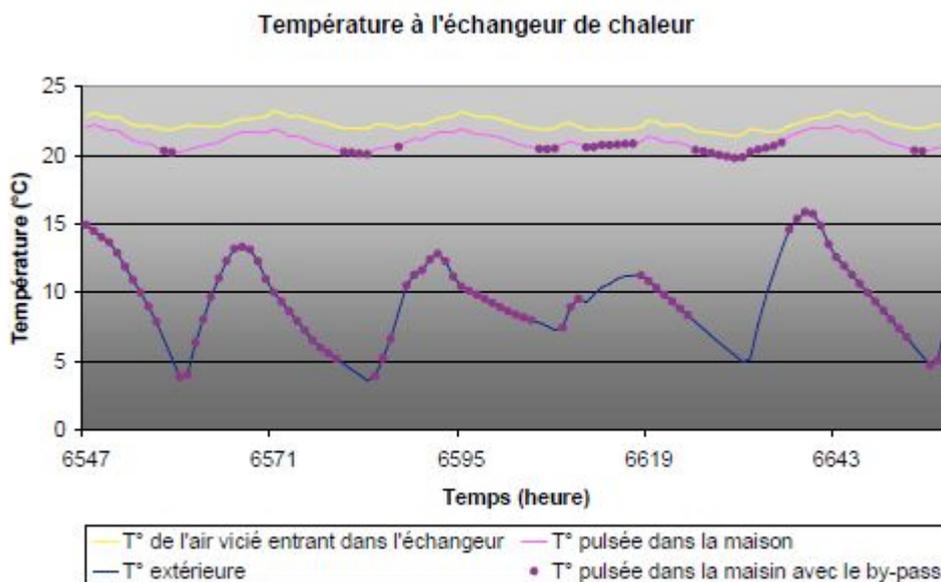


Figure 2.22 : Effet du by-pass au niveau des températures du récupérateur de chaleur :
zoom sur quatre jours en septembre

La Figure 2.23 affiche les températures à l'échangeur pour une année sans chauffage. Cette figure permet de voir qu'avec ce récupérateur de chaleur, la demande de chauffage sera très faible car il s'agira de remonter la courbe rose à la température de consigne. Ceci annonce déjà l'enjeu qu'il y a dans le choix du système de chauffage.

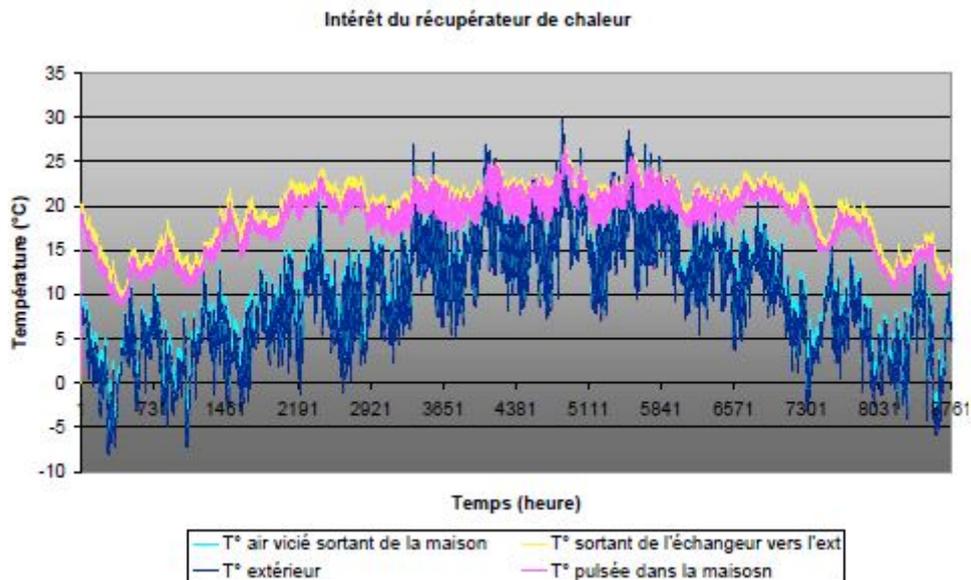


Figure 2.23 : Température au niveau du récupérateur de chaleur avec by-pass et sans chauffage

Le puits canadien

Lors de la construction de la maison Kettenis, un puits canadien (D150) a été conçu en autoconstruction. Le tracé de celui-ci, environ 30 m, est visible sur le plan en annexe. Actuellement il n'est plus en service et n'aurait jamais fonctionné car il a été « inondé ». Ce puits est à une profondeur de 1,20 m.

