
Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Étude de l'impact des isolants biosourcés sur le comportement thermique de l'enveloppe des maisons passives face au changement climatique et de leur apport environnemental

Auteur : Michau, Martin

Promoteur(s) : Andre, Philippe

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

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

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23266>

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.

**Étude de l'impact des isolants biosourcés sur le comportement thermique de
l'enveloppe des maisons passives face au changement climatique et de leur apport
environnemental**

Réalisé par MICHAU Martin

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade de :

Ingénieur Civil Architecte

Rédigé sous la direction de Pauline ABRAHAMS et Philippe ANDRÉ

Jury : Pauline ABRAHAMS, Philippe ANDRÉ et Gratien KIKI

Année académique 2024-2025

Remerciements

Aux termes de ce travail, j'aimerais exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de cette dernière année universitaire.

Tout d'abord je tenais à remercier ma co-promotrice Mme Pauline Abrahams et mon promoteur M. Philippe André d'avoir accepté de me suivre pour ce travail. Merci pour votre disponibilité et votre patience. Merci à M. Gratien Kiki d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Merci à l'ensemble des entreprises qui m'ont accordé du temps lors de ce travail. Merci d'avoir partagé votre savoir et d'avoir répondu à mes diverses questions. Vos réponses ont grandement contribué à la réalisation de mon travail. Je remercie le groupe Cluster Eco-construction de m'avoir communiqué des informations essentielles à la construction de mon mémoire. Merci de m'avoir orienté avec bienveillance. Je remercie également le centre d'expertise Objectif Zéro pour leur réponse à mes questions.

Merci à Mme Audrey Mertens pour sa bienveillance à mon égard lors de mon choix de TFE. Merci pour votre patience et vos conseils. Merci également à Mme Sophie Trachte de m'avoir aidé pendant la rédaction de mon état de l'art en m'orientant vers des sources d'informations importantes. Merci à Mme Elisabeth Davin de m'avoir donné de son temps pour me former sur Trnsys et répondre à mes questions sur la phase de simulation.

Dans un tout autre registre, je tiens à remercier l'ensemble de mes proches pour tout le soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de mes années d'études.

Merci à mes camarades de promotions qui pour certains sont devenus de véritables amis et soutiens. Un merci tout particulier à mes colocataires pour leur soutien quotidien. Vivien merci pour ta disponibilité, ton soutien et tes relectures.

Je remercie chaleureusement ma famille pour leur soutien permanent au cours de mes études. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir encourager dans mes choix. Merci pour vos relectures et vos encouragements.

Pour finir je tiens à remercier Sarah qui m'a soutenu et accompagné tout le long de mes études. Je te remercie pour ton soutien, et ta présence en toutes circonstances qui m'ont permis d'avancer pendant toutes ces années.

Table des abréviations

ACV : Analyse du Cycle de Vie

ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

BEMS : Building Energy Monitoring and Simulation

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CMIP : Coupled Model Intercomparison Project

COV : Composés organiques volatiles

CR : Chauffage Refroidissement

CSTC : Centre scientifique et technique de la construction

ECS : Eau chaude sanitaire

EPS : Polystyrène expansé

ERA5 : European center for medium-range weather forecasts ReAnalysis 5

ESM : Earth System Models

FC : Free Cooling

GCM : global climate models

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

HHSRS : Housing health and safety rating system

IPCC : The Intergovernmental Panel on Climate Change

MAR : Modèle atmosphérique régional

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

OSB : Oriented Strand Board

PAC : Pompe à chaleur

PEB : Performance Energétique du Bâtiment

PHPP : Passive House Planning Package

PIR : Polyisocyanurate

PMP : Plate-forme Maison Passive

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

PS : Protection solaire

PUR : Polyuréthane

RCP : representative concentration pathways

SCOP : Seasonal Coefficient of Performance

SSP : Shared Socioeconomic Pathways

TMY : Typical Meteorological Year

TOTEM : Tool To Optimize The Total Environmental Impact of Materials

TRNSYS : TRaNsiant SYstem Simulation tool

VMC : Ventilation mécanique contrôlée

WMO : World Meteorological Organization

XMY : Extreme Meteorological Year

Table des matières

Remerciements.....	2
Table des abréviations	3
Table des annexes	7
Tables des figures	7
Table des tableaux	11
Résumé	13
Abstract	14
1. Introduction.....	15
1.1. Contexte et justification du sujet	15
1.2. Objectifs de la recherche	16
2. État de l’art.....	19
2.1. Climat et projection	19
2.1.1. Le contexte climatique belge	23
2.1.2. Impact du Changement climatique sur les bâtiments et les occupants	25
2.2. Les maisons passives.....	28
2.2.1. Le principe	28
2.2.2. Les principales caractéristiques	30
2.2.3. Normes internationales et normes belges.....	31
2.2.4. Maison à énergie positive.....	33
2.3. Les matériaux biosourcés	33
2.3.1. Définition	33
2.3.2. Isolants biosourcés et isolants conventionnels.....	35
2.3.3. Analyse des ressources locales biosourcées en Wallonie	37
3. Méthodologie.....	40
3.1. Cas d’étude.....	41
3.1.1. Le bâtiment étudié	41
3.1.2. Bâtiment de référence pour la configuration sans systèmes actifs	46
3.1.3. Le profil de simulation	47
3.2. Choix des fichiers météorologiques	54
3.3. Les matériaux isolants biosourcés	56
3.3.1. Choix des matériaux isolants	56
3.3.2. Caractéristiques des matériaux retenus	57
3.4. Composition des parois	64

3.5.	Méthode d'analyse énergétique et environnemental	66
3.5.1.	Demande énergétique et confort.....	66
3.5.2.	Énergie nécessaire pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et le refroidissement	75
3.5.3.	Impact environnemental.....	77
3.6.	Résumé méthodologie	80
4.	Résultats et discussions	83
4.1.	Comparaison TRNSYS - TOTEM.....	83
4.2.	Performance énergétique et confort.....	84
4.2.1.	Surchauffe intérieure	84
4.2.2.	Sous-chauffe intérieure	87
4.2.3.	Contribution des mesures passives	88
4.2.4.	Besoin net en énergie pour le chauffage et le refroidissement	91
4.2.5.	Bilan des performances énergétiques et du confort.....	95
4.3.	Analyse de l'impact environnemental	97
4.3.1.	Énergie consommée par les compositions	97
4.3.2.	Impact environnemental des compositions	99
4.3.3.	Les émissions de gaz à effet de serre	103
4.3.4.	Bilan de l'impact environnemental	104
4.4.	Les limites de l'étude.....	104
4.5.	Perspectives.....	106
5.	Conclusion	107
6.	Bibliographie	109

Table des annexes

Annexe I : Formulaire de consentement	122
Annexe II : Normes ASHRAE – Gains par activité	123
Annexe III : EPBD – Données produits PEB – Protections solaires	124
Annexe IV : Parois non modifiées et conservées	125
Annexe V : Parois modifiées	127
Annexe VI : Rapport bois/isolant des parois.....	130
Annexe VII : Mur intérieur modifié	131
Annexe VIII : Fiche technique de la PAC choisie	132
Annexe IX : PAC air-air avec 5 unités intérieurs – Climatisation	133
Annexe X : Évolution de la surchauffe par compositionI.....	134
Annexe XI : Évolution de la demande énergétique annuelle de chauffage/refroidissement de chaque composition.....	139
Annexe XII : Consommation annuelle d’eau chaude sanitaire	146
Annexe XIII : Score environnemental global des compositions	147
Annexe XIV : Contribution des éléments à l’impact environnemental	148
Annexe XV : Score environnemental des murs avec enduit - Compositions massives.....	149
Annexe XVI : Impact par composant - Murs extérieurs avec crépi - Compositions massives	150
Annexe XVII : Score environnemental des planchers des combles - Compositions massives.....	152
Annexe XVIII : Impact par composant - Plancher des combles - Compositions massives	153
Annexe XIX : Impact par étape du cycle de vie.....	155
Annexe XX : Phase « production » de l’analyse de cycle de vie	158

Tables des figures

Figure 1: Bâtiment “Flow chelsea” à New York - Demande d’énergie de chauffage/refroidissement calculée à l’aide du PHPP, en tant que construction conventionnelle et passive - Grove-Smith (2020)	16
Figure 2 : Nombre de documents publiés sur le changement climatique - Scopus - Analyze search results Signed in	19
Figure 3 : Trajectoires de réchauffement planétaire selon les 5 scénarios retenus par le GIEC, p.75..	22
Figure 4 : Température moyenne annuelle à Bruxelles - Uccle de 1833 à 2024, De Troch et al. (2020, p.26).....	24
Figure 5 : Projection climatique sous le scénario SSP370 – « Le Climat en Wallonie dans 10 ans » (Fettweis, 2024, diapositive 2)	25
Figure 6 : Demande d’énergie en chauffage et refroidissement dans le cas de référence - Elnagar et al., 2023, p15	27

Figure 7 : Part des demande d'énergie de chauffage et de refroidissement par type de bâtiment - Elnagar et al., 2023, p15	27
Figure 8 : Comparaison des résidences certifiées passives entre Bruxelles Centre et la Wallonie - Maison Passive (2022a)	29
Figure 9 : 5 principes clés de la maison passive - Bastian et al. (2022)	30
Figure 10 : Les nouveaux critères apparus en 2020 – « The Passive House Classes : Classic, Plus And Premium » (2024).....	31
Figure 11 : Critère de surchauffe - Passive House Institute (2023).....	32
Figure 12 : Chaleur spécifique en J/kg.K de 24 matériaux isolants - Trachte & Stiernon (2023, p79)	36
Figure 13 : Conductivité thermique en W/m.K - Trachte & Stiernon (2023, p.74)	37
Figure 14 : Production Wallonne 2023 - Cluster Eco-construction (2024, p.12).....	38
Figure 15 : Potentiel de production Wallonne 2023 - Cluster Eco-construction (2024, p.13).....	39
Figure 16 : Modèle A - Plans rez-de-chaussée / étage - Abrahams. P (2025).....	43
Figure 17 : Modèle A - Coupe AA' - Abrahams. P (2025).....	44
Figure 18 : Façade Ouest - maison de Tontelange (Detienne, 2018)	46
Figure 19 : Façade Est - maison de Tontelange (Detienne, 2018)	46
Figure 20 Façade Sud - maison de Tontelange (Detienne, 2018)	46
Figure 21 : Façade Nord - maison de Tontelange (Detienne, 2018)	46
Figure 22 : Modèle A - Zoning pour simulations – Production personnelle.....	47
Figure 23 : Températures observées sur l'année 2024 - (Archive Météo Liège - Meteoblue, 2025)...	54
Figure 24 : Mur en bois rempli de miscanthus (NETO, 2022, p.1).....	59
Figure 25 : Laine d'herbe - Gramitherm (2025).....	60
Figure 26 : Laine de mouton- Woolconcept® (2025)	62
Figure 27 : Volume de bois sur pied en Wallonie (2011-2018) - Prélèvements de bois - État de l'environnement wallon (2023)	69
Figure 28 : Encodage du free cooling.....	74
Figure 29 : Illustration de la méthodologie de l'étude	82
Figure 30 : Pourcentages de surchauffe avec des compositions massives selon la période 2021-2040	85
Figure 31 : Pourcentages de surchauffe avec des compositions légères selon la période 2021-2040 ..	85
Figure 32 : Pourcentages de surchauffe avec des compositions massives selon la période 2081 - 2100	86
Figure 33 : Pourcentages de surchauffe avec des compositions légères selon la période 2081 - 2100	86
Figure 34 : Besoin net en énergie pour le chauffage pour les compositions massives (2021-2040)....	92
Figure 35 : Besoin net en énergie pour le chauffage pour les compositions légères (2021-2040).....	92
Figure 36 : Besoin net en énergie pour le refroidissement pour les compositions massives (2021-2040)	93

Figure 37 : Besoin net en énergie pour le refroidissement pour les compositions légères (2021-2040)	93
Figure 38 : Besoin net en énergie pour le chauffage pour les compositions massives (2081-2100)....	94
Figure 39 : Besoin net en énergie pour le chauffage pour les compositions légères (2081-2100).....	94
Figure 40 : Besoin net en énergie pour le refroidissement pour les compositions massives (2081-2100)	95
Figure 41 : Besoin net en énergie pour le refroidissement pour les compositions légères (2081-2100)	95
Figure 42 : Impact matériaux/énergie - Composition massive.....	99
Figure 43 : Impact matériaux/énergie - Composition légère.....	99
Figure 44 : Impact des parois modifiées - Compositions massives.....	101
Figure 45 : Impact des parois modifiées - Compositions légères.....	101
Figure 46 : Etape de production (A1-A3) du cycle de vie des différentes compositions	103
Figure 47 : Plancher sol - Composition massive et légère	125
Figure 48 : Plancher étage - Composition massive et légère	125
Figure 49 : Mur intérieur non porteur - Composition massive.....	125
Figure 50 : Toiture non isolée - Composition massive.....	126
Figure 51 : Toiture non isolée - Composition légère.....	126
Figure 52 : Mur extérieur initial (EPS graphité) - Composition massive	127
Figure 53 : Mur extérieur biosourcée - Composition massive	127
Figure 54 : Mur extérieur initial (Cellulose) et biosourcée - Composition légère.....	127
Figure 55 : Plancher combles initial (PIR) et biosourcée - Composition massive	128
Figure 56 : Plancher combles initial (Cellulose) et biosourcée - Composition légère.....	128
Figure 57 : Toiture isolée initial (PIR) et biosourcée - Composition massive	128
Figure 58 : Toiture isolée initiale (PIR) et biosourcée - Composition légère	129
Figure 59 : Composition légère - Mur extérieur – Rapport PEB	130
Figure 60 : Composition massive/légère - Plancher combles – Rapport PEB	130
Figure 61 :Composition massive/légère – Toiture non isolée – Rapport PEB.....	130
Figure 62 : Composition légère - Mur intérieur	131
Figure 63 : Fiche technique - Pompe à chaleur Atlantic Alféa Extensa DUO A.I. R32 - Pompe à chaleur air/eau Atlantic Alféa Extensa DUO A.I. 10 R32 download.php	132
Figure 64 : Fiche technique - Climatiseur Réversible Inverter Penta-Split CU-5Z90TBE PANASONIC - Climatiseur Réversible Inverter Penta-Split CU-5Z90TBE PANASONIC.....	133
Figure 65 : Composition massive – EPS et PIR (Initiale) - Surchauffe.....	134
Figure 66 : Composition légère – Cellulose (Initiale) - Surchauffe	134
Figure 67 : Composition massive - Herbe - Surchauffe	135
Figure 68 : Composition légère - Herbe - Surchauffe	135

Figure 69 : Composition massive - Lin - Surchauffe	136
Figure 70 : Composition légère - Lin - Surchauffe	136
Figure 71 : Composition massive - Miscanthus - Surchauffe	137
Figure 72 : Composition légère - Miscanthus - Surchauffe	137
Figure 73 : Composition massive – Laine de mouton - Surchauffe	138
Figure 74 : Composition légère – Laine de mouton - Surchauffe	138
Figure 75 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition massive – EPS et PIR (Initiale).....	139
Figure 76 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition légère – Cellulose (Initiale).....	139
Figure 77 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition massive - Herbe	140
Figure 78 / Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition légère - Herbe	140
Figure 79 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition massive - Lin	141
Figure 80 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition légère - Lin	141
Figure 81 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition massive - Miscanthus	142
Figure 82 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition légère - Miscanthus	142
Figure 83 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition massive – Laine de mouton.....	143
Figure 84 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition légère – Laine de mouton.....	143
Figure 85 : Score environnemental global des 10 composition	147
Figure 86 : Score environnemental des murs extérieurs avec crépi - Compositions massives	149
Figure 87 : Impact murs extérieurs avec crépi - Composition massive - EPS graphité.....	150
Figure 88 : Impact murs extérieurs avec crépi - Composition massive - Herbe	150
Figure 89 : Impact murs extérieurs avec crépi - Composition massive - Lin	150
Figure 90 : Impact murs extérieurs avec crépi - Composition massive - Miscanthus	151
Figure 91 : Impact murs extérieurs avec crépi - Composition massive - Laine de mouton.....	151
Figure 92 : Score environnemental des plancher des combles - Compositions massives.....	152
Figure 93 : Impact plancher des combles - Composition massive - PIR.....	153
Figure 94 : Impact plancher des combles - Composition massive - Herbe.....	153
Figure 95 : Impact plancher des combles - Composition massive - Lin.....	153

Figure 96 : Impact plancher des combles - Composition massive - Miscanthus	154
Figure 97 : Impact plancher des combles - Composition massive - Laine de mouton	154
Figure 98 : Impact global du bâtiment réparti selon les étapes du cycle de vie - Composition massive initiale / herbe / lin / miscanthus	155
Figure 99 : Impact global du bâtiment réparti selon les étapes du cycle de vie - Composition massive en mouton et Composition légères initiale / herbe.....	156
Figure 100 : Impact global du bâtiment réparti selon les étapes du cycle de vie - Composition légères en lin / miscanthus / mouton	157

Table des tableaux

Tableau 1 : Critères de maison passive - Passive House Institute, 2023	32
Tableau 2 : Composition des parois des modèles A et B.....	44
Tableau 3 : Modèle A - Valeur U - Abrahams et al. (2015)	45
Tableau 4 : Profil d'occupation chambre – Production personnelle	49
Tableau 5 : Profil d'occupation salle de bain – Production personnelle	49
Tableau 6 : Profil d'occupation salon - 3 personnes – Production personnelle.....	49
Tableau 7 : Profil d'occupation salon - 4 personnes – Production personnelle.....	49
Tableau 8 : Profil d'occupation de la cuisine - Production personnelle.....	49
Tableau 9 : Profil de la consigne de température de chauffage - – Production personnelle	50
Tableau 10 : Profil de l'utilisation des lumières dans les chambres - – Production personnelle	51
Tableau 11 : Profil de l'utilisation de l'électroménager dans la buanderie – Production personnelle..	52
Tableau 12 : Débits hygiéniques minimaux prévus par l'annexe V de l'arrêté du gouvernement wallon du 10 mai 2012 - Abrahams et al. (2015, p. 26).....	53
Tableau 13 : Profil d'utilisation des panneaux solaires – Production personnelle	54
Tableau 14 : Surfaces agricoles wallonnes - Suray (2025, p72)	57
Tableau 15: Propriétés des isolants retenus	64
Tableau 16 : Récapitulatif des 6 variations possibles.....	68
Tableau 17 : Propriétés des différents types de bois - DESCRIPTIF BOIS MASSIF V2 (s.d. , p.1) ..	70
Tableau 18 : Dimensions des bois - Hout Info Bois.....	71
Tableau 19 : Récapitulatif des pourcentages de présence de bois et d'isolant pour les couches composées de chaque paroi	71
Tableau 20 : Surface totale des parois	79
Tableau 21 : Valeurs des rapports initiaux et valeurs obtenus lors de l'étude.....	83
Tableau 22 : Valeurs de la transmission thermique des différentes parois sur TRNSYS et TOTEM ..	84
Tableau 23 : Augmentation de la surchauffe entre 2021-2040 et 2081-2100.....	87

Tableau 24 : Nombre d'heures (%) en sous-chauffe - Compositions sans mesure active.....	88
Tableau 25 : Contribution des mesures passives à la réduction de la surchauffe - Chauffage/refroidissement actif	90
Tableau 26 : Contribution des mesures passives à la réduction de la surchauffe - Chauffage/refroidissement non actif	90
Tableau 27 : Energie totale consommée par la PAC air/eau - Compositions massives.....	97
Tableau 28 : Energie totale consommée par la PAC air/eau - Compositions légères.....	98
Tableau 29: Energie totale consommée par la PAC air/air - Compositions massives.....	98
Tableau 30 : Energie totale consommée par la PAC air/air - Compositions légères.....	98
Tableau 31 : Impact de l'énergie par m ²	100
Tableau 32 : Impact de l'étape de production (A1-A3) de chaque composition.....	102
Tableau 33 : Émissions totales émises par chaque composition	103
Tableau 34 : Résultats des simulations de 2021-2040.....	144
Tableau 35: Résultats des simulations de 2081-2100.....	145
Tableau 36 : Consommation annuelle d'eau chaude sanitaire.....	146
Tableau 37 : Contribution des éléments à l'impact environnemental - Compositions massives	148
Tableau 38 : Contribution des éléments à l'impact environnemental - Compositions légères	148
Tableau 39 : Total par étape de cycle de vie "production" - Composition massive EPS et PIR (Initial) / herbe / lin / miscanthus.....	158
Tableau 40 : Total par étape de cycle de vie "production" - Composition massive mouton et composition légère initiale / herbe	159
Tableau 41 : Total par étape de cycle de vie "production" - Composition massive mouton et composition légère lin / miscanthus / mouton	160

Résumé

Face à l'urgence climatique, le secteur du bâtiment se doit d'évoluer vers des solutions plus responsables pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Ce travail cherche à évaluer la pertinence des isolants biosourcés comme l'herbe, le lin, le miscanthus ou la laine de mouton en les comparant avec des matériaux traditionnels (EPS et PIR) et l'isolant biosourcé le plus répandu (cellulose) sur les performances thermiques et environnementales des maisons passives. A travers un cas d'étude situé en Wallonie, différentes compositions de parois sont comparées selon deux périodes distinctes (2021-2040 et 2081-2100) sous le climat actuel et futur (sous le scénario SSP5-8.5) via les logiciels TRNSYS et TOTEM.

Les résultats montrent que certains isolants biosourcés offrent un meilleur confort thermique tout en réduisant le bilan environnemental du bâtiment, malgré des performances thermiques moins bonnes que celles des isolants traditionnels. En ce qui concerne la norme belge, certains bâtiments conservent leur label passif à condition que des mesures actives et passives soient mises en place. Concernant le label passif basé sur la norme internationale, dans certains cas, le bâtiment conserve son label sans solliciter l'intervention de systèmes actifs. De fait, les performances du bâtiment varient selon le type de structure (massive ou légère), le type d'isolant utilisé, mais aussi selon l'application de mesures passives (ombrage, ventilation naturelle nocturne) et de la période analysée. Néanmoins de manière générale et au vu des changements climatiques qui s'annoncent, les matériaux biosourcés ont du potentiel. Ce mémoire souligne l'importance du choix de l'isolant en utilisant une approche multicritère intégrant efficacité énergétique, impact environnemental, faisabilité économique et résilience climatique.

Mots clés :

Changement climatique – Maison passive – Isolants biosourcés - Impact environnementale – Impact énergétique

Abstract

Faced with the climate emergency, the construction sector must move towards more responsible solutions in order to achieve carbon neutrality by 2050. This study seeks to assess the suitability of bio-based insulation materials such as grass, flax, miscanthus and sheep's wool by comparing them with traditional materials (EPS and PIR) and the most widely used bio-based insulation material (cellulose) in terms of the thermal and environmental performance of passive houses. Using a case study located in Wallonia, different wall compositions are compared over two distinct periods (2021-2040 and 2081-2100) under current and future climate conditions (under the SSP5-8.5 scenario) using TRNSYS and TOTEM software.

The results show that certain bio-based insulation materials offer better thermal comfort while reducing the building's environmental footprint, despite their thermal performance being inferior to that of traditional insulation materials. With regard to the Belgian standards, certain buildings retain their passive label provided that active and passive measures are put in place. With regard to the passive label based on the international standard, in some cases, buildings retain their label without the need for active systems. In fact, the performance of the buildings vary greatly depending on the type of structure (solid or lightweight), the type of insulation used, but also depending on the application of passive measures (shading, natural night ventilation) and the period analysed. Nevertheless, in general, and in view of the climate changes that are coming, bio-based materials have potential. This thesis highlights the importance of choosing insulation using a multi-criteria approach that integrates energy efficiency, environmental impact, economic feasibility and climate resilience.

Key words :

Climate change – Passive house – Biobased insulation – Environmental impact – Energy impact

1. Introduction

1.1. Contexte et justification du sujet

Selon le 6^{ème} rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les températures de la surface du globe ont augmenté de 1.1°C, depuis 1900 à cause des activités humaines (IPCC, 2023). Les émissions de CO₂ qui sont la principale cause de ce réchauffement, ont atteint 3 276 Gt en 2023, ce qui correspond à une augmentation de 151 % par rapport au niveau préindustrielle (1750) (Organisation Météorologique Mondiale, 2025). Le GIEC prévoit pour l'horizon 2100, une augmentation de la température mondiale allant jusqu'à 4°C pour les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES) élevées (SSP3-7,0 et SSP5-8,5), par rapport à la période préindustrielle de 1850-1900. (IPCC., 2023b).

L'Homme doit rapidement user de moyens drastiques pour réduire les émissions de GES afin d'atteindre l'objectif de l'Accord de Paris, signé en 2022. Ce dernier a pour but de limiter l'augmentation de la température de la surface terrestre de 1.5°C par rapport à la période pré-industrielle (World Meteorological Organization, 2025) et de réduire de 50% les émissions de GES d'ici 2030 (Chauviré & Badoche, 2022, dans Suray, 2025).

Quatre secteurs sont responsables de 79% des émissions (IPCC., 2023b) dont le principal est celui du bâtiment avec une contribution s'élevant à 40% au niveau mondial (European Commission, 2022, dans Fernandes et al., 2024). De manière paradoxale, ce secteur voit la consommation énergétique annuelle de son parc immobilier impactée par ce réchauffement. A l'avenir, les bâtiments verront leur demande de chauffage diminuer contrairement à celle du refroidissement qui augmentera (Grove-Smith, 2020).

Dans cette idée, l'apparition de constructions dites "passives" permet d'envisager une diminution des besoins en énergie grâce à leur niveau d'isolation favorable aux conditions hivernales et estivales (Grove-Smith, 2020) (Figure 1).

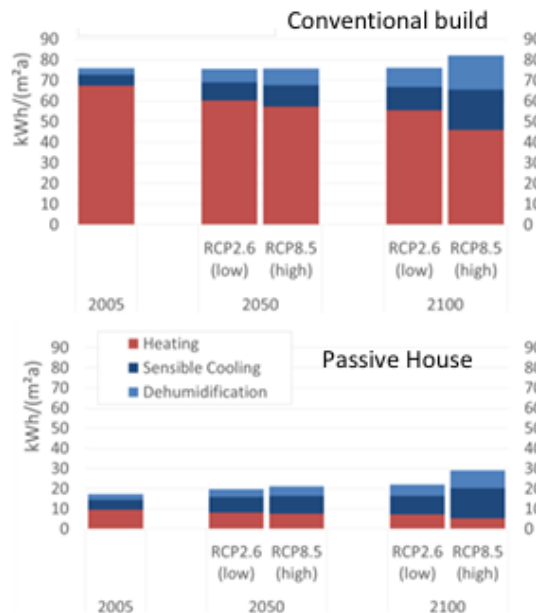


Figure 1: Bâtiment “Flow chelsea” à New York - Demande d’énergie de chauffage/refroidissement calculée à l’aide du PHPP, en tant que construction conventionnelle et passive - Grove-Smith (2020)

De nouvelles mesures sont prises pour que ces maisons passives s’autogèrent en énergie en utilisant les ressources renouvelables à proximité (*La Maison Positive*, s. d.) telles que le soleil, la terre, le vent, l’eau, etc. En parallèle, l’avènement de matériaux dits « biosourcés » offre une alternative aux matériaux conventionnels et pourrait permettre de réduire la demande d’énergie fossile, les émissions de GES, de faire des économies d’énergies tout en améliorant l’efficacité énergétique des bâtiments (Bourbia et al., 2023). D’après Chen et al. (2024, dans Pons Ribera, 2025), les émissions de CO₂ seraient réduites de 320 000 tonnes à l’horizon 2050 si des matériaux biosourcés étaient intégrés dans la rénovation des constructions. Dans le but d’atteindre la neutralité carbone d’ici 2050 (Pons Ribera, 2025) des actions comme la réduction de déchets, le recyclage et la réutilisation sont également à favoriser pour réduire les émissions de GES (IPCC, 2022, dans Fernandes et al., 2024 ; Pons Ribera, 2025).

1.2. Objectifs de la recherche

L’utilisation de bâtiments passifs et de ces matériaux dits « biosourcés » serait une solution pour atteindre les objectifs de l’Accord de Paris et ceux définis par le GIEC. Il est donc intéressant de voir comment pourrait évoluer ce type de construction dans les années à venir face au changement climatique et quels avantages ces matériaux apporteraient par rapport aux conventionnels sur l’aspect énergétique et environnemental. Seuls les isolants seront analysés dans cette étude, ce qui permet de se poser la question suivante :

En quoi les isolants locaux biosourcés peuvent-ils jouer un rôle important dans la performance énergétique, l'impact environnemental et la résilience climatique dans les maisons unifamiliales ?

Pour répondre à cette problématique, il est nécessaire d'étudier les sous-questions suivantes :

- Le bâtiment respectera-t-il les critères actuels du passif sous le climat actuel et à l'horizon 2100 ?
- Qu'apportent les isolants biosourcés aux performances énergétiques du bâtiment sous les conditions actuelles et les projections climatiques futures ?
- Les isolants choisis permettent-ils de réduire l'impact environnemental du bâtiment ?
- L'utilisation d'isolants biosourcés, sans systèmes actifs, permettra-t-il au bâtiment de conserver son label et de respecter le pourcentage de surchauffe énoncé dans les normes passives ?
- Quelle serait la composition qui permet la plus petite consommation d'énergie dans le présent et en 2100 ? Quelle serait la composition la plus pauvre en émission de GES ?

L'objectif principal de ce TFE est donc d'évaluer dans quelles mesures les isolants biosourcés peuvent jouer un rôle dans les habitats du futur. Il s'agit, de manière plus précise, de :

- Mesurer l'impact environnemental du bâtiment en utilisant des matériaux biosourcés par rapport aux matériaux traditionnels
- Évaluer la performance énergétique du bâtiment selon l'utilisation d'isolants biosourcés ou traditionnels
- Évaluer la résilience du bâtiment face aux climats futurs sur la base des critères passifs actuels
- Déterminer les isolants les plus adaptés aux contraintes climatiques futures

Cette recherche est constituée de différentes étapes. Pour commencer, un état de l'art portant sur le changement climatique en Belgique, la définition d'une maison passive et enfin sur les matériaux biosourcés sera établi. Il permettra de répertorier les données existantes pour constituer la base de cette étude.

L'étape suivante correspondra à l'étude des variations des performances énergétiques, de l'impact environnemental et de la résilience climatique d'un bâtiment résidentiel en fonction des isolants utilisés. Pour cela un bâtiment sera défini comme cas d'étude, les fichiers

météorologiques adaptés seront choisis et enfin les isolants biosourcés utilisés seront déterminés. Depuis la modélisation 3D de l'étude de cas, différentes compositions de parois seront testées via TRNSYS et TOTEM. TRNSYS est un logiciel de simulation permettant d'analyser les performances thermiques et énergétiques d'un système. TOTEM, quant à lui, est un logiciel permettant de comparer plusieurs bâtiments sur leur impact environnemental et leur analyse de cycle de vie. Ces logiciels seront mieux expliqués dans la méthodologie. L'analyse des résultats provenant de ces deux logiciels constituera un moyen de répondre à la problématique de l'étude.

2. État de l'art

2.1. Climat et projection

Les recherches sur le changement climatique sont antérieures à la révolution industrielle (IPCC, *s. d.*). La période de référence dite « préindustrielle » de 1850-1900 est la première à détenir des observations quasi-mondiales fiables. Des relevés plus anciens existent mais les scientifiques ont choisi de faire un compromis pour assurer la fiabilité des données et la représentativité des conditions climatiques préindustrielles (IPCC, *s. d.*).

L'augmentation des recherches s'est effectuée au début du 21^{ème} siècle notamment en l'an 2003. En effet, l'été extrême de 2003 aurait provoqué plus de 30 000 morts et une perte économique de plus de 13 milliards d'euros à travers l'Europe, ce qui pourrait expliquer la hausse de l'intérêt et de la préoccupation (Rahif, 2023). D'autres sources comme Robine et al., (2007) estiment 70 000 morts. Ces conséquences sont restées gravées dans l'histoire et sont la source de l'augmentation du nombre de recherches (Figure 2).

Documents by year

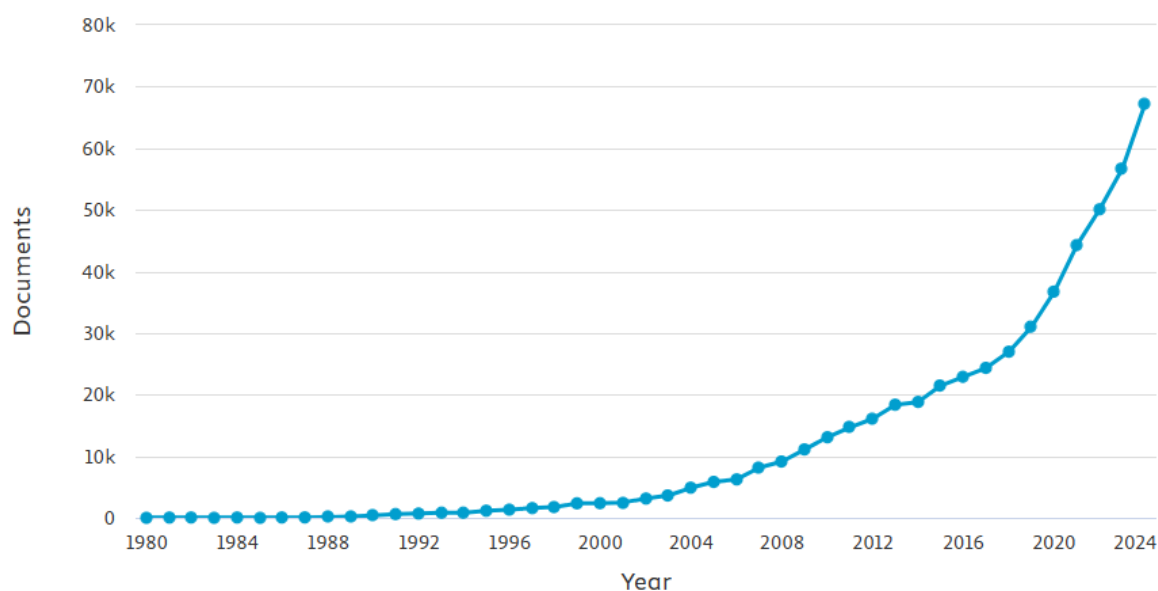


Figure 2 : Nombre de documents publiés sur le changement climatique - Scopus - Analyze search results / Signed in

Depuis cet épisode, l'organisation météorologique mondiale (OMM) a constaté que les années les plus chaudes enregistrées sont celles de cette dernière décennie (2015-2024)(Service Changements climatiques, *s. d.*-a ; Organisation Météorologique Mondiale, 2025). Chaque augmentation du réchauffement climatique amplifie la fréquence et l'intensité d'événements

extrêmes, tels que les précipitations et les sécheresses, ce qui accentuera davantage les différences régionales et l'impact sur la faune et la flore dont l'Homme fait partie (IPCC., 2023b ; Felsche et al., 2024). Cette gravité croissante a entraîné une hausse des observations qui sont nécessaires à l'orientation des politiques d'atténuation et d'adaptation (IPCC., 2023b). Pour prévenir ce phénomène, l'OMM et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) ont créé en 1988 le "Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat", appelé plus communément « le GIEC » (Service Changements climatiques, s. d.-c). En anglais, ce groupe se nomme « The Intergovernmental Panel on Climate Change », il est également connu sous le sigle IPCC. Ce groupe établit « des rapports d'évaluation complets (AR) qui synthétisent les connaissances actuelles sur la climatologie, les répercussions socio-économiques et les stratégies d'adaptation au changement climatique [à l'échelle mondiale] » (Service Changements climatiques, s. d.-c, traduction libre). Depuis leur création, 6 rapports ont abouti dont le dernier est publié en 2023 (IPCC., 2023b ; Service Changements climatiques, s. d.-c). Celui-ci prévoit de nombreux risques plus élevés que ceux établis dans le 5ème rapport (IPCC, 2023b).

Le GIEC synthétise les estimations des scientifiques sur le climat futur, basées sur différents scénarios de GES, c'est ce qu'on appelle des projections climatiques. Ces projections servent à évaluer les risques climatiques futurs, selon le scénario choisi, à informer les politiques climatiques, allant du local à l'international, et à planifier l'adaptation dans les secteurs les plus sensibles comme la santé, l'agriculture ou encore les infrastructures (IPCC., 2023b).

Pour réaliser ces projections au niveau mondial, les scientifiques s'appuient sur plusieurs modèles climatiques globaux (GCM). Lorsqu'ils réalisent des estimations climatiques sur des zones spécifiques, ils utilisent des modèles climatiques régionaux qui affinent les projections à cette échelle (Saeed et al., 2016). Les modèles régionaux peuvent recevoir des données climatiques externes provenant de base de réanalyse comme ERA5¹, qui représentent le climat observé passé, ou des 30 modèles du système terrestres (ESMs) issus de la base de données du

¹ "European center for medium-range weather forecasts ReAnalysis 5", en anglais

CMIP6² servant à simuler le climat futur selon divers scénarios socio-économiques (Di Virgilio et al., 2024 ; Dutreloup et al., 2022). Le couplage à l'une des deux bases permet d'avoir une haute résolution à l'échelle régionale. Pour les modèles du CMIP6, seulement 3 des 30 modèles sont utilisés (Eyring et al., 2016, dans Dutreloup et al., 2022).

Elnagar et al. (2023) nous donne la définition de 3 ces modèles :

- « BCC-CSM2-MR³ simule un réchauffement proche de la moyenne d'ensemble de l'année 2100 ».
- « MPI ESM1.2⁴ simule un réchauffement inférieur à celui de l'ensemble moyen d'ici l'an 2100 ».
- « MIROC6⁵ simule un réchauffement plus important que la moyenne de l'ensemble pour le même scénario et le même horizon temporel ».

Il a été découvert que les dimensions socio-économiques sont toutes aussi importantes pour les impacts climatiques, les possibilités d'adaptation que pour les options d'atténuation (IPCC, 2015 ; Morita et al., 2000, dans Riahi et al., 2016)

Les scénarios socio-économiques, appelés « Shared Socioeconomic Pathways (SSP) » (Riahi et al., 2016, p.154) sont de nouvelles bases pour les projections du changement climatique évaluées dans le 5ème rapport du GIEC (GIEC, 2013 ; Taylor et coll., 2012, dans Riahi et al., 2016) Ils sont créés sur base des trajectoires de concentration représentatives appelés « representative concentration pathways (RCP) » (van Vuuren et al., 2011, dans Riahi et al., 2016)

Ces scénarios sont définis par le forçage radiatif qui permet de quantifier l'effet de l'activité humaine sur le climat. C'est une valeur moyenne annuelle mondiale exprimée en W/m², qui définit le changement effectué depuis l'année 1750 (Allwood et al., 2014.). Pour les nommer, l'abréviation SSPx-y permet de savoir quel scénario socio-économique est utilisé (x) et quelle est la valeur du forçage radiatif voulu (y) à la fin du siècle (Lepousez & Aboukrat, 2022). Par

² “the Sixth Coupled Model Intercomparison Project”, en anglais

³ Beijing Climate Center - Climate System Model – V2 - Medium Resolution

⁴ Max-Planck-Institut Earth System Model – V1.2

⁵ Model for Interdisciplinary Research on Climate

exemple, le scénario SSP5-8.5 signifie que le scénario socio-économique 5 est utilisé avec un forçage radiatif de 8.5 W/m².

Ce sont des « scénarios de l'évolution socio-économique mondiale projetés à l'horizon 2100 » (Doutreloup et al., 2022). Ceux-ci sont liés à des niveaux spécifiques d'émissions de GES, présentant plusieurs futurs possibles selon les décisions politiques (IPCC., 2023b ; Doutreloup et al., 2022)

Doutreloup et al. (2022) retient 3 scénarios principaux dont chacun entraîne une augmentation du réchauffement climatique pour 2100 :

- SSP2-4.5 représente le scénario intermédiaire, il prévoit que les émissions de CO₂ restent les mêmes jusqu'en milieu de siècle (IPCC., 2023b)
- SSP3-7.0 représente le scénario où les émissions de gaz à effet de serre ont un niveau élevé (Doutreloup et al., 2022).
- SSP5-8.5 représente une augmentation constante des émissions de gaz à effet de serre, entraînant des niveaux très élevés de réchauffement (Elnagar et al., 2023). Ces émissions devraient doubler d'ici 2050 par rapport aux niveaux actuels (IPCC., 2023b)

Le GIEC, quant à lui, utilise 5 scénarios d'émissions futures allant d'un scénario à très faible risque (SSP1-1.9) à un niveau de risque élevé (SSP5-8.5). Ceux-ci permettent d'estimer l'évolution de la température de la surface du globe entre la période actuelle et la fin de siècle (2100) (Figure 3).

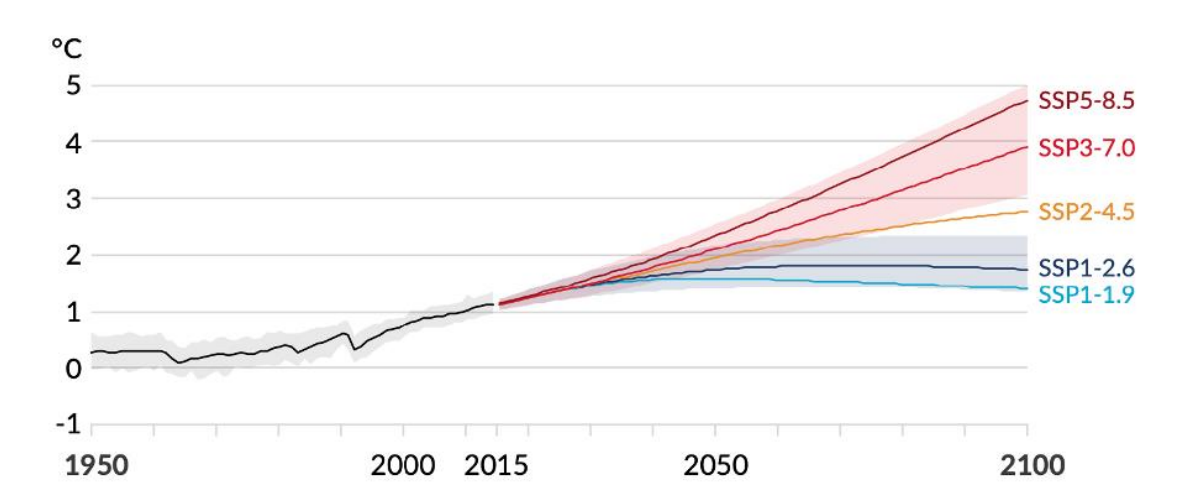


Figure 3 : Trajectoires de réchauffement planétaire selon les 5 scénarios retenus par le GIEC, p.75

Parmi les différentes études réalisées par les scientifiques, le scénario SSP5-8.5 est le plus pessimiste. Cependant ce scénario est le plus proche des valeurs d'émissions de GES actuelles (Service Changements climatiques, s. d.-a). C'est pour cette raison qu'il sera donc utilisé pour notre étude de cas.

Le chercheur Xavier Fettweis a développé un modèle régional appelé « modèle atmosphérique régional (MAR) ». Celui-ci a été conçu dans l'objectif de déterminer avec précision la formation et la fonte des manteaux neigeux en Belgique et au Groenland (Université de Liège, 2017).

Le Modèle MAR représente l'évolution des conditions hydroclimatiques et du rayonnement global actuel et du climat futur (Attia et al., 2020). Il permet l'anticipation des variations climatiques et de l'avènement de conditions extrêmes telles que les vagues de chaleur (Doutreloup et al., 2022).

Elnagar et al. (2023, p.9) nous indique que le modèle MAR sert :

« à réduire l'échelle d'un modèle global ou à réanalyser avec une résolution de ~ 100 km/6_h et ~ 30 km/3h, respectivement, pour obtenir des sorties météorologiques à une résolution spatiale et temporelle plus fine, généralement 5 km/1_h. » (Traduction libre).

La littérature montre que certains scientifiques réalisant des mesures en Belgique utilisent ce modèle tels que Doutreloup et Fettweis (2021) pour l'analyse de la performance énergétique des bâtiments en été, Attia et Gobin (2020) pour une analyse du résidentiel ou encore Elnagar et al. (2023) pour évaluer l'impact du changement climatique sur le parc immobilier belge. C'est donc sur ce modèle que le climat belge est analysé et que notre étude de cas utilisera pour les projections climatiques.

Nous allons nous intéresser plus spécifiquement aux projections climatiques belges établies lors des dernières années.

2.1.1. Le contexte climatique belge

En Europe, l'augmentation de la température a été la plus rapide que dans toute autre région du monde. D'après l'OMM, celle-ci a doublé au cours des 30 dernières années par rapport au taux moyen mondial (Francis et al., 2023).

Selon l'institut royal météorologique, la température en Belgique a augmenté de 1.9 °C depuis 1890 (De Troch et al., 2020, p.26)(Figure 4). Le réchauffement global comprend le réchauffement de la surface terrestre et des océans, constituant 70% de la surface du globe. Il est possible de noter que le réchauffement terrestre est plus important que le réchauffement océanique. Ainsi le positionnement de la Belgique, étant majoritairement dans les terres, explique pourquoi l'augmentation de température observée dans le pays est supérieure au réchauffement global observé de 1.1°C (Service Changements climatiques, s. d.-a).

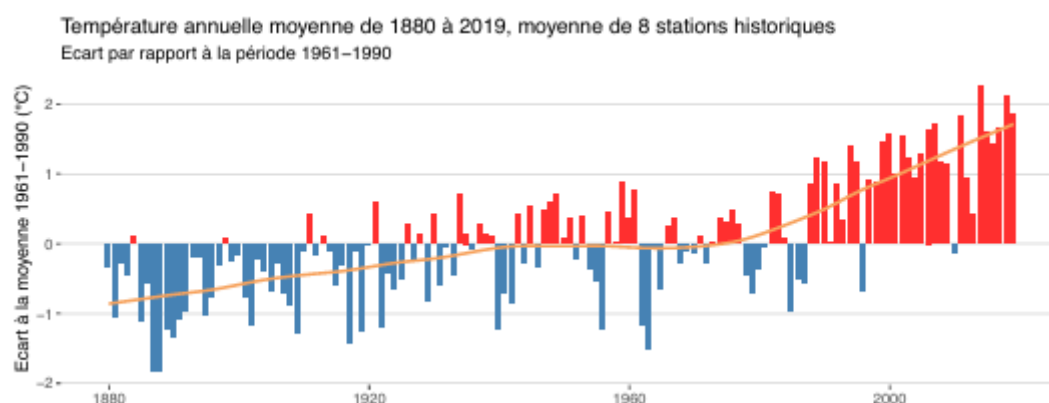


Figure 4 : Température moyenne annuelle à Bruxelles - Uccle de 1833 à 2024, De Troch et al. (2020, p.26)

Xavier Fettweis, professeur en climatologie à l'Uliège, a effectué un webinaire en 2024 intitulé « Le Climat en Wallonie dans 10 ans ». Il utilise le scénario d'émissions SSP3-7.0, à émission élevées (IPCC., 2023b), pour effectuer ses projections climatiques et utilise l'un des 3 modèles du système terrestre appelé « MIROC6 ». Celui-ci majore les températures estivales et le rayonnement solaire contrairement aux deux autres qui illustrent seulement l'évolution moyenne du climat via les différents scénarios socio-économiques (Elnagar et al., 2023) . En faisant la moyenne d'ensemble de 6 simulations MAR en utilisant le scénario SSP3-7.0, il en ressort que la Belgique verra sa température annuelle augmenté de plus ou moins 2 °C sur la période 2031-2060 en ayant comme référence la période 1981-2010 (Fettweis, 2024) (Figure 5).



Figure 5 : Projection climatique sous le scénario SSP370 – « Le Climat en Wallonie dans 10 ans » (Fettweis, 2024, diapositive 2)

Le nombre de jours supérieurs à 30°C augmenterait de 300% pour cette période. Pour ceux inférieurs à 0°C, on aurait 40% en moins que sur la période 1981-2010 (Fettweis, 2024).

D'après Joskin (2025), si le réchauffement des pôles se fait plus rapidement que l'équateur, cela augmenterait la fréquence et l'intensité d'événements extrêmes tels que de grosses précipitations, de grosses chaleurs et de sécheresse en Belgique. Ce qui accentuera davantage les différences régionales et l'impact sur la faune et la flore dont l'Homme fait partie (IPCC., 2023b, Felsche et al., 2024).

2.1.2. Impact du Changement climatique sur les bâtiments et les occupants

Le secteur du bâtiment doit faire face à des défis majeurs imposés par des conditions climatiques et des températures progressives. Celles-ci ont des conséquences sur l'environnement interne des bâtiments comme leurs performances thermiques (Ma et al., 2023), les problèmes de surchauffe, de qualité d'air intérieur et la concentration de polluants dans l'air (Rahif, 2023). Ces phénomènes ne sont pas sans conséquence pour le confort et la santé des occupants. Selon Attia et Gobin (2020), la hausse des températures affecterait le confort thermique des occupants et pourrait être dangereuse pour la santé de l'Homme. Certaines études indiquent que les populations vulnérables (les enfants, les personnes malades, ceux ayant un logement de basse qualité, les vieilles personnes, etc.), n'ayant pas accès à la climatisation, sont sujettes au stress thermique lors d'épisodes de surchauffe (O'Donovan et al., 2022 ; Ozariso et al., 2020, dans Rahif, 2023), pouvant déboucher sur une hospitalisation ou des décès (Rahif, 2023). En effet, il a été constaté lors des années 2003, 2015 et 2018, que l'augmentation de fréquence d'étés chauds et secs entraîne une hausse de la mortalité (Rousi

et al., 2023, dans Felsche et al. 2024). Selon Housing health and safety rating system (HHSRS) (2006, dans Rahif et al., 2021), ces effets parviennent lorsque la température intérieure excède les 25°C.

Les bâtiments modernes ayant une bonne isolation sont également victimes de ces lourdes chaleurs. Attia et Gobin (2020) ont analysé comment le changement climatique pourrait affecter le confort thermique d'un bâtiment à très faible consommation d'énergie en s'appuyant sur 3 scénarios RCP. Le résultat est que le seuil admissible d'heures de surchauffe est dépassé et que ces bâtiments seront vulnérables en 2050 (Attia & Gobin, 2020). Cela a des conséquences sur leur environnement intérieur qui ont un potentiel d'humidité plus élevé, ce qui favorise le développement des acariens et le risque aux allergies (Ascione et al., 2015, dans Rahif, 2023). Les périodes sèches estivales provoquent également une hausse des aéroallergènes saisonniers et de poussière atmosphérique pouvant altérer la qualité de l'air neuf rentrant dans les bâtiments. Comme le souligne Rahif (2023, p.21), l'infiltration de ces allergènes dans le bâtiment « dépendra des taux de ventilation et des facteurs de pénétration » (Traduction libre). Les moisissures et les bactéries se propageraient plus facilement sur les façades à cause de l'augmentation des dégâts des eaux et des inondations, pouvant provoquer des maladies respiratoires (Zhou et al., 2020, dans Rahif, 2023).

Ces conséquences n'affectent pas seulement les occupants mais aussi la consommation énergétique des bâtiments pour maintenir un confort intérieur. Elnagar et al. (2023) ont fait une étude sur les potentielles demandes de chauffage et de refroidissement du parc immobilier résidentiel belge sur 3 périodes distinctes. Les scénarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5 sont utilisés pour estimer les parts de demande d'énergie (seul le SSP5-8.5 sera analysé dans cet état de l'art). Ils ont pris comme référence le parc résidentiel de 2012. Aucune rénovation, démolition et intégration de systèmes de refroidissement actifs n'ont été prises en compte. Seul le changement climatique est intégré pour observer les besoins énergétiques. Sans la modification du parc immobilier, la part des besoins en refroidissements s'élèverait à 12% d'ici 2050 et à 16% d'ici 2090 (Figure 6).

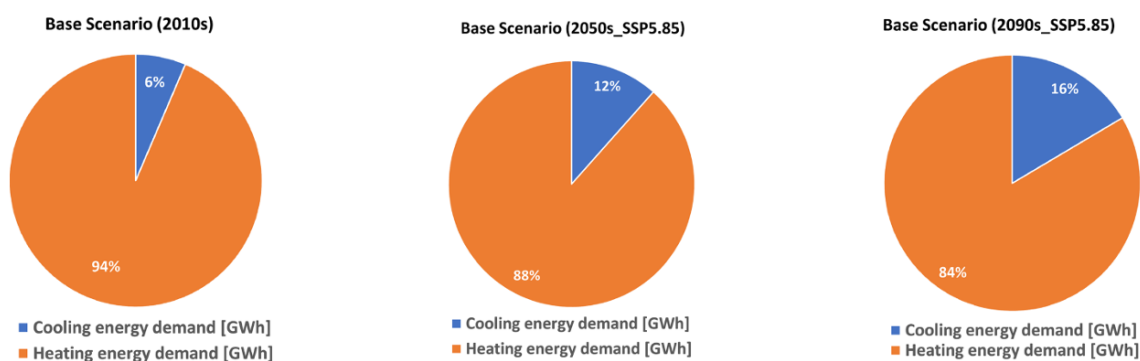


Figure 6 : Demande d'énergie en chauffage et refroidissement dans le cas de référence - Elnagar et al., 2023, p15

Afin de rendre les résultats plus précis, Elnagar et al. (2023) ont répété les mêmes étapes mais en divisant le parc immobilier en différentes typologies de bâti que sont les maisons indépendantes (4 façades), les maisons 3 façades, les maisons mitoyennes et les appartements. Il est prévu d'ici 2050 une diminution globale de 13% à 14% de la demande d'énergie de chauffage ainsi qu'une diminution de 22% à 23% pour la fin de siècle par rapport au cas des années 2010 (Elnagar et al., 2023). Néanmoins, la demande d'énergie de refroidissement varie selon les typologies. Les maisons 4 façades ont leur demande d'énergie de refroidissement qui variera le moins par rapport aux autres types de maisons (appartements exclus) avec une augmentation de 70% d'ici 2050 et de 140% d'ici 2090. Les appartements sont ceux qui ont le rapport le moins élevé avec une augmentation de 45% pour 2050 et de 72% pour la fin de siècle par rapport à 2010 (Elnagar et al., 2023)(Figure 7).