Le puits canadien offre deux avantages :

- En hiver, le sol est plus chaud que la température extérieure. De ce fait, l'air froid est préchauffé lors de son passage dans ce circuit souterrain ce qui permet une économie d'énergie sur le chauffage de l'air à pulser. Ce système permet d'empêcher la formation de givre dans l'échangeur, d'en augmenter le rendement et d'éviter l'usage d'une résistance électrique.
- En été, le sol est naturellement plus frais que l'air extérieur qui lors de son passage dans le puits canadien va se refroidir et pouvoir rafraîchir la maison qui est exposée plein sud. Il a pour but de diminuer les risques de surchauffe.

Nous verrons plus loin dans ce texte ce que le puits canadien permet d'apporter au moyen des simulations où une analyse plus précise en terme de température suivra.

Il y a cependant quelques précautions à prendre :

- Evacuer les condensats : « Une mauvaise récupération des condensats ou une récupération partielle peut permettre à des bactéries pathogènes de se développer et

pulluler dans le tuyau. Il y a donc un enjeu important à récupérer les condensats. »¹⁴ Pour cela, une pente de 2% dans le sens d'écoulement de l'air sera nécessaire. Le siphon permettant l'écoulement des condensats sera relié vers le bas à l'évacuation des eaux.

- Se méfier du radon : le puits Canadien devra être parfaitement étanche dans sa partie enterrée, car ce gaz radioactif et donc cancérigène peut s'infiltrer dans les vides sanitaires et dans l'habitation en profitant d'une dalle non étanche ou de fissures. (Ceci surtout en dessous du sillon Sambre et Meuse).

Le principe du puits est repris sur la Figure 2.24 ci-dessous.

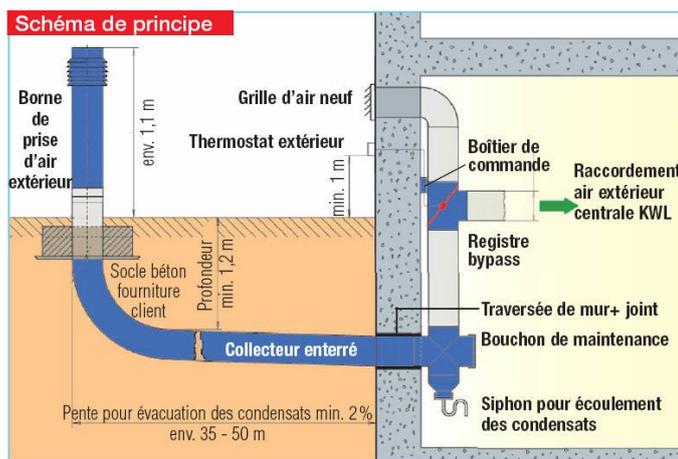


Figure 2.24 : Schéma de principe d'un puits canadien¹⁵

En pratique, « Le diamètre est déterminé par le débit d'air qu'il est nécessaire de renouveler ... Il convient que l'air ne dépasse pas 2 m/s dans le puits car plus la vitesse est importante et moins l'air se réchauffe/refroidit. Pour obtenir un réchauffement correct, l'air doit passer plus de 20s sous terre. »¹⁶ Il est à noter que plus le diamètre est grand, plus l'air circule au centre du tuyau diminuant ainsi l'impact du puits sur la température.

Le puits sera placé à une certaine profondeur : « La profondeur du tuyau donnera la température du sol vers laquelle l'air du puits va tenter de s'égaliser. Il faut descendre au-delà de 1,20 m minimum, ensuite plus on descend en profondeur et plus l'augmentation du gain en température sera faible. Tout du moins, il ne se justifiera plus par rapport à l'investissement en terrassement. »¹⁷ Une profondeur optimale serait de 1,80 m. En ce qui concerne la longueur du puits, il faut compter environ 35 à 50 m de conduit. Ces puits canadiens réclament donc une longueur assez importante définie lors du dimensionnement. Ce dimensionnement représente un compromis entre la meilleure efficacité de l'échange thermique (tuyau long et droit) et le minimum de pertes de charges (tuyau large et court). Il sera intéressant d'analyser si le dimensionnement en longueur du puits canadien de la maison Kettenis (30 m) est réellement trop court ou si en augmenter la longueur aurait un avantage thermique.

¹⁴ <http://www.fiabitat.com/puits-canadien.php> et <http://www.helios-fr.com>

¹⁵ <http://www.helios-fr.com>

¹⁶ <http://www.fiabitat.com/puits-canadien.php> et <http://www.helios-fr.com>

¹⁷ Ibidem

Le dimensionnement du puits canadien dépend non seulement du débit mais aussi des matériaux. Matériaux pour lesquels, aucun ne semble vraiment idéal sauf peut-être, le PEHD ou Polypropylène haute densité, le PE ou Polypropylène ou encore le Polyéthylène (PE) (le plus écologique, mais assez cher). Les puits canadiens existent également en béton.

Notons que les rendements peuvent varier en fonction de la qualité des sols ; une terre humide aura un meilleur rendement qu'un sous sol pierreux et sec.

Le poêle à pellets

A l'origine, les habitants de la maison Kettenis avaient prévu un poêle à bois, mais pour des raisons de rendement, d'étanchéité (amenée d'air), de cheminée, de facilité d'approvisionnement, ils ont décidé d'installer un poêle à pellets (Figure 2.25).

L'avantage du poêle est non seulement qu'il bénéficie d'une prime de 250 euros mais surtout qu'il est moins cher qu'une installation de chauffage central. Il devient intéressant quand le bâtiment possède une bonne isolation et implique cependant une conception étudiée des espaces ouverts.

Le chauffage de la maison Kettenis est assuré par un poêle à granulés de bois de marque Rika (Spécifications techniques en Annexes). Son emplacement stratégique, sous l'escalier va permettre de diffuser la chaleur tant au rez-de-chaussée qu'au premier étage et dans les chambres. Son allumage est automatique (par thermostat) mais il peut se faire également de manière manuelle. Le système de ventilation, une haute température de contact des parois (ossature bois) et ce poêle à pellets permettent d'assurer une température d'ambiance de +/- 19 à 21 °C (dans toute la maison). Notons qu'il n'y a pas d'appoint dans la salle de bain et que, au dire des occupants, personne n'en a ressenti le besoin.



Figure 2.25 : Poêle à pellets : fonctionnement et emplacement

Il faut cependant remarquer que si la présence d'un poêle est très agréable pour l'ambiance qu'il procure dans le lieu de vie, le fait de chauffer la maison au poêle à pellets force, en hiver, les occupants, à laisser les portes des chambres ouvertes pendant la journée pour assurer une bonne température dans toute la maison (ce qui ressort dans les simulations).

L'apport de chaleur par la ventilation ne suffit pas à obtenir une température suffisante. Le fait de devoir laisser la porte de sa chambre ouverte pour être sûr d'avoir assez chaud semble quand même nuire partiellement au confort. Mais l'ouverture des portes se fait pendant la journée, pendant que les personnes sont à leurs activités professionnelles ou scolaires. Il n'est pas nécessaire de laisser les portes ouvertes toute la soirée et la nuit. L'ouverture de jour suffit. Cela dépend également des consignes de chauffage programmées.

Le poêle est alimenté en pellets au moyen d'une vis d'alimentation (Figure 2.25) reliant le réservoir (pouvant contenir 30 kg de granulés) au foyer ou pot de combustion (en fonte). Notons que ce poêle a une certaine inertie et une fois la chaleur emmagasinée, le poêle restera chaud et mettra un certain temps à se décharger. Cela demande une bonne gestion de l'appareil pour éviter les surchauffes et la mise en marche à temps. La puissance de chauffage qui peut varier de 2,5 à 10 kW.

Les pellets sont des granulés de bois. Le tableau ci-dessous (Tableau 2.3) reprend leur spécificité¹⁸.