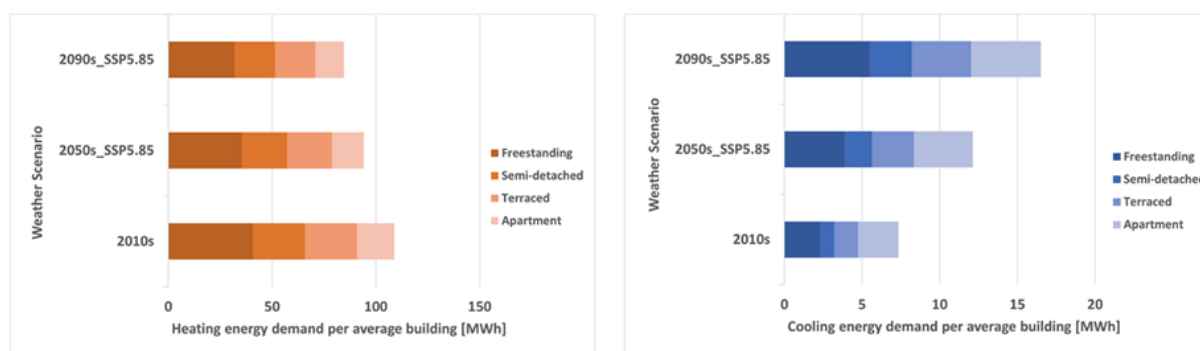


Figure 7 : Part des demande d'énergie de chauffage et de refroidissement par type de bâtiment - Elnagar et al., 2023, p15

Ma et al. (2023) réalise une étude sur les effets du changement climatique sur un quartier de maisons unifamiliales de 2010 et d'un quartier résidentiel de 265 bâtiments construits en 1980, situés en Belgique. Sa conclusion est que la majorité des bâtiments analysés risquent le phénomène de surchauffe sous le scénario RCP 8.5. Même les bâtiments belges ayant une

performance énergétique élevée se retrouvent vulnérables face au climat de demain (Attia & Gobin, 2020 ; Rahif, 2021 ; Darteville et al., 2022, dans Ma et al., 2023).

D'après les analyses de Gilani et O'Brien (2020, dans Rahif et al., 2021) sur les bâtiments résidentiels au Canada et aux Etats- Unis, la ventilation naturelle pourrait atténuer la demande de refroidissement de 23% à 94%. Rahif et al. (2021) recommandent de la coupler avec d'autres techniques passives telles que les protections solaires, l'orientation du bâtiment, l'isolation thermique adaptée, l'inertie thermique et d'utiliser un refroidissement mécanique qu'en dernier recours. A l'instar de Rahif et al. (2021), Amaripadath et al. (2024) recommandent l'utilisation de stratégies passives comme les toitures végétalisées ou les matériaux réfléchissants pour réduire ces heures d'inconfort. Selon Pérez-Andreu et al. (2018, dans Elnagar et al., 2023) l'efficacité des mesures passives peut s'amenuiser avec le changement climatique, cependant elle peut contribuer jusqu'à 50% de la demande d'énergie de refroidissement d'un bâtiment résidentiel situé sous le climat méditerranéen. Il est également possible d'utiliser des systèmes à haut rendement énergétique comme les pompes à chaleur (Elnagar et al., 2023 ; Tettey et al., 2018) et des équipements ménagers de qualité permettant de réduire la demande d'énergie primaire (Tettey et al., 2018).

La section suivante va s'intéresser aux caractéristiques spécifiques des bâtiments dits « passifs » possédant une faible consommation énergétique.

2.2. Les maisons passives

2.2.1. Le principe

Dans les années 80, les prévisions annonçaient que les énergies fossiles viendraient à manquer. Leur production et leur utilisation avaient déjà un impact conséquent sur l'environnement (Maison Passive, 2022b). C'est pourquoi, le concept de maison passive est apparu en 1988, suite à de nombreux éléments développés dans le but de réduire la consommation énergétique des bâtiments (Feist, s. d.).

Selon Passivhaus Institut, la première « maison » passive fonctionnelle et complète serait le navire polaire de Fritjof Nansen, nommé le « Fram » (« *The Passive House – Historical Review* », 2022). Celui-ci comportait une bonne protection au froid grâce à ses diverses couches de murs et de ses triples vitrages. La ventilation évacuait l'air froid et le poêle était inutile selon Nansen (Nansen 1893 dans « *The Passive House – Historical Review* », 2022). En revanche,

le premier bâtiment passif est construit en Allemagne par Wolfgang Feist en 1991 (Maison Passive, 2024).

Les maisons passives sont définies comme des bâtiments qui peuvent se maintenir « passivement » au chaud en utilisant des sources de gains internes, tels que l'électroménager et les activités humaines (Maison Passive, 2022b), des sources de gains externes, comme l'énergie solaire, en chauffant l'apport d'air frais (Feist, s. d.), le tout, sans utiliser de systèmes actifs. Cependant l'apport excessif de chaleur entraîne des surchauffes et des effets néfastes sur la santé des habitants (Attia & Gobin, 2020). Les refroidissements passifs tels que la ventilation naturelle et l'utilisation de casquettes solaires sont couramment utilisés pour pallier cette surchauffe. (Attia & Gobin, 2020 ; Ma et al., 2023).

Depuis la création du site Plate-forme Maison Passive (PMP) jusqu'à 2021, plus de 350 000 m² de construction ont fait l'objet d'une certification dont 48% représente le résidentiel. Le reste concerne les bâtiments tertiaires (Maison Passive, 2022a). Le graphique provenant du site de la Maison Passive (2022a) montre que la région bruxelloise centre comporte plus de certifications résidentielles que la Wallonie durant cette période (Figure 8).

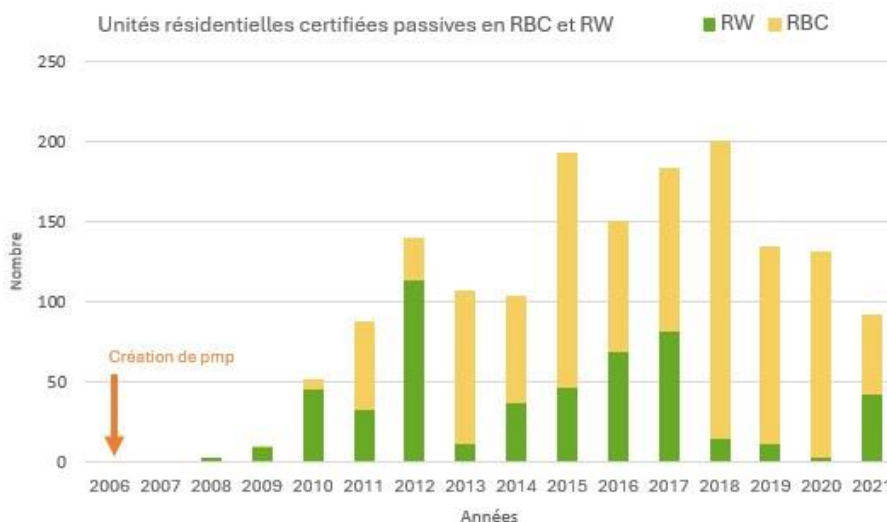


Figure 8 : Comparaison des résidences certifiées passives entre Bruxelles Centre et la Wallonie - Maison Passive (2022a)

2.2.2. Les principales caractéristiques

Selon le guide de certification des bâtiments de Bastian et al. (2022), 5 principes clés doivent être respectés pour obtenir une maison passive (Figure 9):

- Utiliser du triple vitrage en climat tempéré et froid pour assurer des gains de chaleur en hiver.
- Disposer d'une bonne isolation pour conserver la chaleur en intérieur en hiver et en extérieure pendant l'été
- Avoir une enveloppe extérieure étanche à l'air continue pour éviter les pertes d'énergies
- Détenir une alimentation en air frais constante par un système de ventilation complété par un échangeur de chaleur « qui garantit que l'air est fourni aux pièces à une température ambiante sans qu'il soit nécessaire de la chauffer davantage ».
- Éviter les ponts thermiques pour réduire la consommation de chauffage, surtout en climat tempéré et froid.

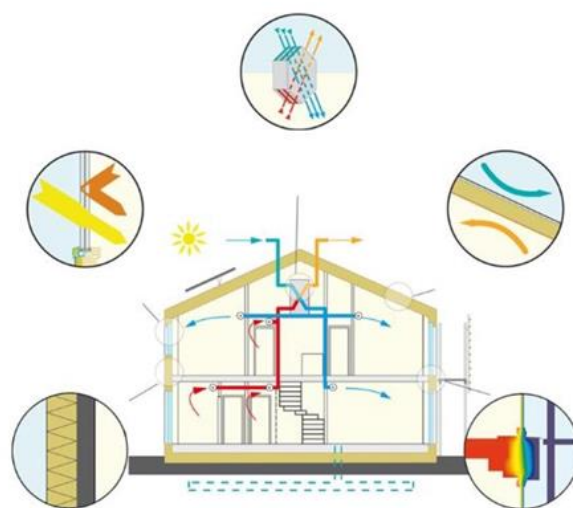


Figure 9 : 5 principes clés de la maison passive - Bastian et al. (2022)

Depuis 2020, la certification « bâtiment passif » en Belgique a pris un tournant. L'approche de la transition énergétique a fait évoluer la certification pour intégrer l'utilisation des énergies renouvelables et valoriser les constructions productrices d'énergie (Maison Passive, 2024).

Deux nouveaux critères tels que la consommation maximale en énergie primaire renouvelable et la production minimale en énergie primaire renouvelable viennent s'ajouter aux 3 précédents (Maison Passive, 2024) qui sont :

- le critère de besoin net en énergie pour le chauffage devant être inférieur ou égal à 15 kWh/m².an
- le critère d'étanchéité à l'air, devant être inférieur ou égal à 0.6 vol/h
- le critère de surchauffe, exprimé en degré-heure (°C.h), doit être inférieur ou égal à 5% sur une année. Le bâtiment est considéré en surchauffe au-delà de 25°C. C'est la température de l'air qui est appliquée pour ce calcul, et ce, uniquement pour les bâtiments résidentiels. Autrement, c'est la température opérative qui est utilisée pour les bâtiments tertiaires (Objectif Zero, communication personnelle, 22 mai 2025).

Cette introduction des critères d'énergie primaire renouvelable a conduit Passivhaus institut à classer un bâtiment passif sous 3 catégories : Classic, Plus et Premium. Celui-ci est classé en fonction de son efficacité énergétique et de la quantité d'énergie renouvelable qu'il produit. Les bâtiments zéro énergie ou à énergie positive ont pour objectif de produire au moins la quantité d'énergie qu'ils consomment sur une année (« *The Passive House Classes : Classic, Plus And Premium* », 2024) (Figure 10).

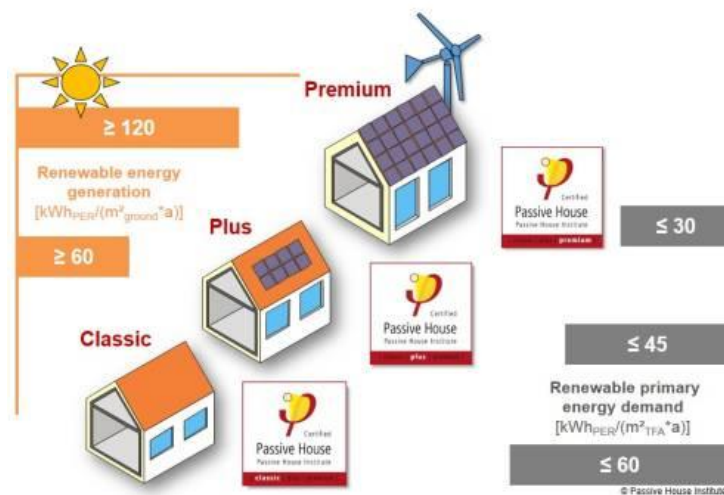


Figure 10 : Les nouveaux critères apparus en 2020 – « *The Passive House Classes : Classic, Plus And Premium* » (2024)

2.2.3. Normes internationales et normes belges

Certains critères, établis par les normes internationales, diffèrent des normes locales belges. En effet, celles-ci prennent en compte la demande d'énergie de refroidissement et de déshumidification dont la somme des deux doit être inférieure à 15 kWh/m².an (Tableau 1). Néanmoins, des variations sont applicables en fonction de la localisation, du taux de renouvellement requis ainsi que de la chaleur et de l'humidité produites dans le bâtiment

(Passive House Institute, 2023). Ce calcul est évalué par le Passive House Planning Package (PHPP) qui établit un bilan de la demande énergétique annuelle d'un bâtiment en fonction des ses caractéristiques (« PHPP – Passive House Planning Package », 2025).

Tableau 1 : Critères de maison passive - Passive House Institute, 2023

				Criteria ¹	Alternative Criteria ²		
Heating							
Heating demand	[kWh/(m²a)]	≤		15	-		
Heating load ³	[W/m²]	≤		-	10		
Cooling							
Cooling + dehumidification demand	[kWh/(m²a)]	≤		15 + variable allowance ⁴			
Airtightness							
Pressurization test result n ₅₀	[1/h]	≤		0.6			
Renewable Primary Energy (PER)⁵				Classic	Plus	Premium	
PER demand ⁶	[kWh/(m²a)]	≤		60	45	30	±15 kWh/(m²a) deviation from criteria... ...with compensation of the above deviation by different amount of generation ⁸
Renewable energy generation ⁷ (with reference to projected building footprint)	[kWh/(m²a)]	≥		-	60	120	

La norme appliquée par la Belgique sur le critère de surchauffe à 5% est plus stricte que la norme internationale qui exige une surchauffe devant être égale ou inférieure à 10% (Figure 11). Lors de l'introduction du passif en 2008 en Belgique, certains critères étaient difficiles à gérer et de nouveaux aspects apparaissaient comme l'étanchéité à l'air. Il était alors compliqué de respecter leur totalité. C'est pour cela que la Maison Passive n'a pas imposé le critère de besoin en énergie de refroidissement, mais à renforcer son critère de surchauffe, le passant de 10% à 5% (Objectif zéro, Communication personnelle, 22 mai 2025). Ils expliquent que de cette manière, « les efforts relatifs à la gestion passive de l'inconfort estival étaient intégrés à la réflexion globale du projet » et que cela s'applique uniquement pour le résidentiel (Objectif zéro, Communication personnelle, 22 mai 2025).

Percentage of hours in a calendar year with indoor temperatures above 25 °C	
•	Buildings without active cooling systems: ≤ 10 %
•	with active cooling: cooling system must be adequately dimensioned

Figure 11 : Critère de surchauffe - Passive House Institute (2023)

L'étude de cas étant localisée en Belgique, les critères de La Maison Passive seront appliqués. Afin de pouvoir comparer cette étude à ces critères, un cas de référence permettra de mieux comprendre les dispositions qui seront appliquées.

2.2.4. *Maison à énergie positive*

Afin d'aller au-delà de la simple définition d'un bâtiment passif, il existe des bâtiments appelés « à énergie positive » qui permettent de réduire davantage leurs émissions de GES et leur impact environnemental en utilisant les ressources naturelles. D'après La Maison Positive (s.d.), une maison à énergie positive est, par définition, une maison qui « produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme pour son entretien et sa vie quotidienne ». Selon la définition de l'Union Européenne, c'est un bâtiment dont les performances énergétiques sont très élevées ce qui permet une demande énergétique quasi nulle. Celle-ci doit couvrir ses dépenses par des ressources renouvelables à proximité (Commission européenne, 2013).

Dans le cadre d'un projet interrégional nommé « VallÉnergie », la région bruxelloise a émis une définition d'une maison à énergie positive propre à ce projet. Celle-ci provient d'un cahier spécial des charges du marché public rédigé pour la réalisation des maisons de ce projet., dont l'une est le cas d'étude de ce mémoire. Ce cahier des charges requiert au minimum une maison passive pouvant passer à une maison à énergie positive. Il fait la distinction entre un bâtiment « zéro énergie » et un bâtiment à énergie positive et les définit comme suit. Un bâtiment « zéro énergie » couvre seulement l'énergie nécessaire au chauffage, l'eau chaude sanitaire (ECS), le refroidissement, l'éclairage et l'électricité des auxiliaires tels que la ventilation ou la pompe de circulation. Seulement s'il est décidé de subvenir à tous les besoins y compris les consommations domestiques (rechargement de la voiture, l'électroménager ou encore la bureautique), alors le bâtiment serait considéré comme maison à énergie positive (Rogiest, s.d.).

2.3. Les matériaux biosourcés

L'objectif de cette section est de définir la notion de matériaux biosourcés et d'analyser les ressources locales biosourcées.

2.3.1. *Définition*

Les matériaux biosourcés proviennent, par définition, de ressources naturelles renouvelables. Au-delà de ce critère, les matériaux biosourcés se doivent de minimiser leur impact environnemental (Pons Ribera, 2025).

Bien qu'ils puissent être perçus comme des matériaux ayant une connotation de sous-développement avec un prix initial élevé, les matériaux biosourcés sont, actuellement, des atouts majeurs dans la construction durable et respectueuse de l'environnement (Fernandes et al., 2024). En effet, comme le soulignent Dams et al. (2023), ce type de matériaux prend en compte les enjeux sociétaux et environnementaux tout en répondant à la demande en matériaux.

Il ne faut pas les confondre avec les matières organiques de synthèse qui sont chimiquement transformées par l'Homme et produites à partir de ressources fossiles (ex : pétrole) considérées comme non renouvelables (Trachte, 2024). De même, il ne faut pas les associer aux matières inorganiques (métaux, sable, etc.) qui ne proviennent pas d'être vivants et qui ont un cycle de production très long (Trachte, 2024). Ces matières inorganiques ont des dérivés appelés « matières géosourcés » qui recensent la terre crue, la pierre ou encore les coquillages (Trachte, 2024). Les matériaux biosourcés ne sont pas utilisés tels quels. En effet, la majorité subit des traitements contre les insectes, les moisissures, le feu, etc (Chevillard, 2022).

Contrairement aux matériaux conventionnels, ces matériaux sont renouvelables, généralement biodégradables (Trachte & Stiernon, 2023, p.30), comportent une faible quantité d'énergie grise et permettent de modérer la consommation énergétique des bâtiments (Bourbia et al., 2023). Pouvant être issus de la biomasse, ces matériaux organiques d'origine végétale ou animale proviennent d'industries forestières, agricoles (chanvre, lin, paille, etc.) ou du recyclage (Trachte & Stiernon, 2023, p.30). Ils favorisent également le développement d'une économie locale et de circuits courts (Trachte, 2024). Selon les plantes, les fibres utilisées dérivent de certaines parties (tiges, feuilles, fruits et graines)(Trachte, 2024).

Concernant l'aspect environnemental, ils limitent les émissions de GES tout en jouant le rôle de « puits de carbone ». En retenant ce carbone sur une durée de 100 ans, ils contribueraient à la « neutralité climatique » (Dams et al., 2023 ; Mouton et al., 2023, dans Pons Ribera, 2025). De plus, par leur faible émission de composés organiques volatiles (COV), et leur non toxicité, les matériaux biosourcés contribuent à un environnement intérieur sain pour les occupants (Sutkowska et coll., 2024, dans Pons Ribera, 2025). Ils jouent un rôle de régulateurs thermiques en permettant le maintien de températures intérieures confortables. Leur efficacité varie selon leurs capacités isolantes et divers facteurs tels que l'humidité et la température de l'air (Bourbia et al., 2023, dans Pons Ribera, 2025). Une fois arrivés à la fin de leur cycle de vie, ces matériaux peuvent être réemployés dans le secteur de la construction, en rénovation,

pour maintenir leur stockage de carbone. Ils peuvent être éliminés pour servir de nutriments à d'autres plantes, ou encore être valorisés sur le plan énergétique (Fernandes et al., 2024). Toutes ces caractéristiques illustrent la polyvalence et la durabilité des matériaux biosourcés (Dams et al., 2023 ; Latapie et al., 2023 ; Pons Ribera, 2023 ; Pons Ribera et al., 2022 ; Thomsen et Tamke, 2022, dans Pons Ribera 2025).

Malgré la présence de ces caractéristiques notables, ils peinent encore à convaincre dans les différents secteurs, dont celui de la construction. En effet, un doute persiste quant à leurs performances et leur durabilité (Dace et al., 2024, dans Pons Ribera, 2025). L'approvisionnement en quantité de ces matériaux reste incertain de par leur dépendance aux facteurs climatiques, géographiques et pratiques agricoles. Il est donc capital de défaire ce scepticisme, pour encourager leur adoption, en démontrant leur fiabilité (Dace et al., 2024, dans Pons Ribera, 2025).

Afin de garantir l'origine biosourcée, la qualité des matériaux et conforter le marché (Tachte & Stiernon, 2023, p.158), il existe en Wallonie un label attestant d'une certaine teneur en matière biosourcée (Dams et al., 2023 ; Valbiom, 2021b). Le pourcentage minimum en produits biosourcés pour obtenir le label varie selon les produits. Dans le cas des isolants, la plupart des produits doivent contenir au minimum 70% de matières biosourcées (*Label Produit Biosourcé*, s. d.). De plus, 90% des matières premières biosourcées doivent provenir et être transformées en France ou en Wallonie (Tachte & Stiernon, 2023, p.159).

2.3.2. Isolants biosourcés et isolants conventionnels

Bien que l'isolation soit une solution passive pour la réduction de la demande d'énergie de chauffage et de refroidissement, celle-ci est aussi une source de préoccupation. En effet, la majorité des isolants conventionnels ont un processus de fabrication complexe, causant de lourds dégâts à l'environnement, ce qui leur confère un potentiel de réchauffement climatique conséquent (Cosentino et al., 2023, dans Fernandes et al., 2024). L'arrivée des isolants biosourcés offre un potentiel de réduction d'émissions de GES au secteur du bâtiment grâce à leur capacité d'absorption de dioxyde de carbone (Cosentino et al., 2023, dans Fernandes et al., 2024). Trachte et Stiernon (2023, p.30) soulignent « qu'un matériau biosourcé n'est pas automatiquement synonyme de meilleures performances environnementales par rapport à un matériau non biosourcé ». En effet, cela dépend de leur fabrication qui peut nécessiter la présence de liants et d'additifs et du fait que l'évaluation environnementale prend en compte

les différentes étapes du cycle de vie, allant de l'extraction à la fin de vie (Trachte & Stiernon, 2023, p.30). Cependant, Bradu et al. précise que leurs processus sont tout de même moins énergivores que ceux des isolants conventionnels permettant ainsi la réduction du bilan carbone des projets qui les utilisent (2022 dans Pons Ribera, 2025). Cependant, ils ont le potentiel d'émettre peu de GES contrairement aux matériaux conventionnels, permettant ainsi de contribuer à la réduction des impacts environnementaux liés aux bâtiments (ZabalzaBribián et al., 2011 ; Fernandes et al., 2019 ; Melià et al., 2014, dans Fernandes et al., 2024).

En ce qui concerne leurs propriétés thermiques, Trachte et Stiernon (2023) indiquent que la capacité de stockage de chaleur des isolants biosourcés dépasse en majorité celle des isolants conventionnels tels que les isolants minéraux synthétiques (laine de roche, laine de verre, etc.), les isolants organiques synthétiques (polystyrène expansé (EPS), polyisocyanurate (PIR) ou encore le polyuréthane (PUR)). En effet, un isolant biosourcé a sa chaleur spécifique égale ou supérieure à 1500 J/kg.K, contrairement à un isolant conventionnel qui en possède une inférieure ou égale à 1500 J/kg.K (Trachte & Stiernon, 2023, p.79). Par exemple, le lin qui fait partie des isolants biosourcés ayant l'une des plus petites chaleur spécifique à 1600 J/kg.K, est plus performant que la laine minérale (1030 J/kg.K) ou que l'EPS (1450 J/kg.K) (Isolteam, s. d.). Plus cette caractéristique est élevée, plus il protégera de la chaleur estivale (Isolteam, s. d.) (Figure 12).

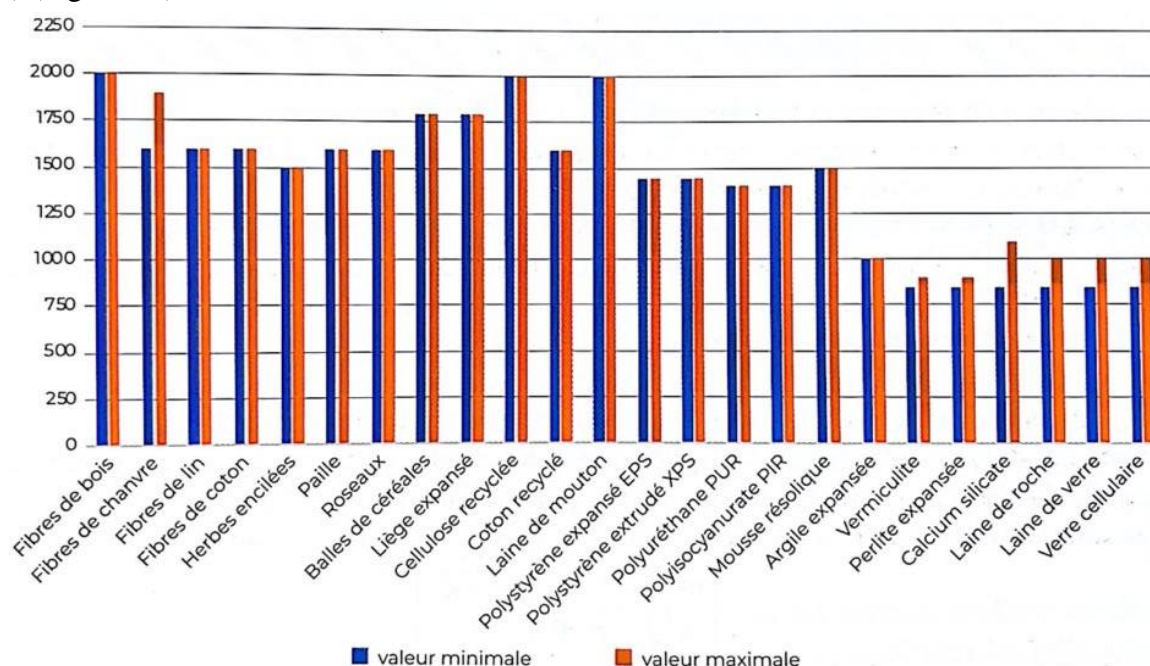


Figure 12 : Chaleur spécifique en J/kg.K de 24 matériaux isolants - Trachte & Stiernon (2023, p79)

Cependant les isolants organiques synthétiques détiennent la plus faible conductivité thermique pouvant varier de 0.018 W/m.K à 0.041 W/m.K (Figure 13), les rendant plus performants sur la capacité d'isolation que les isolants biosourcées.

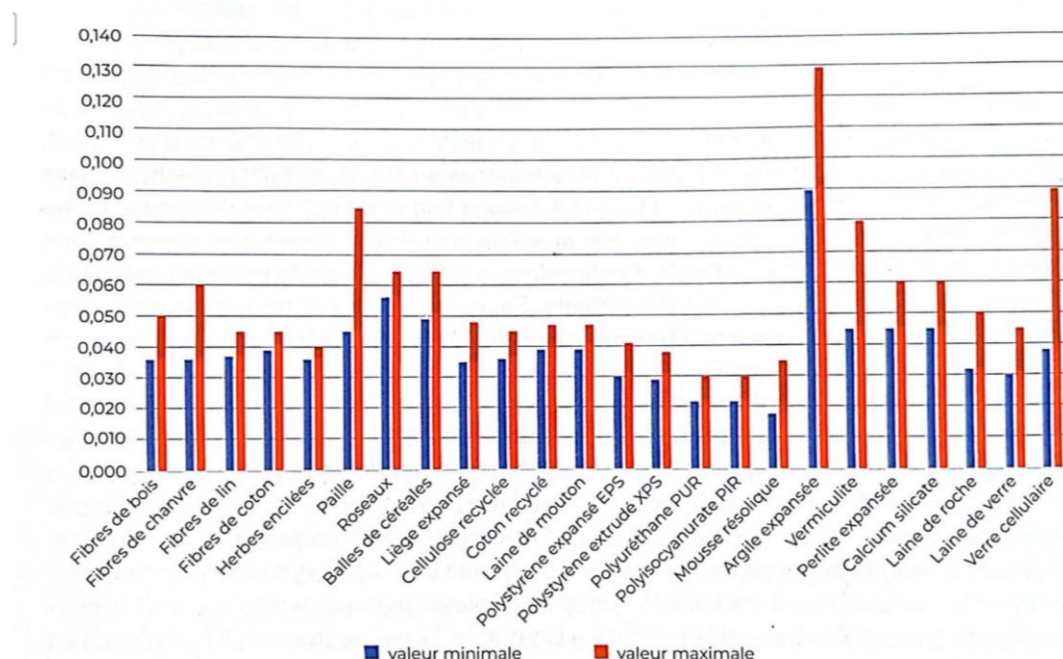


Figure 2.5 Conductivité thermique en W/m.K (minimale et maximale) de 24 isolants. Graphique © S. Trachte.

Figure 13 : Conductivité thermique en W/m.K - Trachte & Stiernon (2023, p.74)

Selon Rahim et al. (2016), energivie.info (2014, dans Bourbia et al., 2023) et Trachte & Stiernon (2023) certains matériaux biosourcés (la paille, le lin, le coton, la cellulose, etc.) détiennent un comportement hygroscopique intéressant, associant une forte régulation de l'humidité et perméabilité à la vapeur d'eau que d'autres isolants comme l'EPS, le PUR, la laine de verre et la laine de roche n'ont pas.

L'utilisation de circuits courts et de ces matériaux biosourcés permettrait de contribuer à la réduction des émissions de GES et de favoriser une économie locale. Le choix des isolants se fera selon les ressources disponibles en région wallonne.

2.3.3. Analyse des ressources locales biosourcées en Wallonie

La Wallonie recense plusieurs producteurs et vendeurs de matériaux biosourcés destinés à l'isolation des habitats. Certaines filières sont développées et couramment utilisées telles que la cellulose et le chanvre tandis que d'autres sont à renforcer (Cluster Eco-construction, 2024). Les matériaux tels que la laine de mouton, le miscanthus, la paille, le liège, le colza et le lin

représentent une faible part du potentiel global d'isolation en Wallonie (Cluster Eco-construction, 2024).

En 2023, le Cluster Eco-construction, qui est le réseau des entreprises et experts en éco-construction en Wallonie, a émis des hypothèses sur le pourcentage de production de chaque matériau biosourcé, en se basant sur les plus gros producteurs. La Figure 14 reprend celle de Cluster Eco-construction (2024, p.12) mais en version anonyme. Leur évaluation se concentre sur le potentiel de production des isolants biosourcés pour rénover le bâti résidentiel wallon. D'après eux, la capacité de production d'isolants biosourcés en Wallonie environnait les 634 000 m³/an en 2023, soit 39% de la demande d'isolation. Ils estiment un potentiel de 1 328 000 m³/an pouvant répondre à 81 % des besoins si ceux-ci sont répartis uniformément sur les 25 prochaines années.

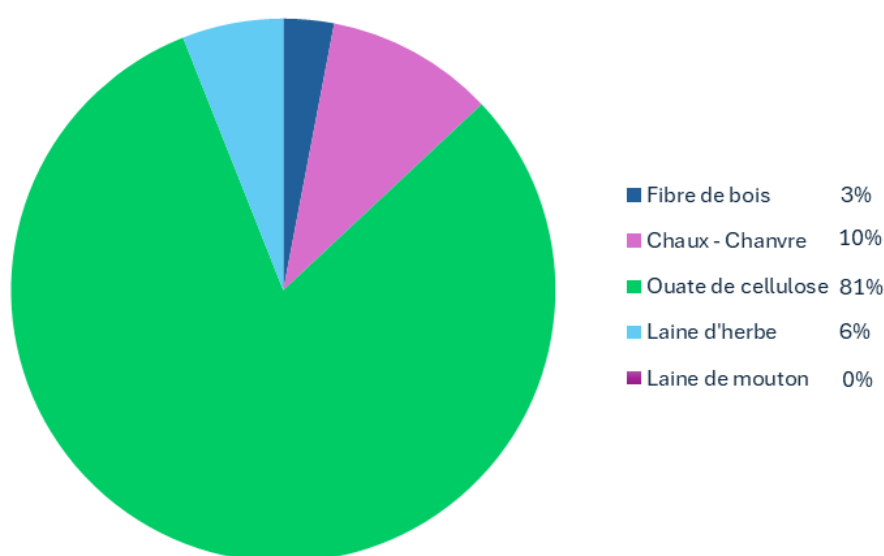


Figure 14 : Production Wallonne 2023 - Cluster Eco-construction (2024, p.12)

Selon Cluster Eco-construction (2024) la ouate de cellulose correspond à l'isolant biosourcé le plus produit en Wallonie. A elle seule, elle représentait 80% du volume de production en 2023, ce qui équivalait à 67 % du potentiel wallon d'isolation. Lors de cette période, la totalité des isolants produits en Wallonie pouvait répondre à 96% de la demande d'isolation de toitures uniquement avec des isolants en vrac et semi-rigides (Cluster Eco-construction, 2024). Ils estiment l'augmentation de production de certaines ressources tels que la fibre de bois passant de 3% à 6% et de la laine d'herbe passant de 6% à 15% lors des prochaines années (Figure 15). Cependant ces chiffres restent indicatifs car une uniformité de

la forme des logements a été considéré alors que la configuration des bâtiments est très hétéroclite en Wallonie.

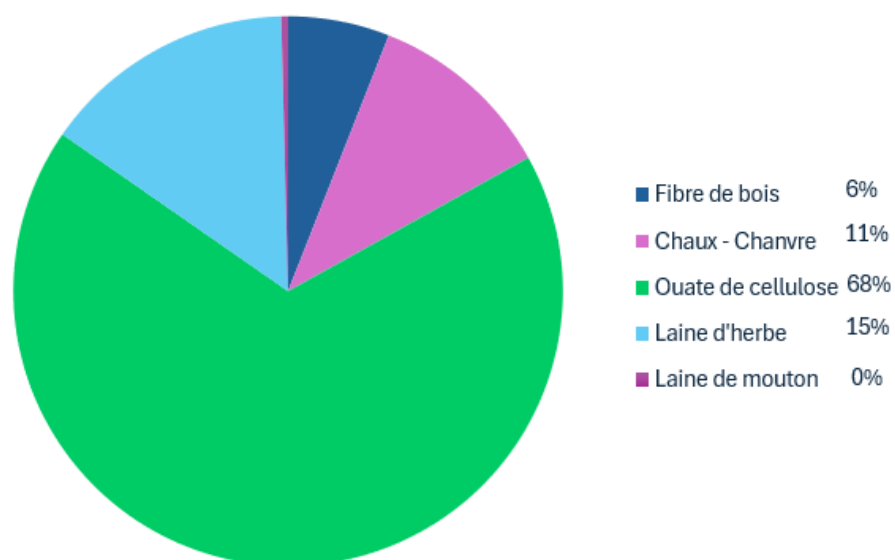


Figure 15 : Potentiel de production Wallonne 2023 - Cluster Eco-construction (2024, p.13)

Tous les matériaux ne peuvent être analysés dans le cadre de cette étude. Il est donc nécessaire d'effectuer des choix. Ceux-ci se font en section 3.3.1.

3. Méthodologie

L'usage de matériaux biosourcés est encore faible en raison de la méfiance qu'il existe à leur égard et de leur performance environnementale variable. Néanmoins, ils restent une option importante grâce à leur potentiel de réduction d'émissions de GES au secteur du bâtiment au moyen de leur capacité d'absorption de dioxyde de carbone. Aux vues des questions autour des ressources disponibles et du changement climatique qui s'annoncent, il est important de questionner leur adaptation aux climats futurs en se basant sur les critères des maisons passives pour soutenir leur usage. L'objectif consistera donc à évaluer les performances thermiques et environnementales du cas d'étude sous différents matériaux biosourcés tout en vérifiant ses performances énergétiques selon les prévisions futures du climat.

L'étude se basera sur une maison unifamiliale existante située en Belgique détenant la certification passive. Celle-ci étant déjà utilisée dans une étude précédente, nous disposons de données nécessaires à la mise en place de notre étude. Par la suite, le choix des divers composants tels que les fichiers météorologiques, les quatre isolants sélectionnés (voir section méthodologie), et certaines hypothèses (systèmes utilisés, occupation, gains, etc.), sera réalisé sur base de la littérature.

Une fois que le modèle de référence sera choisi et corrigé, selon les documents disponibles, au niveau de la composition des parois, une vérification de sa conformité aux caractéristiques d'une maison passive sera effectuée.

Suite à cela, ce modèle sera décliné en 2 types de structures, une massive et une légère provenant de l'étude précédente, dont chacune proposera 5 variations (la composition initiale et les 4 isolants choisis). L'étude va porter sur l'enveloppe du bâti, et seules les parois isolées tels que les murs extérieurs, le plancher des combles et la toiture seront analysées. Les parois intérieures ne varieront pas et seront conservées dans leur intégralité pour servir de séparateur entre les zones définies au préalable. Un total de 10 bâtiments provenant du modèle A sera donc analysé.

Au sein d'un même bâtiment, plusieurs analyses seront faites. Un cas contiendra des systèmes de chauffage et de refroidissement tandis que l'autre non. Dans ces deux cas, des systèmes passifs tels que des protections solaires et du free cooling seront ajoutés un par un. Le premier cas contenant les systèmes actifs (chauffage et refroidissement) devrait permettre

d'estimer la demande énergétique requise pour maintenir le confort en période estivale. Le second cas devrait permettre d'estimer la surchauffe du bâtiment et d'avoir un visuel sur la qualité thermique d'un bâtiment dépourvu de systèmes actifs et de son comportement face au changement climatique. Chaque bâtiment aura donc 6 simulations différentes dont 3 avec systèmes actifs et 3 sans.

Les divers cas de chaque bâtiment seront analysés dans TRNSYS et permettront de sortir la demande d'énergie pour le chauffage, pour le refroidissement, ainsi que le taux de surchauffe sur une année, pour les comparer aux normes du passif standard.

En parallèle, pour l'aspect environnemental, toutes les compositions de parois seront rentrées dans le logiciel TOTEM. Les 10 bâtiments seront ensuite formés, puis un calcul de consommation d'eau chaude sanitaire sera effectué afin de dimensionner la pompe à chaleur nécessaire, ce qui permettra d'intégrer l'énergie dépensée par celle-ci à la demande d'énergie annuelle de chauffage (provenant de TRNSYS) de chaque bâtiment. L'ajout de la consommation totale d'énergie primaire dans chaque bâtiment permettra de déterminer quel est celui qui produit le moins de GES dans le présent et dans le futur.

Une grande partie des données utiles à cette étude a été récoltée via des articles scientifiques, des pages internet d'organisations reconnues mais aussi via des pages internet d'entreprises spécialisées dans le domaine. Cependant certaines informations ont nécessité une prise de contact avec des experts, des entreprises. Ceux-ci ont envoyé des dossiers privés, contenant des informations propres à leur entreprise. Afin d'utiliser ces informations légalement, un formulaire de consentement est envoyé, ce qui leur permet de sélectionner ce qui peut être utilisé ou non (Annexe I).

3.1. Cas d'étude

3.1.1. Le bâtiment étudié

Dans le cadre de cette recherche, l'une des maisons du projet VallÉnergie sera la base de l'étude de cas.

Le rapport d'étude du projet VallÉnergie a été réalisé par l'équipe de recherche « Building Energy Monitoring and Simulation » (BEMS), appartenant à l'université de Liège, située sur

le campus d'Arlon. Celui-ci a été transmis par Pauline Abrahams pour permettre d'étayer l'étude de cas.

VallÉnergie est un projet transfrontalier entre la Belgique et le Luxembourg. Celui-ci a pour objectif d'introduire les constructions autonomes en énergie dans la vallée de l'Attert. Il est constitué de 4 projets de maisons à énergie positive dont 2 sont situées du côté belges et les 2 autres du côté luxembourgeois. Ce projet était destiné à déterminer quels seraient les choix optimaux pour l'enveloppe et pour les installations techniques qui permettraient d'atteindre les performances requises.

La construction de ces maisons devait respecter des critères bien précis. Elles devaient correspondre à des maisons à énergie positive, ou a minima être passives en respectant les critères de la Région Wallonne énoncés dans la section précédente. Leur besoin en énergie primaire doit être inférieur à la production locale d'énergie primaire sur la base d'un bilan annuel. L'utilisation de matériaux durables, si possible, à faibles impacts environnementaux, à faible énergie grise et d'origine locale était préconisée. Les systèmes devaient être performants, adaptables et devaient être alimentés par l'énergie produite sur place à l'aide des ressources naturelles renouvelables.

Dans le cadre de cette étude, les systèmes liés à la production d'énergie ne seront pas pris en compte. Le bâtiment sera donc jugé seulement sur les critères du passif classique et ne prendra donc pas en compte les critères d'énergie primaire renouvelable. L'étude de cas porte sur l'une des 2 maisons situées dans le lotissement communal d'Heinstert (B-6717) du côté belge. Sur base des plans d'architectes et du rapport PEB fournis par l'équipe BEMS, et provenant du cabinet d'architecture chargé du projet, une description complète du bâtiment est faite. Ces informations et l'apport d'un modèle 3D ont permis la reconstitution du bâtiment sur le logiciel TRNSYS.

Ces deux maisons sont mitoyennes l'une avec l'autre, ce sont donc des maisons de type 3 façades. Le rapport nomme ces maisons « modèle A » pour celle côté ouest et « modèle B » pour celle à l'est. Le « modèle A » dispose d'une structure en brique, appelé « composition massive initiale » dans ce cas d'étude, tandis que le « modèle B » dispose d'une structure en bois, appelé « composition légère initiale ». Lors des simulations pour cette étude, les deux types de compositions seront appliquées sur la morphologie du modèle A (Figure 16).

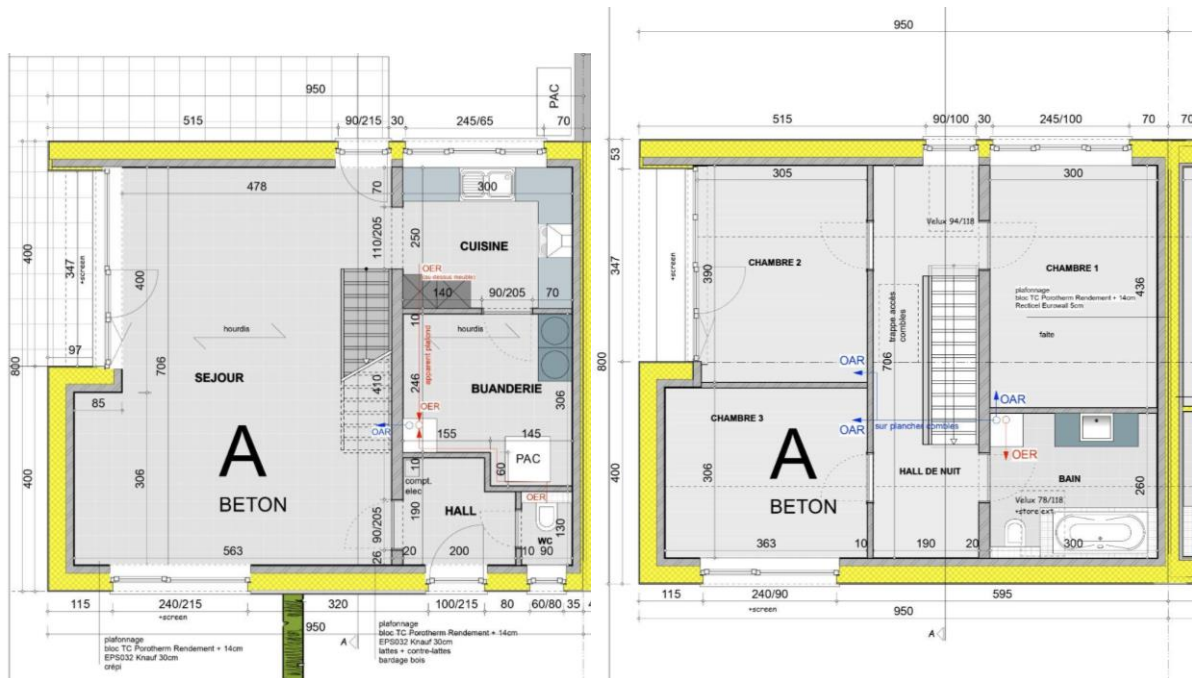


Figure 16 : Modèle A - Plans rez-de-chaussée / étage - Abrahams. P (2025)

Avant de commencer, il est nécessaire de prendre connaissance des détails du modèle de référence effectuée par l'équipe BEMS afin d'établir les conditions et hypothèses de ce mémoire.

Le modèle A détient une superficie de 144.24 m² de plancher chauffé. Les 2 modèles sont équipés de triples vitrages, d'une VMC double flux, d'un plancher chauffant et possèdent un taux d'infiltration n_{50} égal à 0.6 h⁻¹. Les modèles détiennent 2 types de finition externe chacun, et 2 types de toitures, une isolée et l'autre non-isolée. Leur enveloppe a la particularité d'avoir une toiture partiellement isolée, pour éviter de chauffer les combles (Figure 17). Les compositions diffèrent d'un bâtiment à l'autre sauf pour le plancher du sol qui reste le même (Tableau 2).

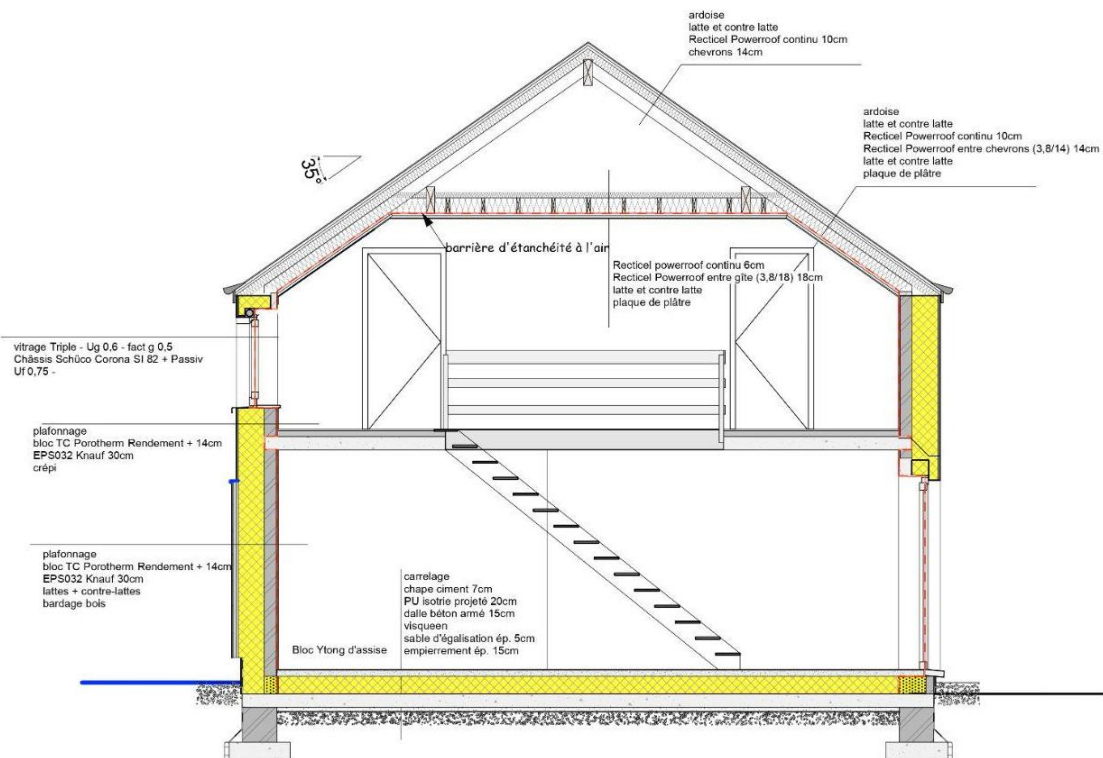


Figure 17 : Modèle A - Coupe AA' - Abrahams, P (2025)

Tableau 2 : Composition des parois des modèles A et B

Parois	Composition massive initiale	Composition légère initiale
Paroi extérieure – mur : revêtement crépi	<ul style="list-style-type: none"> - Plafonnage - Pare-vapeur - Bloc TC Porothers Rendement (14 cm) - EPS032 Knauf (30 cm) - Crépi 	<ul style="list-style-type: none"> - Fermacell - Latte et contre-latte isolée cellulose Homatherm flex (5cm) - OSB (1,5 cm) - Pare-vapeur - Structure cellulose Thermofloc (30 cm) - Steico Protect (10 cm) - Crépi
Paroi extérieure – mur : revêtement bardage bois	<ul style="list-style-type: none"> - Plafonnage - Pare-vapeur - Bloc TC Porothers Rendement (14 cm) - EPS032 Knauf (30 cm) - Lattes et contre-lattes - Bardage bois 	<ul style="list-style-type: none"> - Fermacell - Lattes et contre-latte isolée cellulose Homatherm flex (5cm) - OSB (1,5 cm) - Pare-vapeur - Structure cellulose Thermofloc (30 cm) - Steico Protect (10 cm) - Lattes et contre-lattes - Bardage bois

Dalle de sol	<ul style="list-style-type: none"> - Carrelage - Chape ciment (7 cm) - PU isotrie projeté (20 cm) - Dalle de béton armé (15 cm) - Visqueen - Sable d'égalisation (5 cm) - Empierrement (15 cm) 	<ul style="list-style-type: none"> - Carrelage - Chape ciment (7 cm) - PU isotrie projeté (20 cm) - Dalle de béton armé (15 cm) - Visqueen - Sable d'égalisation (5 cm) - Empierrement (15 cm)
Plancher combles isolé	<ul style="list-style-type: none"> - Plaque de plâtre (1,25 cm) - Lattes et contre-lattes - Pare-vapeur - Recticel Powerroof entre gîte (3,8/18) (18 cm) - Recticel Powerroof continu (6 cm) 	<ul style="list-style-type: none"> - Plaque de plâtre (1,25 cm) - Lattes et contre-lattes - Pare-vapeur - Cellulose Thermofloc entre gîte (30 cm) - Homatherm flex (10 cm)
Toiture inclinée isolée	<ul style="list-style-type: none"> - Plaque de plâtre (1,25 cm) - Lattes et contre-lattes - Recticel Powerroof entre chevrons (3,8/14) - (14 cm) - Recticel Powerroof continu (10 cm) - Lattes et contre-lattes - Ardoise 	<ul style="list-style-type: none"> - Plaque de plâtre (1,25 cm) - Lattes et contre-lattes - Homatherm flex (5cm) - Pare-vapeur intello - Cellulose Thermofloc entre chevrons (30 cm) - Steico spécial (10 cm) - Ardoise
Toiture inclinée non-isolée	<ul style="list-style-type: none"> - Chevrons (14 cm) - Recticel Powerroof continu (10 cm) - Lattes et contre-lattes - Ardoise 	<ul style="list-style-type: none"> - Chevrons (14 cm) - Steico spécial (10 cm) - Lattes et contre-lattes - Ardoise

Le cabinet d'architecture a transmis un rapport PEB sur lequel figure le coefficient de transmission thermique de chaque paroi, noté « U » et s'exprimant en $W/m^2.K$ (Tableau 3). Celui-ci représente « la quantité de chaleur traversant une paroi [...] par unité de temps, par unité de surface et par unité de différence de température entre les ambiances situées de part et d'autre de la paroi. » (Trachte & Stiernon, 2023, p.75)

Tableau 3 : Modèle A - Valeur U - Abrahams et al. (2015)

Type de paroi	Valeur U [$W/m^2.K$]
Paroi extérieure	0,107
Dalle de sol	0,120
Mur intérieur porteur	3,228
Mur intérieur non-porteur	3,629
Toiture inclinée isolée	0,107
Toiture inclinée non-isolée	0,230

3.1.2. Bâtiment de référence pour la configuration sans systèmes actifs

Dans le cadre de cette étude, il est choisi de comparer une maison configurée avec des systèmes actifs à une maison qui n'en a pas. Pour que les configurations soient les plus réalistes possibles, elles se baseront sur des cas réels. Ainsi l'exemple de la maison passive situé à Tontelange, dans le village de la commune d'Attert situé à la frontière belgo-luxembourgeoise, servira de référence pour la configuration sans systèmes actifs. Cette maison est également étudiée dans le cadre du projet interreg IV A « VallÉnergie ». Elle a la particularité de fonctionner sans systèmes actifs tels qu'un système de chauffage et de refroidissement. (Figures 18 à 21).



Figure 18 : Façade Ouest - maison de Tontelange (Detienne, 2018)



Figure 19 : Façade Est - maison de Tontelange (Detienne, 2018)



Figure 20 Façade Sud - maison de Tontelange (Detienne, 2018)



Figure 21 : Façade Nord - maison de Tontelange (Detienne, 2018)

Cette maison unifamiliale est composée de 4 façades et 3 étages, comprenant le rez-de-chaussée, dont le dernier étage est mansardé. En termes de techniques, elle contient une VMC double flux équipée d'un récupérateur de chaleur. Celle-ci permet de renouveler l'air dans les pièces de vie, avec de l'air frais provenant de l'extérieur, et d'extraire l'air vicié des pièces humides. Le récupérateur de chaleur vient effectuer un transfert de chaleur de l'air extrait vers

l'air neuf entrant. Ceci permet d'obtenir une entrée d'air neuf à une température convenable, et de réduire les dépenses énergétiques. Un chauffage électrique, placé dans le salon, vient compenser le manque d'apport de chaleur dû au fait que les températures en Belgique sont assez froides en hiver. L'utilisation d'une pompe à chaleur (PAC) air-eau sert uniquement pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS). Celle-ci est placée dans le garage pour récupérer la chaleur des moteurs qui y sont garés.