Valeur calorifique	5,3 kWh/kg
Densité	700 kg/m ³
Teneur en humidité	8% du poids au max
Part de cendres	1% du poids au max
Diamètre	5 - 6,5 mm
Longueur	30 mm au max
Contenu	100% de bois non traité et sans adjonction de produit liant (part d'écorce 5% au max.)
Emballage	en sacs, composés de plastique neutre pour l'environnement, biodégradables ou en papier (2 - 3 couches/similaire à un sac de ciment)

Tableau 2.3 : Spécification des pellets

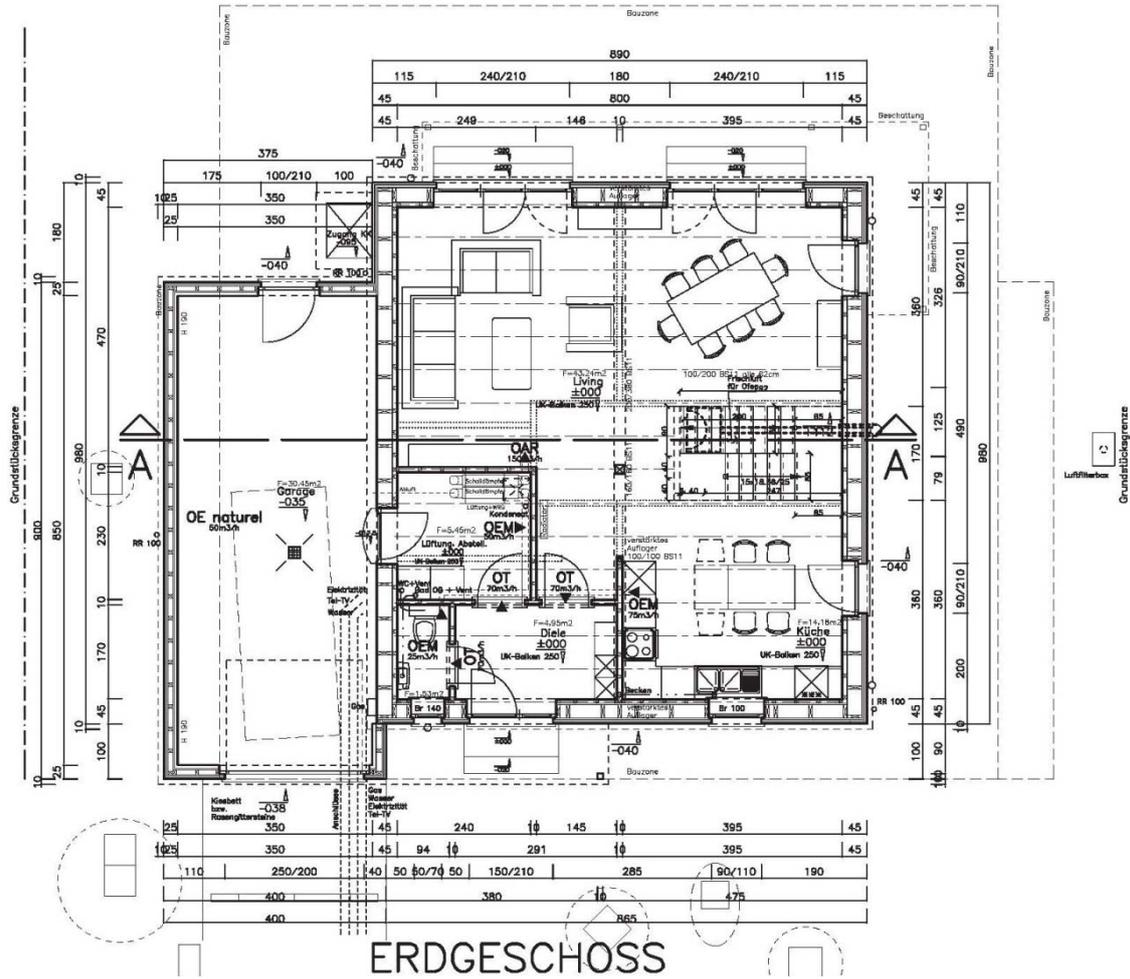
Le boiler et les capteurs solaires

Le boiler est couplé à un système de capteur solaire (6m²) qui vont permettre de préchauffer l'eau chaude sanitaire. Le boiler de marque Sieger a besoin d'un appoint, au gaz dans ce cas-ci.

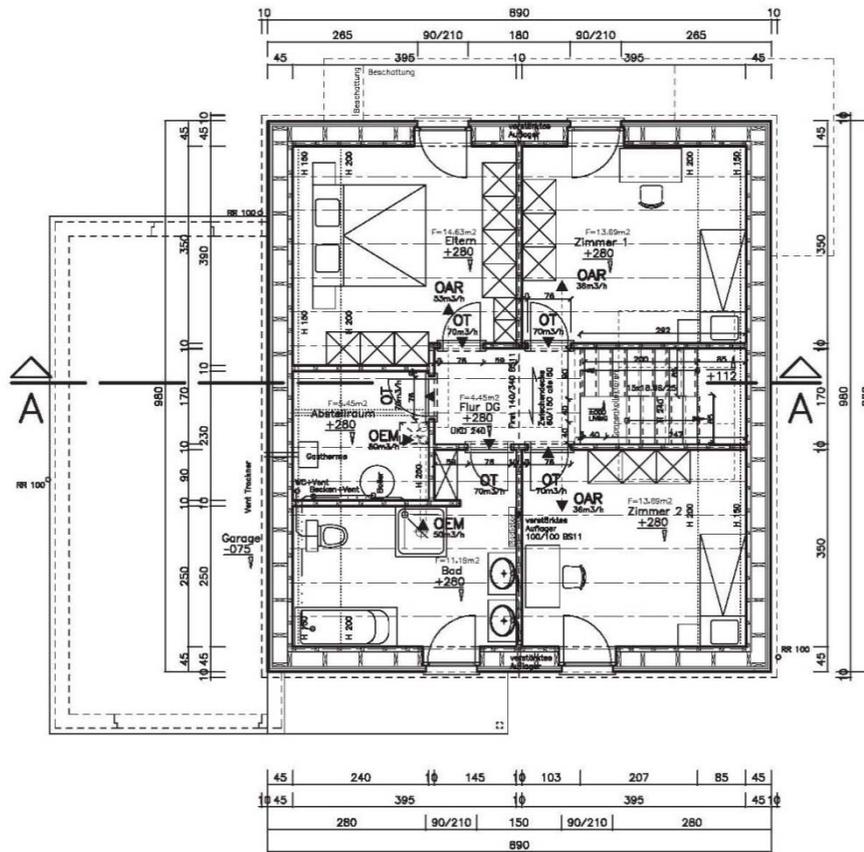
Ces panneaux solaires sont placés sur le toit, exposés au sud et inclinés à 35°C. Notons que l'inclinaison de 45°C est plus avantageuse comme ont pu le démontrer de précédents travaux¹⁹.