Les systèmes de cette maison seront pris en référence pour notre étude de cas.

3.1.3. Le profil de simulation

Afin de simplifier la modélisation, nous nous intéresserons uniquement à l'enveloppe d'un bâtiment. Le modèle A sera considéré comme un bâtiment 4 façades ayant un pignon aveugle à la place du mur mitoyen. Sa composition est remplacée par celle de la paroi extérieure. La répartition des espaces intérieurs est reprise du modèle thermique utilisée par Pauline Abrahams lors de la précédente étude sur ce bâtiment. Cette dernière a défini le zonage sur la base d'hypothèses concernant les consignes de température, les gains internes et solaires. Ce qui signifie que deux pièces adjacentes ayant des similitudes sur ces 3 hypothèses sont regroupées en une seule zone (exemple : zone 3). L'espace intérieur est donc réparti en 10 zones dont la 9^{ème} représente les combles qui ne sont pas aménagés (Figure 22). Les combles ne sont pas chauffés et une partie de la toiture à une isolation minime pour réduire l'utilisation de matériaux.

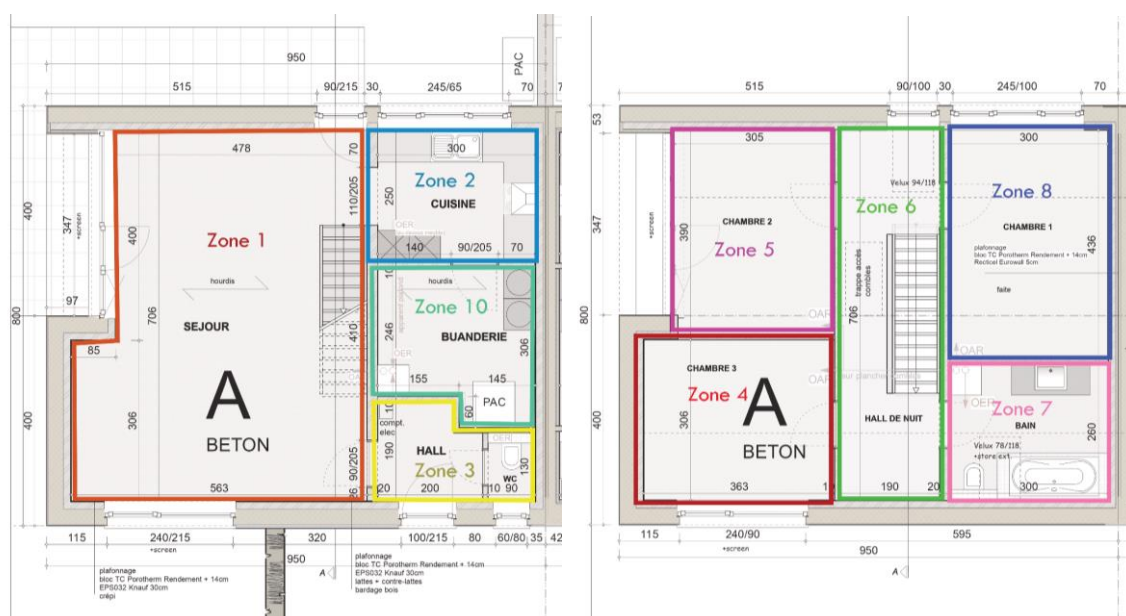


Figure 22 : Modèle A - Zoning pour simulations – Production personnelle

Le modèle se divise en 2 cas. Le premier étant une maison passive constituée de systèmes actifs comme le chauffage et le refroidissement. Le second va suivre le cas de la maison sans systèmes actifs de Tontelange présentée dans la section précédente. C'est-à-dire qu'aucun système de chauffage et de refroidissement est appliqué. Seule une PAC air-eau servira à l'ECS. Les 2 cas vont utiliser les mesures passives utilisées par Attia et Gobin (2020) telles que l'emploi de protections solaires et de ventilation naturelle nocturne pour pallier la surchauffe lors de la période estivale.

Profils d'occupation

Le ménage est composé de 4 personnes, dont 2 adultes actifs et de 2 enfants scolarisés. Des profils types pour chaque pièce de vie sont établis pour répartir les occupants dans la maison selon l'heure de la journée. Seules les pièces qui servent de passage ne détiennent pas de profil d'occupation telles que l'entrée, le hall de nuit et la buanderie. Cela permet de déterminer l'apport de gains internes générés dans chaque pièce. Il est choisi que les occupants conservent leurs habitudes autant en semaine qu'en week-end. Ils sont absents de 8 heures à 18 heures en semaine et reviennent pour le repas du midi le week-end de 12 heures à 14 heures.

Leur journée type est la suivante :

Tout le monde se lève à 7 heures (Tableau 4), puis 3 occupants descendent dans le salon pour prendre leur petit déjeuner pendant que le dernier occupe la salle de bain (Tableau 5). Ils occupent celle-ci à tour de rôle et ne sont donc jamais 4 dans le salon le matin (Tableau 6).

De 12 heures à 13 heures, le week-end, le même schéma se répète avec la cuisine. Ce n'est qu'à partir de 13 heures jusqu'à 14 heures que le salon comporte les 4 occupants.

Une fois rentrés à 18 heures, les 4 occupants restent une heure dans la salon (Tableau 7) avant qu'un aille dans la cuisine, pendant une heure, pour préparer le repas (Tableau 8). C'est à 20 heures qu'ils se rassemblent de nouveau dans le salon pour dîner. Une heure après, le même schéma qu'en matinée se répète avec la salle de bain (Tableau 5). Ils finissent tous par monter dans leur chambre respective à 22 heures (Tableau 4).

Tableau 4 : Profil d'occupation chambre – Production personnelle

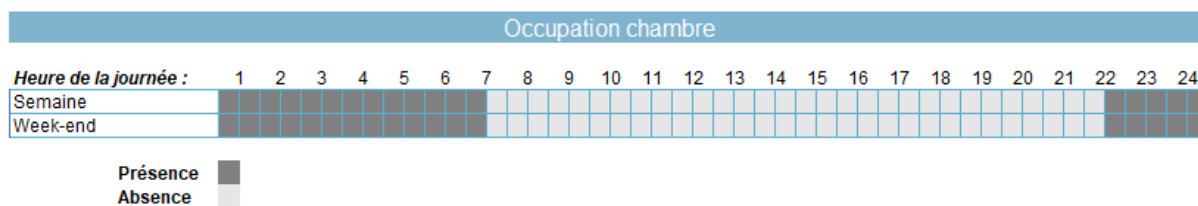


Tableau 5 : Profil d'occupation salle de bain – Production personnelle

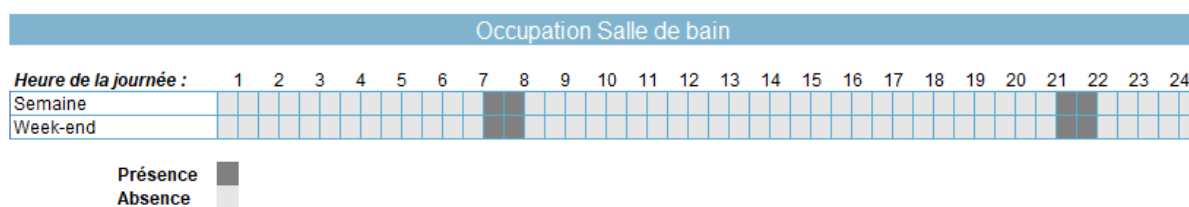


Tableau 6 : Profil d'occupation salon - 3 personnes – Production personnelle

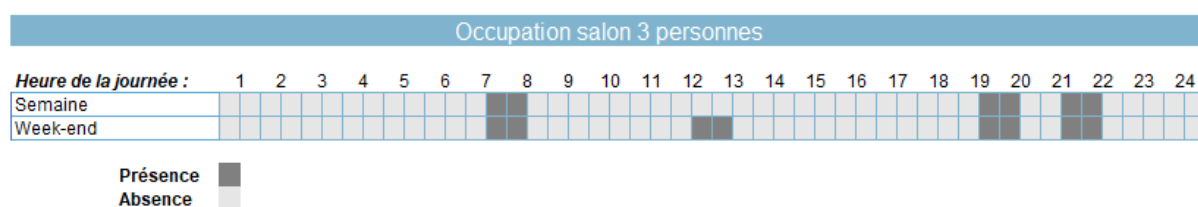


Tableau 7 : Profil d'occupation salon - 4 personnes – Production personnelle

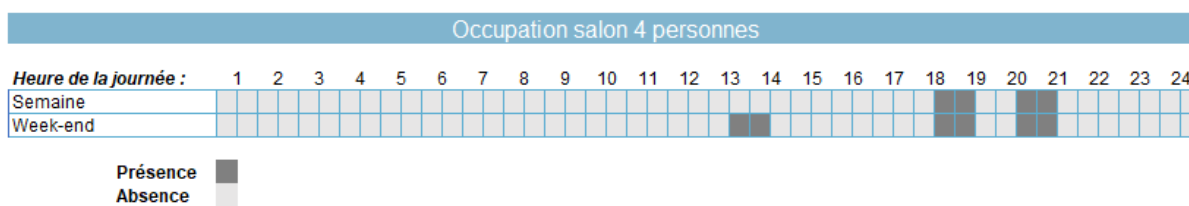
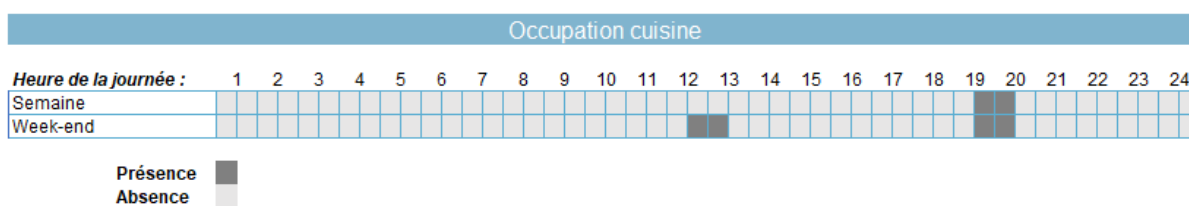


Tableau 8 : Profil d'occupation de la cuisine - Production personnelle



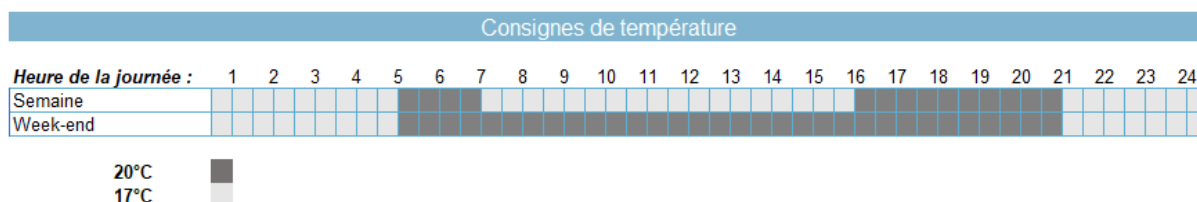
Température de consigne pour le cas équipé d'un chauffage et d'un refroidissement

La consigne est appliquée dans toutes les pièces équipées d'un système de chauffe, c'est-à-dire toutes les zones hormis la zone 9. La consigne choisie est de 20°C pour la journée et de 17°C pour la nuit (Tableau 9). Le chauffage est programmé pour se lancer 2 heures avant que les occupants se lèvent ou rentrent de leur journée pour qu'ils aient une température de confort de 20°C à leur arrivée.

Pour le week-end, le chauffage reste allumé pour éviter les multiples mises en marche.

Selon Abrahams et al. (2015), il a été constaté, sur leur projet, qu'une variation de 1°C sur la consigne pouvait avoir un impact de 18% sur la consommation énergétique, contrairement à la littérature qui évoque une différence de 8%. La performance énergétique des maisons passives étant bonne, elle serait plus sensible à la variation de paramètres (Abrahams et al., 2015). C'est pour cela qu'une différence de 3 degrés est choisie entre les limites haute et basse.

Tableau 9 : Profil de la consigne de température de chauffage – Production personnelle



Le refroidissement est appliqué dans les pièces qui détiennent un profil d'occupation, mais seule la salle de bain n'en est pas équipée. Celui-ci s'active lorsque la température intérieure égale ou dépasse les 25°C, en raison des problèmes explicités dans l'état de l'art. Contrairement au chauffage, il est activé toute l'année. Le chauffage et le refroidissement sont considérés comme illimités, ce qui nous permettra par la suite d'en déduire l'énergie nécessaire pour éviter la surchauffe dans le bâtiment.

Les gains internes

Selon Abrahams et al. (2015), les gains internes changent peu entre les maisons passives et les maisons traditionnelles. Néanmoins, ces apports internes vont participer à couvrir les pertes thermiques, ce qui va créer des différences entre les maisons passives et les autres. Le rapport d'Abrahams et al. (2015) se base sur les travaux de Firlag et Murray (2013), énonçant que les gains internes peuvent couvrir 65% des pertes dans le cas des maisons passives et seulement

20% dans les autres cas. A savoir que ces gains proviennent principalement des occupants, de l'éclairage et des appareils électroménagers (Abrahams et al., 2015).

Les occupants

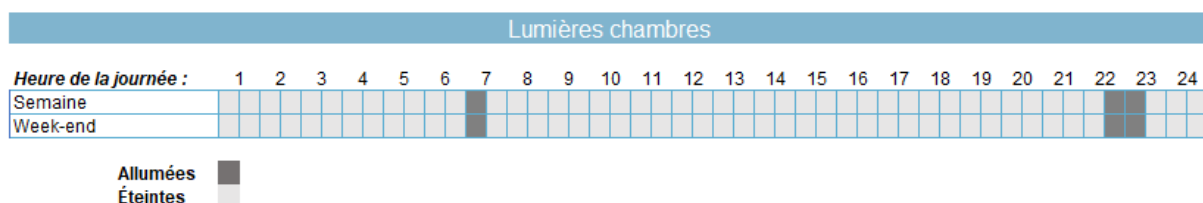
La librairie des gains du logiciel TRNSYS offre plusieurs possibilités. Elles proposent différents taux représentatifs de chaleur et d'humidité dégagées par le corps humain selon son état d'activité (assis, marche, course,...). Celles-ci proviennent du manuel ASHRAE de 2013. Les gains de la norme ASHRAE de cette banque de données, sont ajustés pour faire une moyenne entre le dégagement de chaleur corporel des hommes, des femmes et des enfants. Une femme dégage en moyenne 85% de ce que représente la part d'un homme, et un enfant 75%. De cette puissance dégagée par le métabolisme, environ 70% représente la chaleur sensible exprimée en W, dont 60% est de la puissance radiative et 40% de la puissance convective (Annexe II).

Pour cette étude, il est considéré que les occupants sont assis et en état de "repos". Nous avons donc 2 types de gains à choisir. Le choix se porte sur un gain ajusté à 95 Watts par personne, pour une température sèche de la pièce à 24°C, qui est utilisée lorsque les occupants sont dans leur chambre et un gain ajusté à 105 Watts lorsqu'ils sont dans les autres pièces.

L'éclairage

L'éclairage est comptabilisé dans les pièces où les profils d'occupation ont été établis. Il n'y en a donc pas dans l'entrée, ni dans la buanderie ni dans le hall de nuit. Il est choisi que la lumière ait une puissance de 6 W/m², qu'elle impacte 30% de l'aire des chambres, 50% de celle du salon et 100% de celle de la cuisine. Les heures d'utilisation sont les mêmes que les profils d'utilisation, hormis pour la chambre dans laquelle les occupants allument la lumière avant de se lever et le soir avant de se coucher (Tableau 10).

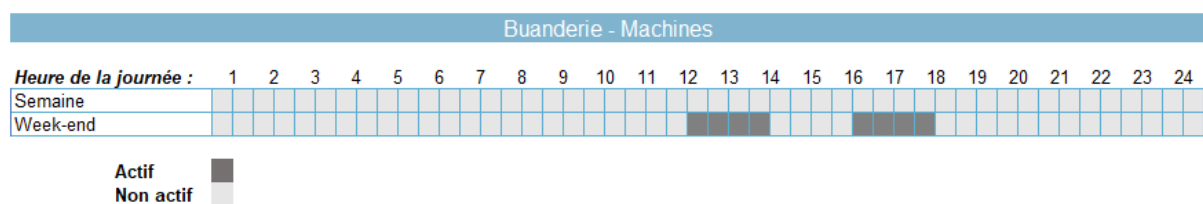
Tableau 10 : Profil de l'utilisation des lumières dans les chambres - – Production personnelle



L'électroménager

Concernant les équipements électroménagers, un type de gain pour les maisons unifamiliales est proposé dans la bibliothèque de gains de TRNSYS, il est donc choisi. Celui-ci est appliqué dans les pièces où sont disposés les principaux équipements, c'est-à-dire la cuisine, la buanderie et le salon. La surface de la cuisine et de la buanderie étant petite, il est envisagé que le gain a une emprise sur toute la pièce. Pour le salon, il est estimé que la télé répercute sa chaleur sur 10% de l'aire de la pièce. La télé est considérée allumée en même temps que la pièce est occupée. Concernant la cuisine, les équipements sont considérés comme toujours allumés contrairement à la buanderie où les machines sont utilisées seulement les week-ends (Tableau 11).

Tableau 11 : Profil de l'utilisation de l'électroménager dans la buanderie – Production personnelle



Le taux d'infiltration à l'air

La différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur provoque des phénomènes de surpression et de dépression qui permettent aux flux d'air de traverser l'enveloppe d'un bâtiment (Trachte & Stiernon, 2023, p.76). S'ils ne sont pas maîtrisés, cela engendrera une diminution des performances énergétiques de l'enveloppe, une baisse du confort intérieur et des dégradations pour les matériaux sensibles à l'eau qui composent la paroi (Trachte & Stiernon, 2023, p.76). Le taux de renouvellement d'air est « le rapport entre le débit d'air et le volume du bâtiment [...] pour une différence de 50 Pa soit la valeur n_{50} . » (Hauglustaine & Simon, 2018, p.15). L'étanchéité à l'air est un paramètre important pour obtenir une faible consommation énergétique. Les maisons passives détiennent un taux de renouvellement d'air n_{50} inférieur ou égal à 0.6 h^{-1} (Maison Passive, 2024). Pour l'application de cette valeur dans TRNSYS, il est nécessaire d'obtenir le taux de ventilation saisonnier moyen, noté n_{sb} qui prend seulement en compte le débit des fuites dans l'enveloppe (Hauglustaine & Simon, 2018).

Celui-ci se calcule selon la formule suivante : $n_{sb} = n_{50}/a$

Avec « a » le facteur d'influence du vent sur l'habitation qui équivaut à 30 pour les habitations qui sont fortement protégées, à 20 pour celles qui ont une protection moyenne et à 10 pour celles qui sont exposées (Hauglustaine & Simon, 2018 p.15).

Il est choisi une exposition au vent moyen ce qui correspond à un taux de ventilation saisonnier moyen de 0.03 h^{-1} .

La ventilation

Le choix d'un taux d'infiltration d'air relativement bas, nécessite la mise en place d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC) afin de garantir la qualité de l'air intérieur et un renouvellement hygiénique (Trachte & Stiennon, 2023, p.77). Pour respecter les normes belges et luxembourgeoises, l'installation d'une VMC double flux couplée à un récupérateur de chaleur ayant 85% d'efficacité est utilisée. Ce choix provient du rapport de Abrahams et al. (2015) qui l'ont utilisé lors de leur étude. De plus, l'ajout d'un by-pass, avec une activation de l'échangeur de chaleur lorsque la température extérieure est inférieure à 15°C , permet d'éviter le risque complémentaire de surchauffe en période estivale. Chaque pièce a son débit d'extraction ou d'amenée d'air calculée, devant respecter la norme NBN D50-001. Celle-ci préconisant un débit hygiénique minimal de $3.6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ (Tableau 12) pour la norme belge et de 0.35 h^{-1} pour la norme luxembourgeoise (Les Avis la Chamb. des métiers, p. 57, 2014, dans Abrahams et al., 2015).

Tableau 12 : Débits hygiéniques minimaux prévus par l'annexe V de l'arrêté du gouvernement wallon du 10 mai 2012 - Abrahams et al. (2015, p. 26)

	Amenée d'air neuf	Évacuation d'air vicié
Règle générale	3.6 m³/h.m² de surface au sol	
Avec limites particulières		
Living	min. 75 m³/h (max. 150 m³/h)	
Chambres, locaux d'études et de jeux	min. 25 m³/h (max. 72 m³/h par personne)	
Cuisines fermées, salles de bain, buanderies		min. 50 m³/h (max. 75 m³/h)
Cuisines ouvertes		min. 75 m³/h
W.C		25 m³/h

La ventilation naturelle nocturne, appelée free cooling (FC), a également été prise en compte. Les habitants sont les seuls actionnaires sur cette solution, il suffit d'ouvrir les fenêtres pour limiter les risques de surchauffe. Ces ouvertures sont réalisées entre 20 heures et 8 heures du matin, dans le salon et les chambres. Il faut également remplir deux autres conditions. La

première étant que la température extérieure doit être inférieure à la température moyenne pondérée intérieure et cette même température doit avoir atteint les 24°C. Pour cette simulation, une entrée d'air d'une valeur de 4 vol/h couplée à la VMC en marche est encodée. Celle-ci représente le débit minimum (Energie Plus Le Site, s. d.) et correspond à une ouverture en oscillo-battant (Fédération de l'Industrie du Verre, 2014, p.7, dans Abrahams et al., 2015).

Les protections solaires

Les protections solaires contribuent à la réduction des heures d'inconfort thermique, notamment durant la période estivale, ce qui justifie leur intégration dans la modélisation. Elles sont disposées sur l'intégralité des vitrages et sont actives de mai à septembre (Tableau 13). Ce choix est réalisé sur base des températures estivales de l'année 2024 (Figure 23).

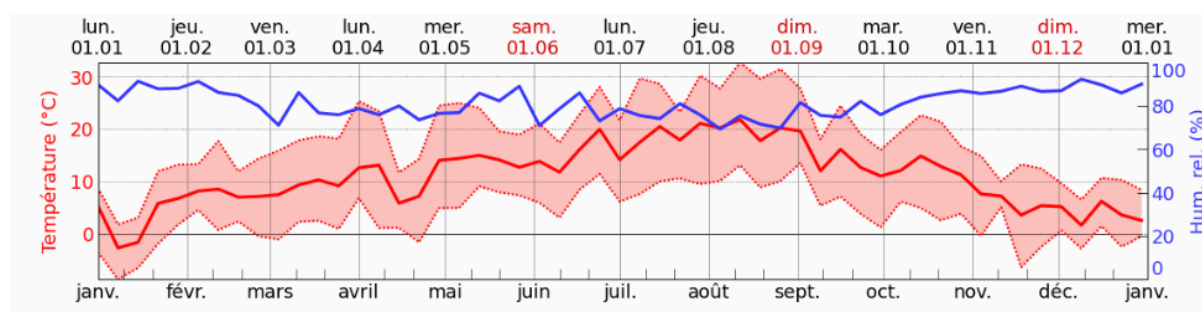


Figure 23 : Températures observées sur l'année 2024 - (Archive Météo Liège - Meteoblue, 2025)

Lorsque le rayon incident atteint les 140 W/m², les protections s'abaissent et ne laissent passer que 19.5 % du rayonnement le traversant. Celles-ci se relèvent lorsque le rayonnement passe sous la barre des 120 W/m², laissant passer l'intégralité du rayonnement.

Tableau 13 : Profil d'utilisation des panneaux solaires – Production personnelle

Période d'utilisation des protections solaires												
Mois :	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Semaines												
Actif												
Non actif												

3.2. Choix des fichiers météorologiques

Dans cette étude, nous nous intéressons au comportement des maisons passives face aux contraintes du changement climatique. La maison du projet VallÉnergie est étudiée pour permettre d'obtenir des réponses aux questions en section 1.2. Pour cela, nous allons utiliser des fichiers météorologiques afin d'effectuer les analyses.

Le choix du fichier passe par une bonne compréhension du contexte climatique associé à une analyse des différentes méthodes de construction des fichiers météorologiques. Pour cela, la composition du fichier se fera sur base de la littérature.

Pour déterminer quel fichier choisir, Doutreloup et al. (2022) suggèrent les étapes à suivre :

- Choisir un fichier météorologique typique (TMY) ou extrême (XMY)
- Choisir le paramètre qui détermine l'année choisit (température, rayonnement incident, etc.)
- Choisir la période de référence
- Choisir le scénario socio-économique
- Choisir l'un des 3 modèles du système terrestre (BCC-CSM2-MR, MPI ESM1.2 ou MIROC6)

Une fois que le fichier, le scénario, le modèle, le lieu et la période sont définis, les données météorologiques sont disponibles gratuitement sur le référentiel en ligne Zenodo (Doutreloup et Fettweis, 2021) dont les données sont issues du projet de recherche OCCuPANt (Doutreloup, 2022).

Dans le cadre de ce mémoire, le bâtiment utilisé est situé dans la commune d'Attert, proche de la frontière belgo-luxembourgeoise, sur le futur lotissement communal d'Heinstert. Le choix de la localisation pour ces données se fait par rapport au 12 villes proposées par le référentiel de données météorologique en ligne, Zenodo, de Doutreloup et Fettweis (2021). La ville d'Arlon, étant la plus proche du cas d'étude, sera choisie pour le choix des fichiers météorologiques.

Le choix pour les autres étapes s'est porté sur les éléments suivants :

- un fichier appelé "Typical Meteorological Year (TMY)". Celui-ci est basé sur les mois types les plus représentatifs (Barnaby et Crawley, 2011, dans Doutreloup et al., 2022) sur une période historique de minimum 10 ans (Doutreloup et al., 2022). Il inclut des données telles que la température, le rayonnement solaire et d'autres facteurs qui sont essentiels à la réalisation de cette étude de cas (Doutreloup et al., 2022). L'objectif est d'analyser le comportement de l'étude de cas, sur une année, dans le climat actuel avec une projection future.

- La température est essentielle pour l'étude de cas. Elle permet d'estimer le pourcentage de surchauffe sur le bâtiment durant une année, et d'évaluer son influence sur la consommation de chauffage et de refroidissement.
- L'analyse de l'évolution du bâtiment passif se ferait sur une période longue pour vérifier si les projections effectuées auront un fort impact sur le bâtiment. C'est pour cela que la maison sera comparée entre le climat actuel et la période 2081-2100. Les données historiques étant seulement comprises entre 2006 et 2020 ont orienté le choix vers la période 2021-2040. L'objectif étant de vérifier que les bâtiments conservent leur passivité face au changement actuel et non passé.
- Pour les raisons que le service des changements climatiques (s.d.-a) a énoncées, le choix s'est porté sur le scénario socio-économique SSP5-8.5. On cherche à voir comment le bâtiment s'adapte avec les projections pessimistes du scénario SSP5-8.5. Ce cadre est le pire scénario qui pourrait arriver.
- Pour finir, on cherche à voir comment le bâtiment pourrait s'adapter sous le pire scénario envisagé. Le modèle ESM MIROC6 serait donc utilisé car il projette un réchauffement plus élevé que la moyenne d'ensemble des 30 ESM pour l'horizon 2100 (Doutreloup et al., 2022).

3.3. Les matériaux isolants biosourcés

3.3.1. *Choix des matériaux isolants*

Pour cette étude, les compositions des modèles A et B sont utilisées. Les seuls matériaux qui varient d'une simulation à l'autre sont les isolants. Et ce, uniquement dans les murs externes, les planchers et les toitures.

Parmi tous les isolants biosourcés recensés en Wallonie, en section 2.3.3 une sélection via la littérature existante est effectuée pour choisir les 4 isolants retenus. Les matériaux ayant le moins de résultats de recherche sont sélectionnés. L'utilisation de la formulation “(“environmental impact” or “life cycle”) and insulation”, sur Scopus, est appliquée avec les différentes appellations de chaque matériau.

Le top 5 des matériaux les moins traités dans la littérature est le suivant :

- Le colza : 3 articles

- L’herbe : 6 articles
- Le miscanthus : 11 articles
- Le mouton : 23 articles
- Le lin : 23 articles.

Le colza n'apparaît pas sur le logiciel TOTEM car c’est un matériau en cours de développement. Il n’est donc pas utilisé dans cette étude.

Selon Suray (2025), les ressources wallonnes concernant ces matériaux sont dans le tableau suivant (Tableau 14) :

Tableau 14 : Surfaces agricoles wallonnes - Suray (2025, p72)

Matériau	Hectares
Herbe	311.287
Lin	13.087
Miscanthus	312,91

Les données concernant la laine de mouton n’ont pas été indiquées par Suray (2025) et Cluster Eco-construction (2024). Cependant, d’après Valbiom (2023b), la Wallonie recensait plus de 97 000 moutons en 2021. Selon eux, chaque mouton produit en moyenne 2 kilogrammes de laine brute par an, faisant 200 tonnes de laine par an. Cette laine est à répartir selon les différentes filières dont 17% sont utilisés en feutre, tapis et isolants. Ce pourcentage provient d’une enquête réalisée sur 10% des éleveurs wallons (Valbiom, 2023a).

Ainsi nous allons nous intéresser au miscanthus, à l’herbe, au lin et à la laine de mouton. Certains articles sortis de cette sélection seront utilisés dans le cadre de ce mémoire.

3.3.2. Caractéristiques des matériaux retenus

3.3.2.1. Miscanthus

Le miscanthus giganteus, également appelé « herbe à éléphant » ou roseau de Chine (Rondin, 2022) est une plante de la famille des graminées, ressemblant d’apparence à du bambou et ayant une taille pouvant aller jusqu’à 4 mètres (Le Miscanthus : La Ressource de L’avenir, s. d.). Cette plante, originaire d’Asie de l’Est, est cultivée en Europe depuis son arrivée au Danemark en 1930 (Rondin, 2022). Celle-ci se développe à partir d’un rhizome planté qui au bout de 3 ans se renouvelle tout seul (Rondin, 2022). Le miscanthus peut pousser

dans les sols arides et n'a besoin que de peu d'engrais pour s'épanouir, ce qui rend sa culture pérenne (Witzleben, 2022).

Selon la situation géographique, l'accès à l'eau et à la qualité des sols, le miscanthus peut absorber entre 3 et 40 tonnes de CO₂ équivalent par hectare (CO₂-éq.Ha)(Witzleben, 2022). Il participe donc à la réduction des GES tout en contribuant à la santé des sols de par sa biodégradabilité (Pons Ribera, 2025) et l'utilisation infime d'intrants pour le faire pousser (Rondin, 2022). Il est favorable aux terres belges et à un rendement qui s'élève entre 15 à 25 tonnes par hectares par an (*Le Miscanthus : La Ressource de L'avenir*, s. d.).

Autrefois utilisé comme combustible, cette biomasse détient des caractéristiques qui intéressent le secteur de la construction, notamment pour l'isolation des parois (Adil, 2016). Selon Shulte et al. (2021), le miscanthus est un matériau peu intégré dans le marché mais qui est prometteur sur le plan environnemental et économique. Il pourrait bien devenir la première biomasse dans une future bioéconomie européenne, passant devant le coton et le lin en termes de rendement (Shulte et al., 2021)

Cette biomasse a la particularité d'être utilisée de diverses manières. Elle sert de litière pour les volailles, bovins et porcs et est de meilleure hygiène que la paille. Elle est également utilisée dans le secteur de l'énergie en tant que bio combustible et dans les composites pour réduire l'utilisation de plastiques dans l'automobile ou les emballages (*Le Miscanthus : La Ressource de L'avenir*, s. d.). Dans le secteur de la construction, celle-ci peut être utilisée pour la fabrication de briques, d'isolants, de panneaux (Sutkowska et al., 2024, dans Pons Ribera, 2025), de béton léger, de crépit (Adil, 2016) ainsi que dans différents liants à base de roches tels que le calcaire ou la pouzzolane (Witzleben, 2022).

Selon le Cluster Eco-construction, la production actuelle en Wallonie s'élève à 1500 hectares et son potentiel serait de 3000 hectares, ce qui équivaut à un rendement variant de 8000 à 15 000 kg/ha (communication personnelle, 31 mars 2025). Ces chiffres sont nettement supérieurs à la surface énoncée par Suray (2025). Une entreprise wallonne a fait une demande au Centre scientifique et technique de la construction (CSTC) pour faire une analyse de 12 éprouvettes de miscanthus provenant de divers lieux de production tels que Héron, Fumal, Paix-Dieu, Saint-Marc, etc (CSTC, 2021). Le rapport est réalisé en conformité avec le système de management de la qualité du CSTC certifié ISO 9001. Il en ressort diverses informations dont la moyenne pondérée de ces éprouvettes qui note une conductivité thermique du

miscanthus en vrac de l'ordre de 0.048 W/m.K (CSTC, 2021). Sa masse volumique moyenne environne les 131.5 kg/m³ (CSTC, 2021). N'ayant pas d'informations quant à sa chaleur spécifique, l'hypothèse d'une valeur de 1600 J/kg.K est posée pour corrélérer avec celles du lin, du chanvre, du coton et de la paille qui sont également des fibres. Pour rappel, la chaleur spécifique « est une grandeur propre à chaque matériau qui indique la quantité de chaleur à apporter à un kilo de matière pour élever sa température d'un Kelvin » (Trachte & Stiernon, 2023, p.38).

Cet isolant se pose majoritairement en toiture et dans les combles. Il peut également être placé dans les murs mais nécessitent d'une structure complémentaire (Promisc, communication personnelle, 7 avril 2025). Pour mieux comprendre son application dans le bâtiment, l'entreprise Novabiom présente une construction dont le seul isolant est le miscanthus (Novabiom, 2014).

En 2014, un couple décide de construire leur maison d'une superficie de 200 m² en ossature bois, complétée de miscanthus pour l'isolation. Les murs porteurs sont préfabriqués sur place, à plat, avant d'être installés (Figure 24). Ils sont composés d'une structure en sapin scandinave de dimensions 45x220 et sont entièrement remplis de miscanthus. De chaque côté, un panneau de particules en aggloméré de 12 mm dont celui coté extérieur est traité hydrofuge et celui coté intérieur est traité pare-vapeur (Novabiom, 2014). Au niveau de la toiture, la charpente est remplie de 22 cm de miscanthus, sauf que l'isolant est placé sur la toiture une fois que la charpente est mise en place.



Figure 24 : Mur en bois rempli de miscanthus (NETO, 2022, p.1)

L'isolant provient d'agriculteur à proximité (moins de 20 kilomètres) et est livré en vrac. Le chauffage de cette maison est effectué au poêle à bois pour lequel 3 stères de bois passent chaque année pour conserver une température intérieure de 20°C. Le coût de ce chauffage

revient à 150€ par an. Concernant l'isolation de la maison, le coût total pour 200 m³ d'isolation est de 3600€, ce qui était 10 fois moins cher que les autres isolants biosourcés comme le lin, le chanvre, la laine de mouton, la ouate de cellulose, etc. La résistance thermique a été déterminée pour chaque paroi. Concernant le mur, sa résistance vaut 3.24 (m².K/W), celle du plafond fait 9 (m².K/W) et celle du plancher 4.3 (m².K/W).

3.3.2.2. *Herbe*

Cette matière a l'avantage d'être abondante et de recouvrir « un quart des terres de la planète », mais celle-ci est grandement sous-estimée (Bolduc, 2021). Elle n'a pas besoin d'être cultivée et détient une capacité de régénération rapide (Gramitherm, 2025) qui permet de la collecter en moyenne tous les 3 mois (Bolduc, 2021).

L'isolation à base d'herbe est utilisée dans la construction depuis 12 ans (Suray, 2025)(Figure 25). En Belgique, une entreprise continue de développer ce produit provenant de suisse (Trachte & Stiernon, 2023,p.39). C'est en 2014, qu'un brevet suisse, initié en 2006 (Bolduc, 2021) est déposé pour ces panneaux à base d'herbes. (Valbiom, 2021a). L'herbe utilisée dans ces panneaux provient de l'entretien des parcelles et des bords de routes, qui ne peut être consommée par les animaux (Gramitherm, 2025). Celle-ci compose le panneau à 72%. Le reste est un ajout de fibre de jutes (20%), permettant la structuration du panneau et de son maintien lors de sa mise en place (Suray, 2025), et de fibres polyester (8%) qui permettent de lier le tout (Trachte & Stiernon, 2023, p.39). Ces 3 types de fibres vont être extraites, traitées puis mélangées et thermoformées pour obtenir des panneaux ayant des épaisseurs qui varient de 45 mm à 240 mm (Trachte & Stiernon, 2023, p.40; Gramitherm, 2025).



Figure 25 : Laine d'herbe - Gramitherm (2025)

Ce matériau apporte « beaucoup de confort » (Bolduc, 2021). En effet, il détient une bonne conductivité thermique variant de 0.036 à 0.04 W/m.K ainsi que de bonnes propriétés d'absorption au niveau acoustique (Trachte & Stiernon, 2023, p.40). En plus d'être un bon

régulateur d'humidité, il a un très bon déphasage (*Taka Yaka, 2018*). Il peut accumuler une chaleur de 2232 J/kg.K (Gramitherm, 2024), ce qui lui permet de protéger du froid et de la chaleur estivale (Gramitherm, 2025). Ce panneau est également léger avec une masse volumique variant de 40 à 45 kg/m³ (Trachte & Stiernon, 2023, p.40).

Cette biomasse contribue à la réduction des GES en absorbant le CO₂ (Gramitherm, 2025). Une entreprise wallonne présente cette matière sous forme de matelas souples et flexibles qui se placent soit en toiture soit dans les planchers soit dans les murs extérieurs tout en nécessitant d'une structure complémentaires (Trachte & Stiernon, 2023, p.224).

3.3.2.3. *Lin*

Le lin est une plante appartenant à la famille des Linaceae qui pousse dans les endroits tempérés et humides (Trachte & Stiernon, 2023, p.37). Elle est originaire d'Asie Centrale et est cultivée depuis des milliers d'années (*Laine de Lin, s. d.*), principalement en Europe (Trachte & Stiernon, 2023, p.37). C'est une fibre textile qui a la particularité d'avoir une longueur de mètre et de croître rapidement (*Laine de Lin, s. d.*), ce qui en fait un matériau adéquat pour la réalisation de cordes et de textiles (Trachte & Stiernon, 2023, p.37). Les fibres de mauvaises qualités et de petites tailles sont utilisées dans le secteur de la construction pour la réalisation de panneaux d'isolation (Menet, 2014).

Le lin doit subir une transformation mécanique avant d'être lié soit par des féculés de pomme de terre soit des fibres de polyester. D'autres matières peuvent venir le compléter comme le chanvre, le coton, la cellulose et la laine de mouton (Trachte & Stiernon, 2023, p.37). Sa transformation se termine par un traitement pour prévenir des moisissures et des nuisibles qui pourraient le détériorer (Trachte & Stiernon, 2023, p.38).

Ce matériau détient d'excellentes capacités thermique et acoustique (*Laine de Lin, s. d.*). Selon Trachte et Stiernon (2023, p.38), sa conductivité thermique varie de 0.037 à 0.045 W/m.K et sa chaleur spécifique s'élève à 1600 J/kg.K. Une entreprise belge propose des panneaux ayant une conductivité thermique de 0.038 W/m.K et une chaleur spécifique de 1600 J/kg.K (Isolteam, s. d.). Selon sa mise en forme, le lin peut être soit léger soit lourd. Lorsqu'il est placé en vrac dans la structure, celui-ci peut détenir une densité variant de 20 à 35 kg/m³ contrairement à sa forme de panneaux semi-rigides qui peut détenir une densité allant jusqu'à 400 kg/m³ (Trachte & Stiernon, 2023, p.38). Il détient également un pouvoir hygroscopique

impressionnant lui permettant « d’absorber 10 fois plus d’eau que d’autres isolants sans être endommagée » (Valbiom, « Les Fiches Techniques », 2020, dans Suray, 2025). Son habilité à expirer l’humidité lui évite les problèmes de moisissures (Isolteam, s. d.). En plus d’être un matériau biodégradable, il contribue à la santé des sols (Pons Ribera, 2025). Il est également 100% recyclable, réutilisable (Isolteam, s. d.), et vieillit bien (Menet, 2014).

Dans le domaine de la construction, l’isolation à base de lin peut se présenter sous 2 formes différentes, en vrac et en panneau semi-rigide. Pour l’isolant en vrac, il peut se placer en toiture, dans les planchers, la dalle de terre-plein et les murs mais nécessite d’une structure complémentaire (Trachte & Stiernon, 2023, p.223). Le panneau quant à lui peut se placer en toiture, dans les planchers mais ne peut être posé pour une dalle sur terre pleine, et dans les murs que ce soit du côté intérieur ou extérieur (Trachte & Stiernon, 2023, p.224).

3.3.2.4. *Mouton*

Les moutons vivent dans toutes les conditions climatiques possibles, c’est pourquoi l’industrie s’est tournée vers cette matière renouvelable (Woolconcept®, 2025). « La laine de mouton est le seul isolant d’origine naturelle qui protège contre la chaleur, le froid et l’humidité tout en filtrant l’air. » (Woolconcept®, 2025).

C’est la première ressource naturelle d’origine animale utilisée (Figure 26). Elle est issue de la tonte des moutons et se renouvelle continuellement tout en étant abondante (Trachte & Stiernon, 2023, p.45). Considérée comme une ressource « noble », cette matière est durable, résistante, réutilisable et disponible localement (Woolconcept®, 2025).



Figure 26 : Laine de mouton- Woolconcept® (2025)

Cette laine est classée selon 3 qualités dont chacune est reliée à une filière. Les laines de qualité moyenne, qui sont colorées voire sales, sont destinés au secteur de la construction pour servir d’isolants et à l’agriculture comme feutres maraîchers. Celle de bonne qualité, définie

comme laine blanche, sert pour les rembourrages et les matelas. Quant aux laines blanches de hautes qualités, elles sont utilisées pour la fabrication de couettes (Woolconcept®, 2025). Selon Cluster Eco-construction (2024) le volume de production de la filière laine en Wallonie en 2023 était faible et n'aurait que du bénéfice à augmenter son offre et son volume.

Pour la filière construction, la laine est traitée contre les insectes (Chevillard, 2022), les moisissures et le feu par une application au sel de bore qui représente 4% de la masse. Puis elle subit un traitement spécial anti-mites avant d'être feutrée ou cardée pour la réalisation de rouleaux, de matelas et de panneaux semi-rigides (Trachte & Stiernon, 2023, p.45). Les produits tels que les matelas et les panneaux sont composés à 25% de fibres polyester qui sont thermoliées à la laine.

La laine de mouton possède des propriétés thermique, acoustique et hygroscopique remarquables. La laine peut se passer de pare-vapeur car elle peut retenir 33% de son poids en humidité sans altérer ses propriétés isolantes (Woolconcept®, 2025). Elle possède une conductivité thermique variant de 0.039 à 0.047 W/m.K (Trachte & Stiernon, 2023, p.46). Sa chaleur spécifique est des plus importantes, faisant concurrence à la fibre de bois et à la cellulose recyclée (Trachte & Stiernon, 2023, p.79), environnant les 2000 J/kg.K (Trachte & Stiernon, 2023, p.46). Les panneaux en laine de mouton semi-rigides détiennent des temps de déphasage deux fois plus importants que les laines minérales ou les polystyrènes. Leur temps peuvent varier entre 10 et 12 heures, ce qui favorise un bon confort intérieur en période estivale (Chevillard, 2022). Pour l'étude de cas, les propriétés d'une entreprise wallonne seront utilisées. Les fiches techniques indiquent une conductivité thermique de 0.039 W/m.K pour le panneau et de 0.041 W/m.K pour la laine en vrac (Woolconcept, 2025). Selon Trachte et Stiernon (2023, p.46), la masse volumique varie selon le produit et le conditionnement entre 15 et 75 kg/m³. Quant aux produits de l'entreprise, la masse volumique de la laine en vrac varie de 9 à 12 kg/m³ tandis que leur panneau est à 25 kg/m³.

Selon Trachte et Stiernon (2023, p. 46), la laine en rouleaux est employée principalement dans les combles et la toiture. Elle peut être placée dans les murs mais nécessite de caissons ou d'un agrapage. Quant à la laine en vrac, celle-ci est employée pour l'isolation des combles, des espaces vides et peut-être utilisée dans les façades à l'aide d'une structure complémentaire (Trachte et Stiernon (2023, p. 226). Seulement, le fabricant indique que son application se fait uniquement pour les planchers, là où les panneaux sont utilisables partout

3.3.2.5. Tableau récapitulatif des données

Selon EPBD (2025)(Annexe III), la conductivité thermique d'un panneau semi-rigide en laine de mouton est de 0.039 W/m.K. Cependant, sur le logiciel TOTEM, il est référencé avec une conductivité thermique de 0.036 W/m.K. Afin de garder une cohérence entre le logiciel TOTEM et TRNSYS, la valeur de 0.036 W/m.K est conservée.

Ci-dessous un récapitulatif des données qui seront utilisées lors des compositions de parois (Tableau 15).

Tableau 15: Propriétés des isolants retenus

	Conductivité λ (W/m.K)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Densité (kg/m ³)
Herbe (panneau semi-rigide)	0,041	2232	40
Miscanthus (vrac)	0,048	1600	130
Lin (panneau semi-rigide)	0,038	1600	140
Lin matelas souple	0,038	1600	28
Laine de mouton (panneau semi-rigide)	0,036	2000	28
Laine de mouton (vrac)	0,041	2000	19

3.4. Composition des parois

Dans le cadre ce mémoire, les compositions de parois des modèles A et B existantes vont être comparées aux nouvelles parois. L'isolant traditionnel de la maison massive et l'isolant biosourcé, le plus utilisé en Wallonie, de la maison légère sont changés par les isolants biosourcés sélectionnés. Ceux-ci vont permettre de déterminer quelles sont les parois ayant les meilleures performances thermiques et quelles sont celles qui détiennent l'impact environnemental le plus faible selon le logiciel TOTEM.

Comme énoncé précédemment, cette étude se concentre uniquement sur l'enveloppe du bâtiment. Pour rappel, le modèle A détient deux compositions initiales, une massive et une légère, dont leur composition est disponible dans le Tableau 2 en section 3.1.1.

Ces compositions vont être modifiées pour intégrer les isolants biosourcés choisis en section 3.3.1. Cependant toutes les parois ne vont pas être modifiées et certains isolants ne sont pas remplacés. Afin de rendre la comparaison finale lisible et cohérente, les mêmes épaisseurs d'isolation sont conservées.

Les parois non modifiées et conservées sont les suivantes (Annexe IV) :

- Les compositions massives et légères ont le même plancher de sol. C'est pourquoi, le choix de le conserver dans les autres options est justifié.
- Les parois intérieures du modèle A comme le plancher de l'étage ou les cloisons intérieures sont utilisées pour l'entièreté des simulations. Une exception est faite pour les cloisons. Celle-ci est expliquée en section 3.5.1.4
- Concernant les toitures non-isolées dans les compositions originelles, une isolation rigide est placée sur les chevrons permettant la pose de lattes et de la couverture. N'étant pas comprise dans l'enveloppe chauffée du bâtiment, cette paroi n'est donc pas modifiée.

Les parois modifiées sont les suivantes (Annexe V) :

- Le mur extérieur de la composition massive détient un isolant rigide qui ne peut être remplacé par un autre isolant rigide, du fait que les entreprises productrices des isolants biosourcés choisis en section 3.3.1 n'en réalisent pas. Ils se limitent à des panneaux semi-rigides voire à une pose en vrac. Pour le remplacer, une ossature bois non structurelle est placée pour venir maintenir l'isolant biosourcé choisi. Le calcul d'espacement des montants est en section 3.5.1.3. Seule la composition en miscanthus, compte un OSB supplémentaire pour faire effet de coffrage lors de son installation. C'est le seul isolant biosourcé à être produit seulement en vrac (Promisc, s.d.). Pour un revêtement en crépi, un OSB est ajouté dans chaque composition biosourcée.
- Concernant le mur extérieur de la composition légère, seul un isolant sur deux est changé. Le panneau côté extérieur est conservé, permettant ainsi une meilleure comparaison d'une composition à l'autre des isolants placés entre montants. Quant au miscanthus et à la cellulose, ils conservent des OSB de part et d'autre.
- Pour les planchers des combles, tous les isolants sont remplacés. Seuls le miscanthus et la cellulose ont une plaque d'OSB appliquée de part et d'autre du plancher pour conserver cet effet de coffrage et éviter qu'il ne prenne du volume.
- Pour les isolants en toitures isolées, seuls ceux situés entre les chevrons et en finition intérieure sont changés. L'isolant posé sur chevrons est conservé pour garder une continuité avec la toiture non-isolée.

3.5. Méthode d'analyse énergétique et environnemental

3.5.1. Demande énergétique et confort

L'insertion des matériaux biosourcée pourrait améliorer l'impact environnemental des bâtiments mais qu'en est-il de leur performance énergétique et du confort de ceux-ci ? Comment les maisons passives vont-elles réagir face au changement climatique ? Avant toute chose, une définition du logiciel TRNSYS est nécessaire pour mieux comprendre son fonctionnement. La démarche de simulation est expliquée après ainsi que les méthodes d'évaluation.

3.5.1.1. TRNSYS

TRNSYS signifiant « TRaNsiant SYstem Simulation tool » est un logiciel de simulation thermique dynamique, développé à l'université du Wisconsin et sorti sur le marché public en 1975 (Karitnig, 2008), utilisé pour représenter le fonctionnement des équipements et l'évolution des performances thermiques des bâtiments. (Guide Bâtiment Durable, 2019)

Ce logiciel est validé sur la base des normes ANSI/ASHRAE Standard 140, permettant de comparer les logiciels de simulation de bâtiment basé sur une méthode standard (Karitnig, 2008). Cette norme permet également de contrôler les erreurs éventuelles et de vérifier la précision des simulations établies. Ce logiciel se distingue en 2 parties. L'environnement TRNBuild, dans lequel l'utilisateur peut composer ces parois et appliquer différents régimes qui sont compris dans l'enveloppe du bâtiment. Puis l'environnement Studio qui comprend l'environnement TRNBuild et qui permet de créer l'environnement extérieur au bâtiment, de régler différents systèmes (tels qu'un plancher chauffant ou un récupérateur de chaleur) et d'en sortir les résultats.

Le logiciel TRNSYS est choisi pour l'analyse thermique de cette étude de cas. Le modèle Sketchup 3D reçu est le modèle thermique utilisé lors de la précédente étude effectuée par Pauline Abrahams, ce qui a permis de gagner du temps quant à la modélisation. Ce modèle est basé sur les plans d'architectes présentés en section 3.1.1. Les professeurs encadrants sont spécialisés dans l'utilisation du logiciel TRNSYS. Ils ont donné accès à certaines ressources à l'auteur comme une licence du logiciel, des tutoriels et travaux pratiques qui lui ont permis de mieux comprendre le logiciel. De plus, une formation expresse lui a permis de le prendre en main, c'est pour cela que ce logiciel est choisi pour réaliser cette étude.

3.5.1.2. Méthodes d'évaluation

Dans le cadre de ce mémoire, nous voulons comparer la réaction des différentes compositions face au changement climatique. Pour cela, le logiciel nous permet d'analyser l'impact de l'environnement sur le bâtiment et d'en sortir les données nécessaires aux questions que nous nous posons. Dans notre cas, il est nécessaire d'obtenir les diverses demandes annuelles (chauffage, refroidissement, ECS) pour vérifier que le bâtiment respecte bien les critères passifs de besoin net en énergie et de surchauffe énoncés en section 2.2.2. et 2.2.3.

Pour analyser le comportement des 10 compositions face au changement climatique, deux périodes distinctes sont utilisées : la période actuelle (2021-2040) et la période de fin de siècle (2081-2100).

Chaque début de simulation commence avec une des 10 compositions dont le profil de simulation est appliqué. Suite à cela divers cas sont analysés par bâtiment. En premier lieu, l'utilisation de mesures actives (chauffage et refroidissement) permet de visualiser comment le bâtiment réagit face aux données météorologiques des deux périodes. Suite à cela, l'enlèvement des mesures actives permet de constater les effets du climat sur une maison passive n'ayant que son isolation et sa ventilation pour préserver un confort intérieur. L'ajout de mesures passives sur ces deux cas, telles que des protections solaires et du free cooling nocturne, contribue à garder un certain confort et à réduire le risque d'augmentation de la demande d'énergie en chauffage et refroidissement lorsque ceux-ci sont actifs. Ce qui amène à se demander si la seule utilisation des mesures passives permet au bâtiment de s'adapter au changement climatique sans avoir à recourir à des mesures actives. Pour pouvoir analyser la contribution des mesures passives, celles-ci sont ajoutées une à une sur le cas d'étude pour mesurer leur effet cumulé.

Chaque composition comporte 6 variations dont chacune est analysée sur les deux périodes définies précédemment. Ces résultats sont générés en fichier .txt (texte) pour être analysés sur le logiciel Excel, de la suite Office, permettant ainsi de comparer les demandes d'énergies et de surchauffe de chaque variation (Tableau 16).

Tableau 16 : Récapitulatif des 6 variations possibles

Etat système de chauffage et de refroidissement	6 variations possible					
	CR_ON			CR_OFF		
Systèmes passifs utilisés	Ø	PS	PS + FC	Ø	PS	PS + FC

* CR : Chauffage refroidissement

* PS : Protection solaire

* FC : Freecooling

Les besoins d'énergie en chauffage et refroidissement sont exprimés en kilojoule par heure (kJ/h) dans TRNSYS. Pour les convertir et obtenir des kWh/m².an, le total de chaque demande est divisé par 3600 puis est divisé par le nombre de mètre carré de plancher qui consomme. Le chauffage est appliqué sur les 144.24 m² de plancher quant au refroidissement, il compte seulement 105 m² car il est placé seulement dans le salon, la cuisine et les chambres. Il y a donc deux systèmes actifs distincts dont l'un est pour le chauffage et l'autre pour le refroidissement.