¹⁸<http://www.rika.at/fr/pelletofen/>

Annexe 2 : Plan du RDC de la Maison Kettenis

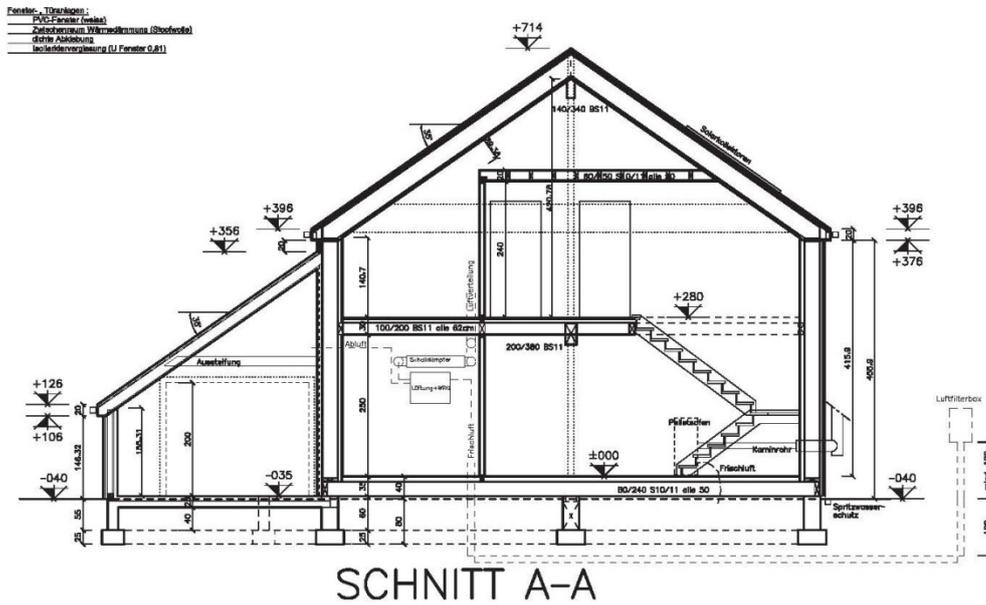


Annexe 3 : Plan du R+1 de la Maison Kettenis

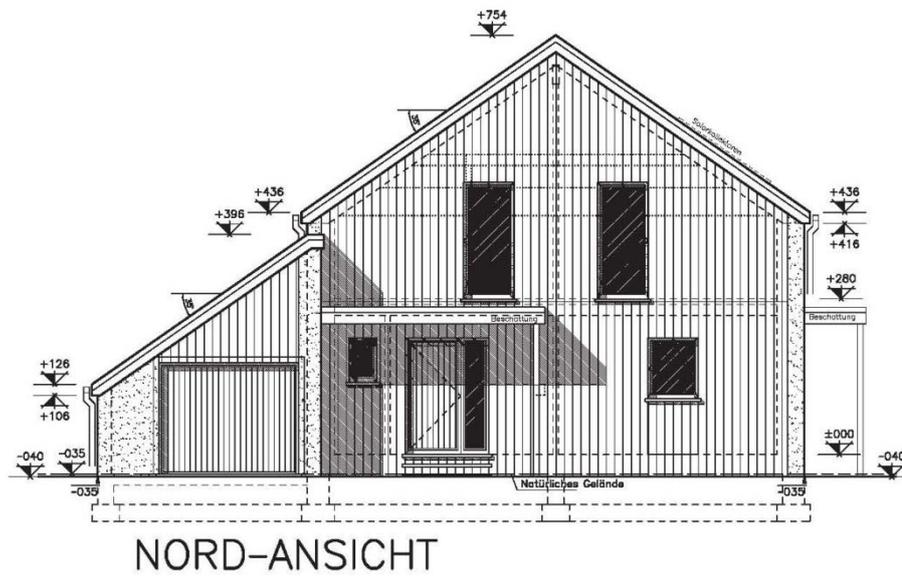


DACHGESCHOSS

Annexe 4 : Coupe de la Maison Kettenis



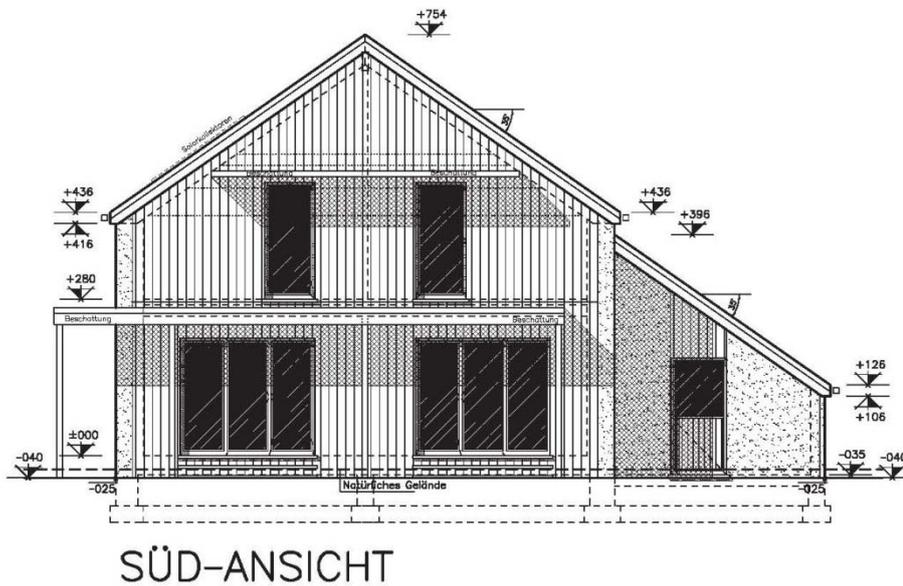
Annexe 5 : Façade Nord de la Maison Kettenis