Par la même occasion, il est possible de déterminer l'efficacité de chaque mesure passive en partant de la variation sans mesures passives, et en faisant le calcul suivant qui utilise la surchauffe de chaque variation :

$$1 - \frac{\text{surchauffe CR_ON_PS}}{\text{surchauffe CR_ON}} = \text{efficacité des PS (\%)}$$

$$1 - \frac{\text{surchauffe CR_ON_PS_FC}}{\text{surchauffe CR_ON}} - \text{efficacité PS} = \text{efficacité free cooling (\%)}$$

3.5.1.3. Les méthodes d'encodage - Paroi composée

Afin de pouvoir encoder toutes les compositions de parois dans l'environnement TRNBuild, il faut pouvoir rentrer toutes les couches de matériaux. Cependant, le logiciel ne permet pas de réaliser des couches composés tels qu'une ossature bois remplie d'isolant. Le logiciel a besoin de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de la densité du matériau pour pouvoir simuler correctement. C'est pourquoi nous avons besoin de définir les caractéristiques de chaque matériau et l'épaisseur de la couche pour pouvoir effectuer les calculs.

Concernant le bois, les forêts wallonnes couvrent 42% du territoire dont les principales essences sont le chêne, l'hêtre et le sapin (Spw environnement, s. d.). Pour l'intégralité des parois composées, un bois résineux est utilisé car il est principalement employé en ossature, en charpente et en extérieur contrairement aux feuillus qui servent couramment à la réalisation de l'aménagement intérieur tel que les meubles (Spw environnement, s. d.). Selon Spw environnement (2023), l'épicéa représentait 35% des forêts publiques et 46% des forêts privées Wallones (Figure 27).

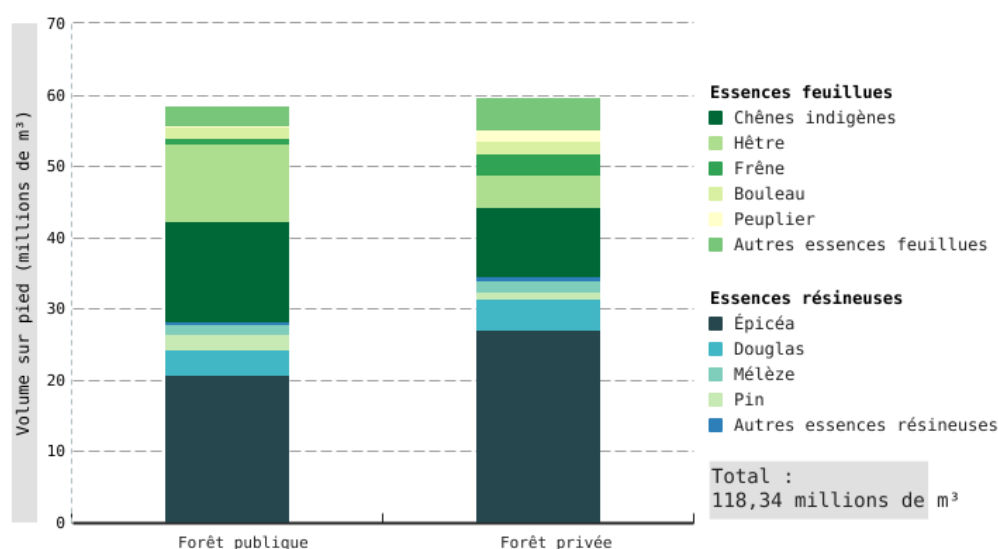


Figure 27 : Volume de bois sur pied en Wallonie (2011-2018) - Prélèvements de bois - État de l'environnement wallon (2023)

L'épicéa est donc choisi pour réaliser l'ossature. Selon CIRAD (2012), il détient une densité faible inférieure à 500 kg/m³. Les propriétés d'un résineux légers seront donc utilisées dans les calculs (Tableau 17).

Tableau 17 : Propriétés des différents types de bois - DESCRIPTIF BOIS MASSIF V2 (s.d. , p.1)

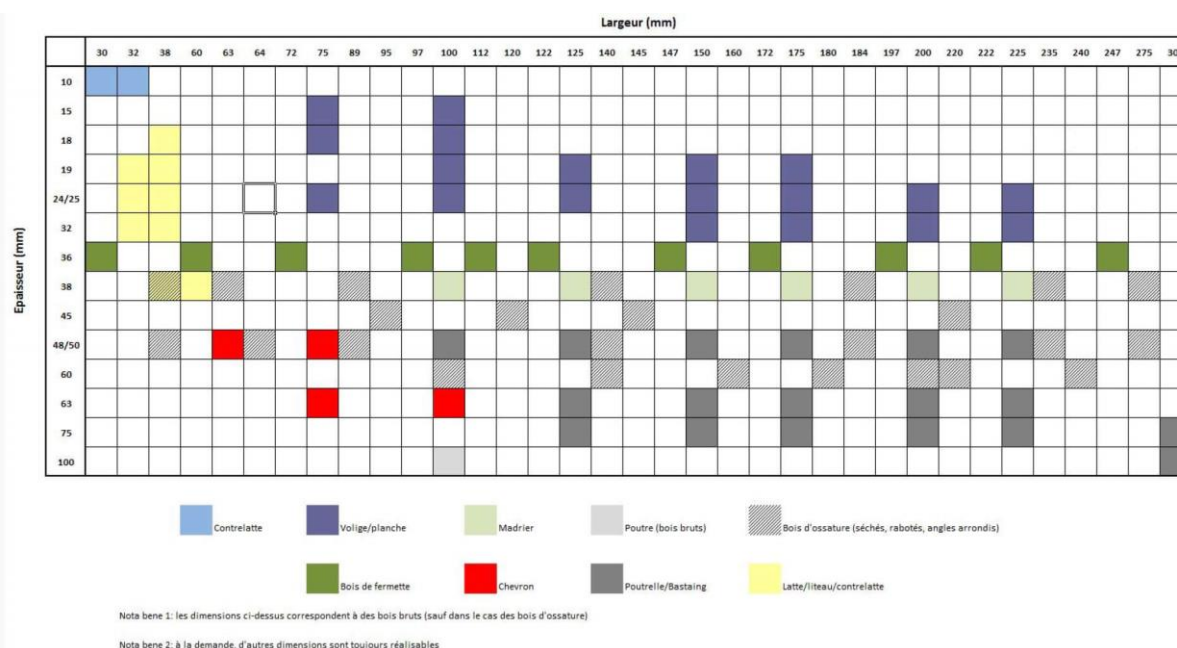
ESSENCES	ρ_n kg/m ³	λ (W/m.°K)	C_p (J/Kg.°K)	μ	
				humide	sec
FEUILLUS TRÈS LOURDS	> 1000	0,29	1600	50	200
FEUILLUS LOURDS	> 865 ≤ 1000	0,23	1600	50	200
FEUILLUS MI-LOURDS	> 650 ≤ 865	0,18	1600	50	200
FEUILLUS LÉGERS	> 500 ≤ 650	0,15	1600	50	200
FEUILLUS TRÈS LÉGERS	> 230 ≤ 500	0,13	1600	20	50
BALSA	≤ 230	0,057	1600	20	50
RÉSINEUX TRÈS LOURDS	> 700	0,23	1600	20	50
RÉSINEUX LOURDS	> 600 ≤ 700	0,18	1600	20	50
RÉSINEUX MI-LOURDS	> 500 ≤ 600	0,15	1600	20	50
RÉSINEUX LÉGERS	≤ 500	0,13	1600	20	50

Pourcentage de présence dans une couche composée

Une fois que les caractéristiques du bois sont déterminées à l'instar des isolants biosourcés en section 3.3.2, il faut déterminer le pourcentage de présence des matériaux pour chaque couche calculée. Pour les ossatures existantes, les mêmes pourcentages que ceux du rapport PEB, établis par le cabinet d'architecture, sont utilisés (Annexe VI). Seule la nouvelle ossature permettant de maintenir les isolants biosourcés dans la composition murale en construction massive est calculée.

L'utilisation d'une double ossature, dont les montants sont décalés, sur une épaisseur de 30 cm permet de limiter les déperditions thermiques (ABT Construction Bois, 2024). Il est choisi d'utiliser des standards de construction car des dimensions sur-mesure coûteraient cher. Il est préférable d'utiliser les dimensions des bois d'ossature, c'est pourquoi le choix se porte sur des montants de 100 et 200 mm de largeur pour une épaisseur de 60 mm (Tableau 18).

Tableau 18 : Dimensions des bois - Hout Info Bois



Les panneaux d'isolants ont pour dimensions générales 600 mm de largeur (Gramitherm, 2025; Woolconcept, 2025; STEICO, s. d..). Outre les isolants en vrac, les isolants semi-rigides ont besoin de conserver une majoration de 2 cm pour assurer l'effet ressort entre les montants, ce qui permet le maintien des panneaux (Woolconcept, 2025). Pour cela les montants ont un entraxe de 640 mm, ce qui laisse un espacement de 580 mm entre la structure. Dans ces murs massifs, il y aura donc 91 % d'isolants biosourcés pour 9% d'ossature bois. Ci-dessous, un tableau récapitulatif des pourcentages de présence de bois et d'isolant pour les couches composées de chaque paroi (Tableau 19).

Tableau 19 : Récapitulatif des pourcentages de présence de bois et d'isolant pour les couches composées de chaque paroi

	Mur massif	Mur léger	Plancher	Toiture
Bois	9	15	11	20
Isolant	91	85	89	80

Calcul des propriétés d'une couche composée

Conductivité thermique

Pour calculer la conductivité thermique effective d'une paroi composée de matériaux hétérogènes, il faut utiliser la formule de la résistance thermique :

$R = e / \lambda$, où e représente l'épaisseur de la paroi, en mètre (m), et λ la conductivité thermique, exprimée en Watt par mètre Kelvin (W/m.K) (Trachte & Stiennon, 2023, p.75). Celle-ci va prendre en compte la part de chaque matériau dans la paroi, ce qui permettra d'obtenir la résistance thermique équivalente :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{f_{bois}}{R_{bois}} + \frac{f_{iso}}{R_{iso}}$$

Puis, pour obtenir la conductivité thermique effective, l'épaisseur de la couche est divisée par cette résistance équivalente. La valeur obtenue est convertie en kJ/kg.K pour être encodée dans TRNBuild.

Densité moyenne

Une moyenne pondérée est effectuée pour trouver celui de la couche composée. Celle-ci est exprimée en kg/m³. Elle se base sur les densités de chaque matériau et de leur pourcentage de présence dans la couche :

$$\rho_{eff} = f_{bois} \times \rho_{bois} + f_{isolant} \times \rho_{isolant}$$

Capacité thermique massique ou chaleur spécifique

Le calcul de la capacité thermique volumique, exprimé en J/m³.K (Trachte & Stiennon, 2023, p.79), va servir à déterminer celui de la capacité thermique effective :

$$\rho \cdot c = \rho \cdot \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot c \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

Multipliée par le pourcentage de présence de chaque matériau et divisée par le produit de la densité totale et du pourcentage totale, permet d'obtenir le calcul de la chaleur spécifique pour une couche composée, dont celle-ci est exprimée en J/kg.K :

$$c_{eff} = \frac{c_{bois} \times f_{bois} \times \rho_{bois} + c_{isolant} \times f_{isolant} \times \rho_{isolant}}{\rho_{eff}}$$

Afin de vérifier la cohérence de ces calculs, les transmissions thermiques, noté U et exprimées en W/m².K (Trachte & Stiennon, 2023, p.75), de chaque paroi encodées sur TRNSYS seront comparées à celles encodées sur le logiciel TOTEM dans la section résultats.

3.5.1.4. Les méthodes d'encodage - Subtilités

Encodage des compositions

Les parois établies précédemment en section 3.4, rentrées dans TOTEM, ne peuvent être reproduites à l'identique dans TRNSYS. En effet, certaines restrictions, comme la différence majeure d'épaisseur entre 2 types de parois, peut créer des instabilités dans le calcul de transferts thermiques. C'est le cas pour l'ensemble des compositions légères dont les murs sont très épais contrairement aux murs intérieurs non porteurs. Le problème provient de l'échelle de temps appelée "Time Base". L'échelle de temps étant réglée à 1 habituellement, ne permet pas de calculer les transferts thermiques de deux parois ayant une grosse différence d'épaisseur. Pour résoudre cela, les murs intérieurs sont épaissis (Annexe VII) et l'échelle de temps est passée à 2 pour laisser plus de temps au logiciel d'effectuer le calcul (*Multizone Building Modeling With Type56 And TRNBuild - Volume 5*, s. d., p.22).

La composition légère en miscanthus pose également problème, étant constituée principalement d'isolant en vrac, celle-ci requiert l'ajout de panneaux OSB, voir partie 3.4. Couplée au problème précédent, le passage à un time base de 4 est donc nécessaire.

Encodage du free cooling

Le free cooling est géré dans l'environnement Studio, en dehors de TRNBuild. Une formule est appliquée à chaque zone où cette mesure s'active pour pouvoir la contrôler et éviter qu'elle soit active en même temps que le chauffage ou le refroidissement.

Initialement, seule une formule comprenant la période d'activation, la zone visée et une contrainte quant à la différence de 2°C entre la température extérieure et intérieure était utilisée. Cependant, celle-ci a engendré une succession d'erreur, sur la plupart des simulations, en lien avec la température de la zone visée et de la température limite d'activation. Il a donc été choisi d'utiliser un hystérésis qui utilise une « dead band » assurant une stabilité à la simulation en permettant d'éviter les oscillations on/off fréquentes, des cycles trop rapides, qui conduiraient à une convergence et à des erreurs de simulations. L'hystérésis est trouvé dans les contrôleurs tels que les thermostats, il désigne le comportement où l'état de sortie d'un système (on/off) dépend de la condition actuelle mais aussi de l'état précédent (Trnsys, 2009b, p.16).

Une formule est définie pour chaque zone comprenant les contraintes suivantes:

- la plage horaire d'activation du free cooling (de 20h à 8h)
- le type 165b hystérésis (0 ou 1) comprenant les différentes contraintes hautes et basses
- la période d'activation (de juillet à août)
- la température d'arrêt du système (arrêt si la température de la pièce atteint 24°C)
- le free cooling s'active uniquement si la température extérieure est inférieure à la température intérieure

Exemple de formule pour la zone 1 :

$\text{or}(\text{gt}(\text{HourOfDay}, 20), \text{lt}(\text{HourOfDay}, 8)) * \text{ctrlFC1_hyst} * \text{and}(\text{gt}(\text{MoY}, 6), \text{lt}(\text{MoY}, 9)) * \text{le}(\text{Tzone1}, 24) * \text{lt}(\text{Tdry}, \text{Tzone1})$

Pour l'hystérésis, j'ai appliqué une température de 24°C à laquelle le free cooling se déclenche, une température basse de 20°C pour éviter le chevauchement avec le chauffage ainsi que la température limite à ne pas atteindre qui est de 25°C (Figure 28). La différence entre la température haute T_h et la température basse T_l est comparé aux valeurs de la « upper dead band » et la « lower dead band ». Si le contrôleur est désactivé et que la différence entre T_h et T_l est supérieure à celle de la « upper dead band » alors le contrôleur s'active sinon il reste désactivé. Si le contrôleur est actif et que cette même différence est supérieure à la « lower dead band » alors il reste actif. Par contre, si le contrôleur est désactivé, la différence entre les deux températures doit être supérieure à la « upper dead band » pour qu'il soit actif, sinon il reste désactivé (TRNSYS (Version18), 2017).

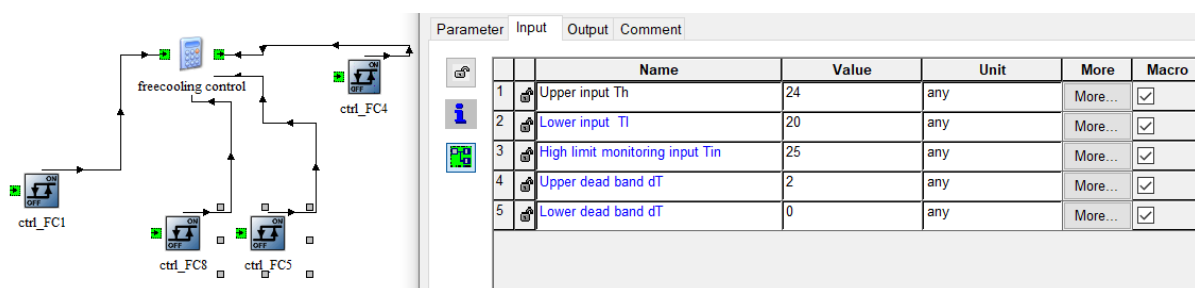


Figure 28 : Encodage du free cooling

3.5.2. *Énergie nécessaire pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et le refroidissement*

Pour calculer la consommation d'eau chaude sanitaire, le site Energie + met à disposition un excel comportant diverses évaluations et diverses consommations selon le bâtiment et le nombre d'occupants.

La consommation d'eau chaude sanitaire journalière par personne est en moyenne de 35 L, à 60°C, dans une maison familiale (*Consommation D'eau Chaude Sanitaire*, 2007). Ce qui demande un total de 140L. Le site Energie Plus met à disposition une liste de « PAC combinées » éligibles en Wallonie. Par gain de temps, cette dernière a été intégrée dans Chat GPT afin d'obtenir les 5 résultats qui correspondent le mieux aux critères. Chaque fiche technique a été analysée manuellement sur les sites de référence pour choisir la PAC la plus adéquate. Ainsi, une PAC air-eau avec un ballon de 190 L est donc choisie afin de prévoir le cas de surconsommation (Annexe VIII). Elle permet de produire du chauffage en plus de l'eau chaude sanitaire. Pour choisir la puissance nécessaire, la somme de la demande d'énergie de chauffage du bâtiment, dans sa composition optimale (mesures actives, chauffage et refroidissement, et mesures passives activées) et de la demande d'énergie d'eau chaude sanitaire est requise. Les pertes thermiques ne sont pas prises en compte dans ce calcul. L'objectif de ce mémoire n'est pas de savoir quelle pompe à chaleur serait la plus optimisée pour les différents cas, donc le choix s'est porté sur une PAC avec une puissance nominale de 9 kW pour une température de 35°C et 8 kW pour une température à 55 °C. Sachant que le bâtiment a une consommation énergétique relativement faible, cela devrait suffire.

Pour la demande d'énergie de chauffage, il faut traiter les données sortant de TRNSYS sur Excel pour les obtenir. Pour une composition, le besoin de chauffage annuel se calcule comme suit :

Demande d'énergie de chauffage (en kWh/m².an) * 144,24 (surface de plancher chauffée)

Pour calculer la quantité d'énergie nécessaire pour l'eau chaude sanitaire, Energie Plus Le Site (s. d.) utilise la formule suivante :

$$E = V_{60} * C * \Delta t$$

Avec :

- V : le volume d'eau annuel, exprimé en m^3/an à 60°C
- C : la chaleur spécifique de l'eau, exprimée en $\text{kWh}/\text{m}^3.\text{K}$ (Unipso, s. d.)
- Δt : la différence entre la température de l'eau chaude et la température de l'eau froide à l'arrivée, exprimée en Kelvin.

La pompe à chaleur choisie chauffe l'eau à 55°C . Pour convertir la quantité d'eau de 60°C à 55°C la formule suivante est utilisée :

$$V_{55} = V_{60} * (60-10) / (55-10)$$

Avec :

- une température d'arrivée d'eau estimée à 10°C .
- V_{55} : Quantité d'eau en m^3/an à 55°C
- V_{60} : Quantité d'eau en m^3/an à 60°C

Cela permet d'obtenir la quantité d'énergie nécessaire pour fournir ce volume annuel :

$$E \text{ (kWh/an)} = V_{55} * 1.163 * (55 - 10)$$

Il est choisi d'utiliser un plancher chauffant comme système de chauffage. Cependant celui-ci requiert une température de 35°C pour le fluide sortant de la PAC contrairement à l'eau chaude sanitaire qui a besoin d'une température à 55°C pour éviter le développement de bactéries tels que la légionella pneumophila qui engendre des maladies pulmonaires (Energie Plus Le Site, 2007). La pompe choisie est capable de produire ces deux températures mais pas en même temps. Pour cela, elle donne priorité à l'ECS avant de s'occuper du chauffage. Pour obtenir la quantité d'énergie consommée par la PAC sur un an, il faut diviser la demande d'énergie de chauffage et d'eau chaude sanitaire par leur coefficient de performance saisonnier (SCOP) respectif, soit 4.53 pour le chauffage et 3.33 pour l'eau chaude sanitaire. Afin que cette valeur puisse être rentrée dans le logiciel TOTEM, un facteur de 3.6 permet la conversion en mégajoules (MJ). Cette opération est à effectuer avec la demande d'énergie de chauffage des 10 compositions.

Pour le refroidissement, il est choisi d'utiliser un système multisplit comprenant une PAC air-air en extérieur et plusieurs unités intérieures soit 5 pièces en période estivale (Annexe IX).

Selon une entreprise spécialiste en climatisation, la puissance moyenne pour climatiser un bâtiment à basse consommation énergétique est d'environ 25 à 30 W par m³ (Grau, 2025).

Ils estiment la puissance du système de refroidissement selon le calcul suivant :

Nombre de m³ * puissance moyenne

Ce qui donne :

$$295.34 * 30 = 8860.32 \text{ W soit } 8.86 \text{ kW}$$

La PAC air-air doit avoir une puissance de 8.86 kW pour bien fonctionner dans l'ensemble du bâtiment. Le système choisi détient une puissance nominale de 9kW et un coefficient d'efficacité énergétique saisonnier (SEER) s'élevant à 8.5, utilisé uniquement pour le refroidissement, qui va permettre de déterminer la quantité d'énergie électrique consommée par la PAC. Par la suite, les mêmes opérations utilisées pour le chauffage sont appliquées pour rentrer ces valeurs dans TOTEM.

3.5.3. Impact environnemental

Plusieurs questions se posent quant à ces parois biosourcées, composées précédemment. Améliorent-elles l'impact environnemental du bâtiment ? Quels sont les impacts sur les matériaux et sur l'énergie de celui-ci ?

Pour cela le logiciel TOTEM, définit ci-après, aide à répondre à ces questions. Puis la méthodologie appliquée dans le logiciel est décrite.

3.5.3.1. TOTEM

Dans le but d'aider le secteur de la construction belge à objectiver et diminuer l'impact environnemental des bâtiments, les trois régions (Flandres, Bruxelles-centre et Wallonie) ont développé une méthode d'analyse du cycle de vie (ACV) du bâtiment appelée « Profil environnemental des bâtiments (MMG) ». Celle-ci repose sur des « données environnementales et des scénarios de cycle de vie pour les produits de construction » reflétant le secteur belge du bâtiment. (Lam et al., 2021, dans Mouton et al., 2024). Elle prend en compte le cycle de vie globale allant de la production des matériaux jusqu'à l'élimination des déchets, sur une durée de 60 ans. (CSTC-Contact, 2018)

L’outil en ligne TOTEM (Tool To Optimize The Total Environmental Impact of Materials) provient de cette méthode qui a été informatisée en 2018. (OVAM et al., 2022, dans Mouton et al., 2024 ; Trachte, S., & Stiernon, D., 2023, p.151 ; *CSTC-Contact*, 2018). C’est un outil d’évaluation des impacts environnementaux des matériaux de constructions basé sur les normes et directives européennes EN 15804-A2 et EN 15978. (Trachte & Stiernon, 2023, p.151; *CEN2019 EN15804+A2 : Sustainability Of Construction Works - Environmental Product Declarations - Core Rules For The Product Category Of Construction Products.*, s. d.; *CEN2011 EN15978 sustainability of construction works—assessment of environmental performance of buildings—calculation method**, s. d., dans Mouton et al., 2024)

Il permet d’évaluer différentes typologies de bâtiments tels que des logements, des bureaux, des écoles, etc. (*CSTC-Contact*, 2018). Pour cela, TOTEM reprend dans la norme EN 15804-A2 les 12 indicateurs environnementaux inscrits (*Guide Bâtiment Durable*, 2022) :

1. Changement climatique (CC)
2. Épuisement des ressources abiotiques (ADP)
3. Épuisement des ressources renouvelables
4. Formation d'ozone photochimique
5. Toxicité pour les écosystèmes (éco-toxicité)
6. Acidification des sols et des eaux
7. Eutrophisation (eutrophisation terrestre et aquatique)
8. Émissions de particules
9. Formation de smog
10. Déplétion de la couche d'ozone
11. Consommation d'eau
12. Impact sur la santé humaine

Ces indicateurs d’impacts ont chacun leur résultat, ce qui permet d’obtenir des résultats précis du bâtiment analysé. L’addition des scores des 12 indicateurs multipliés par un facteur d’agrégation spécifique nous permet d’obtenir l’impact environnemental global d’un élément ou d’un bâtiment, appelé « score environnemental agrégé », exprimé en Milli points par unité fonctionnelle (mPt/FU) depuis 2021 (*Guide Bâtiment Durable*, 2022). Celui-ci provient de la méthode de pondération « Product Environmental Footprint (PEF) » qui suit les développements européens en matière d’ACV (Trachte & Stiernon, 2023, p.152). TOTEM

donne d'autres indications comme la durée de vie de chaque composant, le potentiel de réversibilité des connexions, la circularité et l'ACV de chaque matériau. (Guide Bâtiment Durable, 2022).

Cet outil va nous permettre d'obtenir le score agrégé pour comparer l'impact global de chaque bâtiment, dont chacun se compose d'une des différentes compositions de parois établies pour cette étude de cas. Il permettra également l'obtention de l'impact des matériaux et énergétique de chaque composition après l'insertion des besoins énergétiques de chaque composition provenant de TRNSYS.

3.5.3.2. Application dans le logiciel

Premièrement, les paramètres généraux sont encodés comme la surface de plancher utile, le volume chauffé, le nombre d'étages et d'occupants. Puis les 10 maisons sont encodées dont les 2 cas de référence en composition massive et légère. Celles-ci reprennent les compositions initiales énoncées en partie 3.2.1 et les compositions biosourcées en partie 3.4. Afin d'obtenir les proportions réelles des différentes parois, les surfaces de chaque paroi sont reprises du rapport PEB reçu et vérifiées sur le modèle Sketchup. Elles sont ensuite appliquées à chaque élément (Tableau 20).

Tableau 20 : Surface totale des parois

	Plancher sol	Plancher combles	Mur extérieur - bardage	Mur extérieur - enduit	Toiture isolée	Toiture non isolée
Surface en m ²	60,02	44,08	15,22	137,68	32,23	63,17

Lors de l'insertion des différentes parois, quelques subtilités peuvent se présenter, notamment lorsqu'un matériau n'est pas dans la base de données de TOTEM. Ce qui est le cas de l'isolant rigide en toiture et de l'isolant semi-rigide du plancher des combles dans la composition légère initiale. Pour les remplacer, la fiche technique de ce matériau est recherchée sur internet, puis un matériau ayant une composition et des propriétés similaires est choisi. De plus, il est possible de modifier certaines propriétés de matériaux étant déjà dans la base de données, ce qui permet de se rapprocher au maximum des caractéristiques voulues.