Annexe 6 : Façade Ouest de la Maison Kettenis



Annexe 7 : Façade Sud de la Maison Kettenis



Annexe 8 : Planning de travail suivi

	2015		2016							
	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Jun		
Rendu intermédiaire		07/12								
Revue de littérature										
Recherche d'un modèle										
Colloquium 1					7/03					
Modélisation										
Colloquium 2							18/04			
Analyse des résultats										
Conclusion										
Recommandations										
Rédaction du rapport										
Rendu du dossier										8/06
Colloquium 3										14/06
Défense orale										27/06

Annexe 6 : Poster



Bâtiments d'aujourd'hui, Climat de demain

Évaluation de l'impact du réchauffement climatique sur le confort thermique et l'efficacité énergétique d'un bâtiment résidentiel passif existant en Belgique

Authors: Camille GOBIN

E-mail: Camille.gobin@student.ulg.ac.be

Address: Building Design Lab (SBD)
Quartier Polytech 1
Allée de la Découverte 9
4000 Liege, Belgium
www.sbd.ulg.ac.be
Tel: +32 43 66 91 55
Fax: +32 43 66 29 09

RESUME

Si le modèle des « maisons passives » apparaît comme une solution viable aujourd'hui, dans un contexte où le réchauffement climatique est un fait avéré, le sera-t-il toujours dans les années à venir ? C'est pour apporter un premier élément de réponse à cette question que cette étude a été réalisée. Il a d'abord fallu produire les fichiers climatiques correspondants aux quatre scénarios étudiés, un actuel et trois futurs (en 2100), à l'aide du logiciel Meteornorm. Un cas d'étude a été modélisé et calibré sur le logiciel de simulation DesignBuilder en lui appliquant les climats choisis. Sur les neuf scénarios de changement climatique et d'utilisation simulés, on observe une augmentation moyenne de la température intérieure entre 0,4°C et 1,2°C et une augmentation du nombre d'heures de surchauffe entre 451 h et 931 h. Heureusement, l'introduction de certaines solutions dites « actives » de conception architecturale et certaines solutions dites « actives » peut permettre de diminuer le risque de surchauffe. Ces résultats amènent cependant à remettre en question le standard de la « maison passive ».

MOTS-CLEF

Réchauffement climatique, changement climatique, maison passive, bâtiment passif, surchauffe, confort, consommation énergétique, Belgique, modélisation, DesignBuilder, Meteornorm

PROBLEMATIQUE

Face aux enjeux environnementaux actuels, une des solutions proposées dans le domaine du bâtiment est la « maison passive ». Elle se caractérise notamment par une très bonne isolation thermique et très forte étanchéité à l'air. Elle est aussi supposée respecter un critère qui impose de ne pas dépasser 5% de surchauffe, c'est-à-dire pas plus de 438 h/an à une température supérieure à 25°C. Si ce modèle de maisons apparaît comme une solution viable aujourd'hui, dans un contexte où le réchauffement climatique est un fait avéré, le sera-t-il toujours dans les années à venir ?

BUTS/OBJECTIFS

- Comprendre l'impact du réchauffement climatique sur une habitation passive en Belgique (au niveau thermique)
- Face aux résultats obtenus, proposer des recommandations à approfondir dans un travail ultérieur

AUDIENCE

- Ce projet est à destination d'ingénieurs en construction, d'ingénieurs architectes, d'architectes et de chercheurs dans ces domaines.
- Couvrant plusieurs domaines, notamment le climat et l'habitat, il aura nécessité l'implication de météorologues et d'ingénieurs architectes

QUESTION DE RECHERCHE

Quel est l'impact du réchauffement climatique sur le confort thermique et l'efficacité énergétique d'un bâtiment résidentiel passif existant en Belgique ?

INNOVATION

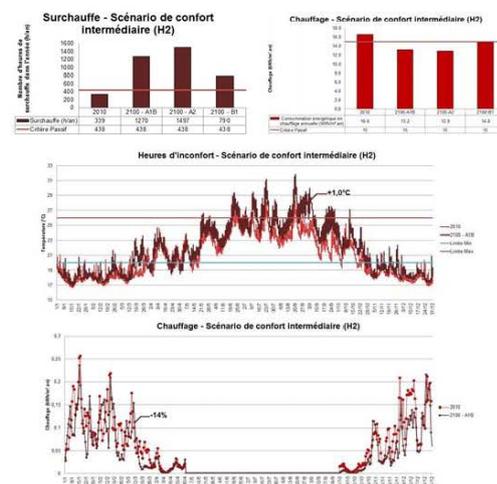
Ce type de recherche n'a pas été réalisée sur la Belgique, ni sur des bâtiments passifs existants aujourd'hui et qui subiront le réchauffement climatique dans les années à venir.

METHODOLOGIE



- 1) Présentation des principaux logiciels utilisés
- 2) Description du modèle de bâtiment
- 3) Modèles climatiques (initial et futurs)
- 4) Confort thermique intérieur
- 5) Détails de l'utilisation du logiciel Meteornorm
- 6) Détails de l'utilisation du logiciel DesignBuilder

RESULTATS



CONCLUSION

J'ai pu constater que dans tous les scénarios utilisés, la maison modélisée fait face à des problèmes de surchauffe dans l'année simulée (2100). S'il existe des solutions pour remédier à un problème de surchauffe, les résultats obtenus amènent à remettre en question le standard de la « maison passive ».

Il est important que d'autres travaux soient réalisés sur ce sujet afin de confirmer si ce problème est général, d'en déterminer l'ampleur et d'y apporter des solutions.

Ressources

- GIEC. (2014). Changement climatique 2014 : Rapport de synthèse. Résumé à l'intention des décideurs. Copernicus.
- Guarnati, A. (2005, Octobre). Les standards de maisons passives. Réceptif en France. Présenté à l'International Passive Buildings Conference.
- IPCC. (2007). Special Report on Emissions Scenarios.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014 – Synthesis Report. Genève.
- IPEA. (2015). Institut Interdisciplinaire de la Région. 2015. Village climatique. Belgique.
- Mueller, T. D. (2005). Etude de confort thermique et énergétique d'une maison passive par modélisation dynamique. Louvain-la-Neuve.
- Université catholique de Louvain. Institut de Recherche.
- Ministère de l'Énergie, du Développement durable et de l'Énergie. (2017). Découvrez le nouveau règlement RCP et SEP établis par GIEC. France.

Annexe 7 : Curriculum Vitae

Camille GOBIN

20, rue de l'abreuvoir

92380 GARCHES (FRANCE)

Camille.gobin@student.ulg.ac.be

Née le 14/08/1991



Etudes et Diplômes

2011/2016 : Préparation d'un double diplôme Ingénieur option génie civil à l'Ecole des Mines d'Alès et Master Ingénieur Architecte à l'Université de Liège (diplômes prévus fin juin 2016)

2012 : **TOEIC** obtenu avec **935** points

2009/2011: Classes préparatoires aux grandes écoles à Janson de Sailly, Paris XVIe options Physique et Chimie

2009 : **Baccalauréat S mention Bien**, option mathématiques (Lycée Alexandre Dumas, à Saint-Cloud, 92)

2008 : **Cambridge First Certificate**

Expériences Professionnelles

2015 – IN FINE Architectes pôle Ile-de-France (75) – Projet d'extension d'un hôpital

2013 – CMP (75) – Etudes de rénovation et d'aménagement de bâtiments industriels

2012 – GECO Ingénierie (30) – Projet de définition d'un procédé innovant de dépollution

2012 – CANDET CONSTRUCTION (75) – Chantier de réhabilitation d'un hôtel particulier parisien

Compétences

Conduite de projet, Soutenance de projet, Ecoute

Digital : Réseaux sociaux, capacité de recherche

Logiciels : Autocad, Archicad, Sketchup, DesignBuilder, Meteonorm, MS office

Langues : Anglais courant, espagnol (bonnes notions), japonais (notions de base)

Qualités : Créative, Rigoureuse, Persévérante

Autre : Permis de Conduire B

Activités

2013 – Présidente de la Comuz' (association étudiante de comédie musicale)

2012 – Membre actif (d'associations étudiantes) dans la réalisation et l'organisation d'évènements sportifs inter écoles et de spectacles musicaux

Loisirs : Chant, Tennis, Livres