Puis les données de la demande d'énergie de chauffage, de refroidissement et de l'eau chaude sanitaire provenant de la configuration optimale (ON_PS_FC, expliquée partie 3.5.2.2) de chaque compositions des résultats TRNSYS sont insérées dans chaque cas.

Les résultats sortis vont permettre de comparer les différents bâtiments sur leur impact total donc via le score environnemental agrégé, exprimé en millipoint par mètre carré de surface de plancher utile (mPt/m²SPU). Mais également de confronter l'impact des différentes parois entre elles, exprimé en (mPt/FU), et de leur taux de contribution à l'impact total du bâtiment. Quant à l'impact environnemental, seule l'étape du cycle de vie ayant la plus grande différence entre chaque composition sera analysée.

3.6. Résumé méthodologie

Les plans et la volumétrie du modèle A ont été donnés par Pauline Abrahams, ce qui a permis de l'intégrer directement dans l'environnement TRNBuild faisant partie du logiciel TRNSYS. Ce logiciel est expliqué en section 3.5.1.1

Nous allons étudier l'impact qu'ont les isolants biosourcés sur le comportement thermique de l'enveloppe des maisons passives sur le climat actuel et futur.

Pour cela, la composition massive du modèle A et légère du modèle B sont conservées pour permettre la comparaison avec les compositions en isolants biosourcés. Après avoir choisi les 4 isolants biosourcés en section 3.3.1, ceux-ci sont appliqués sur la composition massive et légère. Ce qui nous donne un nombre total de 10 compositions appliquées sur le modèle A. Ces compositions détiennent 6 variantes chacune. D'une part, il y a les variantes qui tiennent compte du chauffage et du refroidissement et de l'autre celles qui correspondent à notre cas de référence (maison de Tontelange) qui n'ont aucun systèmes actifs. Parmi ces deux cas, les variantes prennent en compte ou non les protections solaires et le free cooling. Il y a donc en tout 60 variantes qui sortent en fichier .TXT. Ce qui amène ensuite à l'environnement Studio de Trnsys qui permet de rentrer les différentes hypothèses posées en section 3.1.1 et les fichiers météorologiques choisis en section 3.2. Une fois que toutes les variables sont insérées, un total de 120 fichiers .TXT (60 par période) sont sortis. Les indicateurs, définis au préalable, permettent de relever les résultats de l'impact de l'environnement externe (température, vent, radiation, ...) et des hypothèses posées sur les 10 compositions. Ces fichiers sont traités via Excel, pour comparer les diverses variantes et compositions.

En parallèle, les 10 compositions sont encodées dans le logiciel TOTEM, présenté en section 3.4, pour comparer l'impact environnemental de chaque composition en fonction des indicateurs choisis. Les résultats des variantes, comprenant le chauffage et le refroidissement,

traités dans Excel permettront de déduire les quantités d'énergie nécessaires pour empêcher la surchauffe dans chaque bâtiment. Ces quantités seront converties pour intégrer le calcul dans TOTEM, ce qui permettra d'analyser chaque composition par rapport à leur matériau et à l'énergie qu'ils consomment (Figure 29).

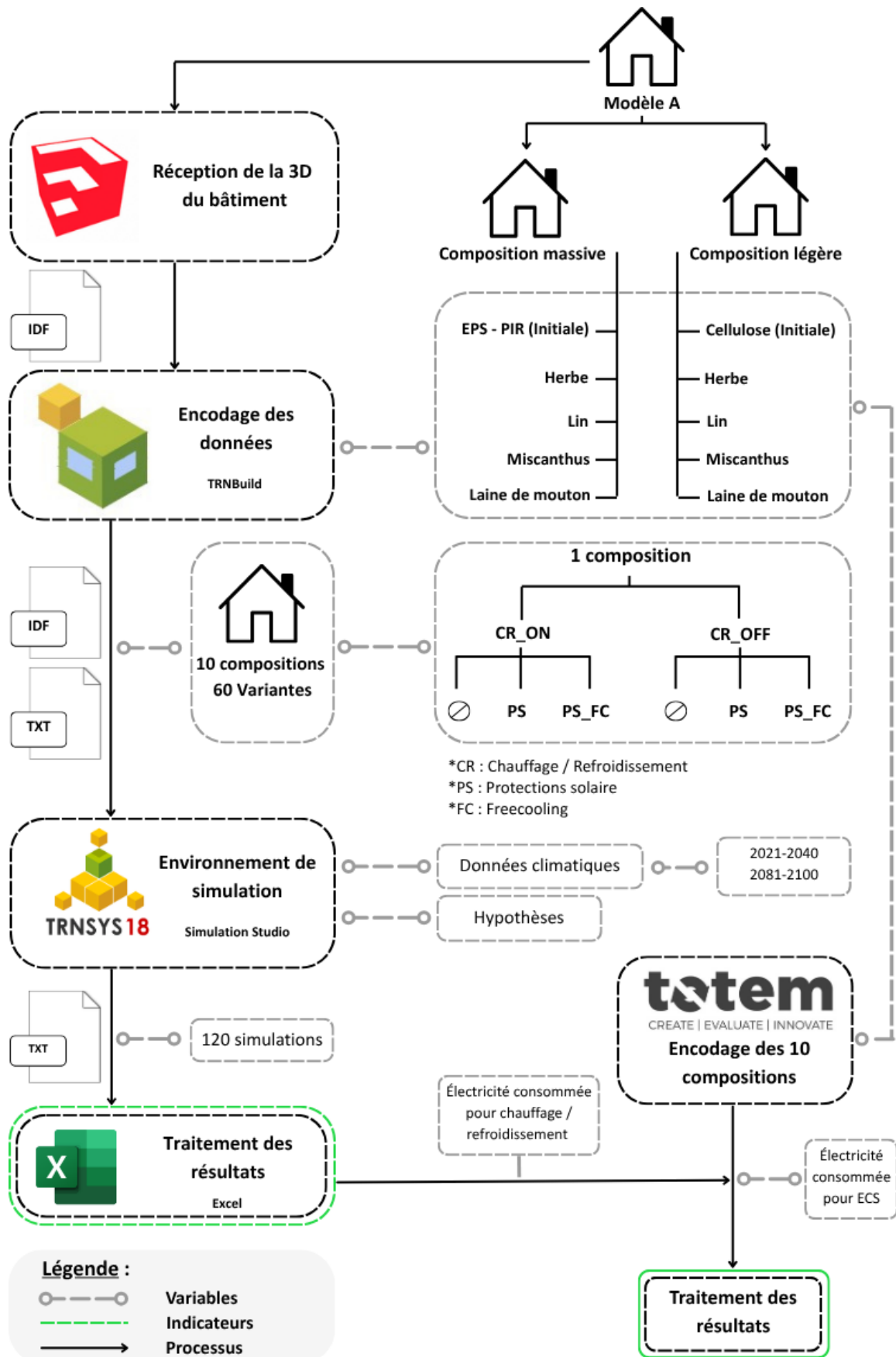


Figure 29 : Illustration de la méthodologie de l'étude

4. Résultats et discussions

4.1. Comparaison TRNSYS - TOTEM

Les parois initiales sont reproduites sur les logiciels TRNSYS et TOTEM et comparées aux valeurs des documents existants. Une différenciation entre les rapports initiaux et entre les valeurs est constatée (Tableau 21). Celle-ci s'explique par l'utilisation de logiciels différents, et d'un encodage datant de 10 ans. Les propriétés des matériaux ont donc pu évoluer depuis cette période et de nouvelles fiches techniques ont pu remplacer les anciennes.

Tableau 21 : Valeurs des rapports initiaux et valeurs obtenus lors de l'étude

	Valeurs U des parois			
	Rapport Vallenergie	Rapport PEB	TOTEM	TRNSYS
Maison A				
Paroi extérieure	0,107	0,1	0,1	0,107
Dalle de sol	0,12	0,11	0,11	0,109
Toiture inclinée isolée	0,107	0,13	0,12	0,125
Toiture inclinée non isolée	0,23	---	0,22	0,21
Plancher isolé	0,104	0,09	0,12	0,121
Maison B				
Paroi extérieure	0,113	0,11	0,12	0,109
Dalle de sol	0,12	0,11	0,11	0,109
Toiture inclinée isolée	0,134	0,18	0,11	0,111
Toiture inclinée non isolée	0,437	---	0,41	0,42
Plancher isolé	0,119	0,08	0,11	0,111

Une comparaison est également faite entre la valeur de transmission thermique U de chaque paroi sur TOTEM et TRNSYS. Il est constaté une erreur de plus ou moins 0.01 W/m².K en utilisant les formules en section 3.5.1.3 pour les parois composées (Tableau 22). TOTEM n'a pas la même précision que TRNSYS sur cette valeur. Celle-ci est calculée au centième contrairement à TRNSYS où elle est calculée au millième. Malgré cela, les résultats permettent de valider la cohérence des formules. Si les compositions étaient comparées seulement entre les isolants sans prendre en compte leur faisabilité, c'est-à-dire sans montants en bois pour les maintenir, alors les murs en isolants biosourcés des constructions massives verraient leur transmission thermique diminuer.

Tableau 22 : Valeurs de la transmission thermique des différentes parois sur TRNSYS et TOTEM

	Valeurs U des parois (TRNSYS)				Valeurs U des parois (TOTEM)			
	HERBE	LIN	MISCANTHUS	MOUTON	HERBE	LIN	MISCANTHUS	MOUTON
Maison A								
Paroi extérieure	0,152	0,143	0,17	0,138	0,15	0,14	0,16	0,14
Dalle de sol	0,109	0,109	0,109	0,109	0,11	0,11	0,11	0,11
Toiture inclinée isolée	0,139	0,137	0,138	0,136	0,14	0,14	0,14	0,14
Toiture inclinée non isolée	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22
Plancher isolé	0,19	0,18	0,209	0,173	0,18	0,17	0,2	0,17
Maison B								
Paroi extérieure	0,113	0,109	0,12	0,106	0,12	0,11	0,13	0,11
Dalle de sol	0,109	0,11	0,109	0,109	0,11	0,11	0,11	0,11
Toiture inclinée isolée	0,114	0,114	0,12	0,111	0,12	0,11	0,12	0,11
Toiture inclinée non isolée	0,42	0,42	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43	0,43
Plancher isolé	0,116	0,11	0,127	0,109	0,11	0,11	0,12	0,11

4.2. Performance énergétique et confort

4.2.1. Surchauffe intérieure

Les compositions massives affichent une surchauffe moins élevée que les légères en raison de l'inertie du bâtiment, lui permettant de stocker la chaleur en journée pour la relâcher la nuit lorsqu'il fait plus frais. Il est constaté lors de la période 2021-2040 que certains bâtiments continuent à respecter le critère de surchauffe belge étant de 5% (Figure 30). C'est le cas des compositions massives équipées de chauffage et de refroidissement qui intègrent les deux mesures passives que sont les protections solaires et le refroidissement. Les autres cas massifs et légers, équipées des systèmes actifs et de protections solaires respectent le critère international s'élevant à 10% de surchauffe. La seule composition légère à respecter le critère belge est la composition en miscanthus avec une surchauffe de 4.99% (Figure 31). Les compositions biosourcées massives reprenant la définition du passif appliquée sur le cas d'étude, c'est-à-dire sans systèmes actifs, ont moins de 10% de surchauffe. Elles conservent donc leur label passif du point de vue international mais pas du point de vue belge, et ce, seulement sur la période 2021-2040.

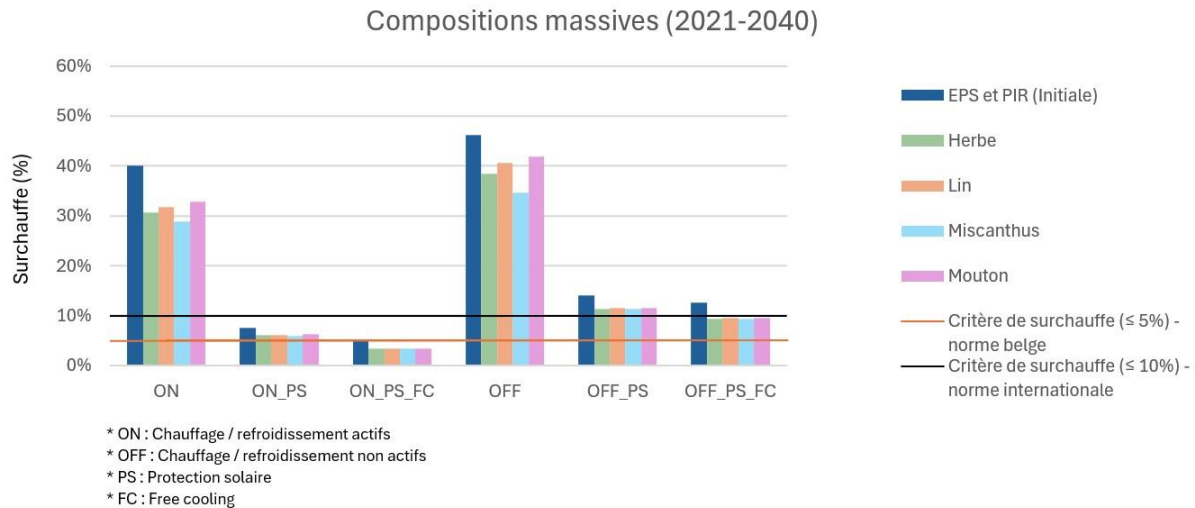


Figure 30 : Pourcentages de surchauffe avec des compositions massives selon la période 2021-2040

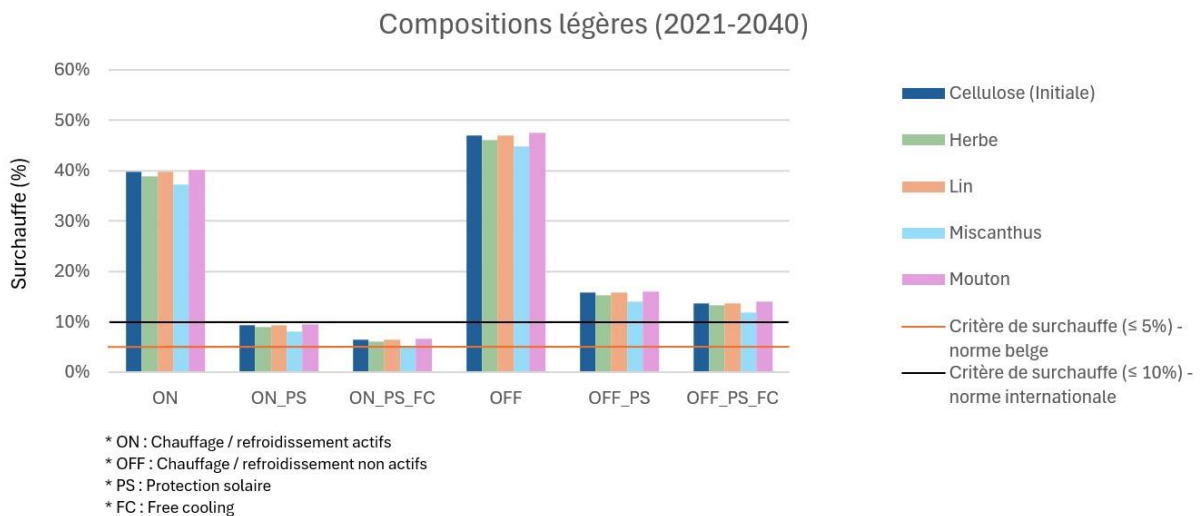


Figure 31 : Pourcentages de surchauffe avec des compositions légères selon la période 2021-2040

Sur la période 2081-2100, aucune composition qu'elle soit légère ou massive ne respecte les critères de surchauffe actuels belge et internationale (Figure 32 et Figure 33). Les compositions massives ont tout de même une surchauffe moins élevée que les légères. Il convient de noter que les compositions ayant le moins de surchauffe sur l'ensemble des deux périodes sont le miscanthus et l'herbe. Les propriétés thermiques des isolants sont responsables de ces résultats, notamment la conductivité thermique. Plus elle est élevée, plus la chaleur traverse rapidement le matériau et plus la surchauffe interne diminue. Il faudrait par conséquent utiliser des isolants avec une conductivité thermique plus élevée comme le miscanthus pour limiter le nombre d'heures de surchauffe. Il serait également intéressant de reprendre ces différentes compositions et de réduire l'épaisseur de certaines parois. Selon Amaripadath et al. (2024), une isolation des toits, des cloisons intérieures et la réduction des gains internes est

nécessaire pour réduire la surchauffe. Cependant, ils rapportent que sur leur cas d'étude, l'isolation du plancher sur sol et l'augmentation de l'isolation des murs externes auraient un effet négligeable voire néfastes sur la surchauffe intérieure du bâtiment. Ce serait donc des solutions à tester sur ce bâtiment.

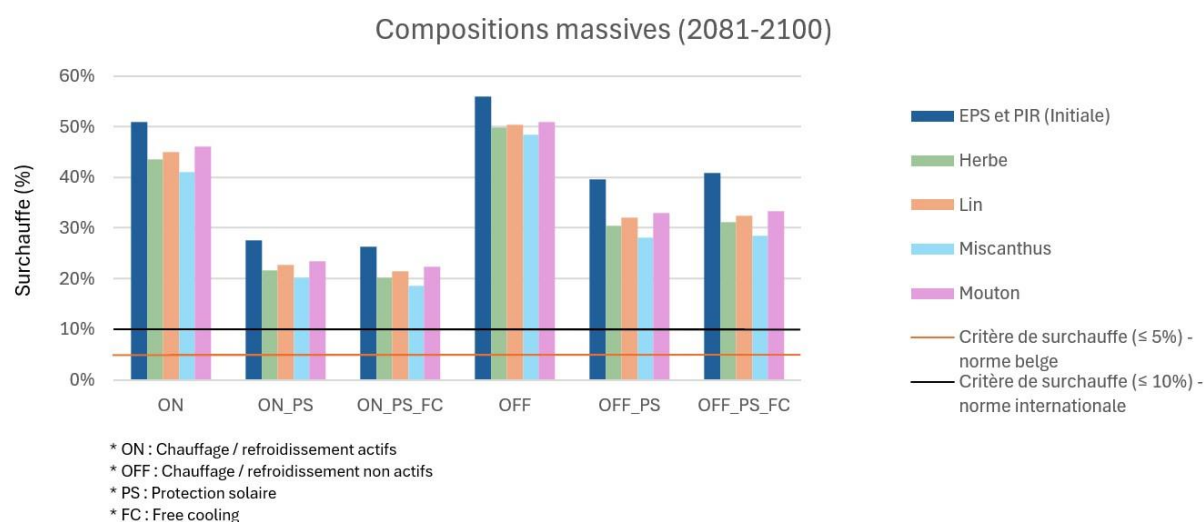


Figure 32 : Pourcentages de surchauffe avec des compositions massives selon la période 2081 - 2100

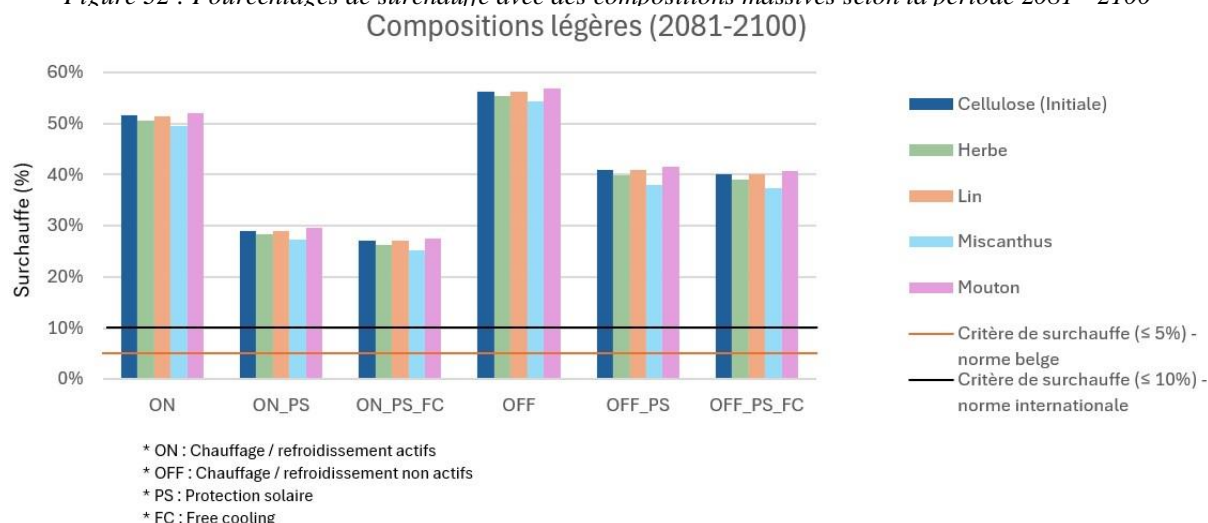


Figure 33 : Pourcentages de surchauffe avec des compositions légères selon la période 2081 - 2100

D'une période à l'autre, la surchauffe augmente drastiquement selon les cas (Annexe X). En effet, elle augmente en moyenne de 138,6 % pour les compositions massives équipées uniquement des mesures actives, et jusqu'à 592,6 % pour celles équipées des mesures actives et passives sur la période 2021-2040 (Tableau 23). Celles-ci ont une augmentation supérieure à celles des compositions légères mais elles conservent tout de même un nombre d'heures de surchauffe inférieur. La différence de surchauffe est plus importante pour les compositions équipées des systèmes actifs que ceux qui n'en possèdent pas. Ce qui est normal car le

refroidissement s'active pour limiter cette surchauffe intérieure. Il est cependant nécessaire de se demander pourquoi les compositions possédant un système de refroidissement ont autant de surchauffe sur les deux périodes. Pour rappel, le refroidissement est appliqué uniquement dans les pièces où les occupants passent le plus de temps, c'est-à-dire dans le salon et les chambres. Ce qui signifie que du point de vue de la simulation, les autres pièces n'ont aucun moyen de refroidissement et peuvent donc atteindre des températures élevées, affectant ainsi la température moyenne de l'air intérieur. Pour obtenir un nombre d'heures de surchauffe plus faible, il faudrait appliquer le refroidissement dans les autres pièces, mettre en place du free cooling ou intégrer un réseau de flux d'air intérieur multizone, pour faire circuler l'air provenant de la ventilation, des courants d'air naturels ou mécaniques dans les autres pièces. Ce réseau permettrait également d'évacuer la surchauffe par tirage thermique, appelé également « effet cheminée », consistant à générer une circulation naturelle verticale entre un point bas et un point haut, à l'aide de la différence de température entre la température intérieure et extérieure (Guide Bâtiment Durable, 2016). Ce module est applicable dans TRNSYS et est appelé « TRNFlow » (TRNSYS, 2009a).

Tableau 23 : Augmentation de la surchauffe entre 2021-2040 et 2081-2100

		ON	ON_PS	ON_PS_FC	OFF	OFF_PS	OFF_PS_FC
Compositions massives	EPS et PIR (Initiale)	127,4%	363,2%	518,4%	121,0%	280,7%	322,7%
	Herbe	141,8%	354,5%	597,0%	129,7%	268,4%	329,9%
	Lin	141,6%	369,1%	633,3%	124,0%	279,8%	340,7%
	Miscanthus	141,6%	337,0%	556,7%	139,7%	248,8%	306,0%
	Laine de mouton	140,6%	377,3%	657,4%	121,5%	288,3%	347,4%
	Moyenne	138,6%	360,2%	592,6%	127,2%	273,2%	329,4%
Compositions légères	Cellulose (Initiale)	129,4%	310,1%	419,3%	119,7%	259,9%	291,9%
	Herbe	129,9%	315,3%	436,4%	120,0%	260,1%	293,6%
	Lin	129,2%	311,1%	420,2%	119,7%	260,0%	291,5%
	Miscanthus	132,9%	340,5%	503,9%	121,4%	270,2%	314,0%
	Laine de mouton	129,5%	310,4%	414,4%	119,3%	259,5%	290,3%
	Moyenne	130,2%	317,5%	438,8%	120,0%	261,9%	296,3%

* ON : Chauffage / Refroidissement actifs

* OFF : Chauffage / Refroidissement non actifs

* PS : Protection solaire

* FC : Free cooling

4.2.2. Sous-chauffe intérieure

Le bâtiment est considéré sous-chauffé quand la moyenne de sa température d'air intérieure est inférieure à 17°C. Le taux de sous-chauffe des compositions s'élèvent aux alentours de 33% pour les compositions massives et de 29.6% pour les compositions légères sur la période 2021 - 2040, ce qui influence grandement le confort des occupants (Tableau 24). Pour un même

isolant, la composition légère est plus efficace car elle utilise directement les gains externes et internes sans que les matériaux absorbent l'énergie, ce qui n'est pas le cas des compositions massives. Avec le temps cette différence entre les deux types de compositions va s'amenuiser. L'utilisation d'un chauffage d'appoint (électrique) ou d'un système de chauffage est donc nécessaire pour obtenir un meilleur confort toute l'année.

Tableau 24 : Nombre d'heures (%) en sous-chauffe - Compositions sans mesure active

	2021-2040			2081-2100		
	OFF	OFF_PS	OFF_PS_FC	OFF	OFF_PS	OFF_PS_FC
EPS et PIR (Initiale)	29,30%	29,46%	29,09%	26,28%	26,31%	26,13%
Cellulose (Initiale)	29,57%	29,59%	29,59%	26,70%	26,71%	26,71%
Herbe	34,17%	34,22%	34,06%	28,69%	28,72%	28,56%
Herbe	29,77%	29,78%	29,78%	26,88%	26,88%	26,88%
Lin	33,30%	33,36%	33,13%	28,07%	28,13%	27,92%
Lin	29,63%	29,66%	29,66%	26,76%	26,76%	26,76%
Miscanthus	35,47%	35,75%	35,45%	31,76%	31,91%	31,50%
Miscanthus	29,86%	29,90%	29,90%	26,83%	26,83%	26,83%
Laine de mouton	32,74%	32,79%	32,41%	27,73%	27,79%	27,60%
Laine de mouton	29,59%	29,60%	29,60%	26,63%	26,64%	26,64%

* OFF : Chauffage / Refroidissement non actifs

* PS : Protection solaire

* FC : Free cooling

Il convient de rappeler que le profil de simulation ne comportent pas d'éclairage dans les pièces de passage ni le dégagement de chaleur des appareils tels que les ordinateurs. De même, les gains apportés par les occupants sont sous-estimés. En réalité, les occupants sont actifs dans la maison et sont censés dégager plus de chaleur que l'hypothèse posée qui correspond à « rester assis ». Tous ces facteurs pourraient augmenter les gains internes annuels et diminuer le nombre d'heures de sous-chauffe annuel.

4.2.3. Contribution des mesures passives

L'apport de mesures passives a contribué à la limitation de la surchauffe intérieure. En effet, la mesure passive la plus rentable est la protection solaire, permettant de réduire la surchauffe d'en moyenne 80 % pour les compositions massives, avec les mesures actives, et de 77% pour les légères, sur la période 2021-2040. Cependant, sur la période 2081-2100, celle-ci est moins efficace car les températures printanières, automnales et hivernales vont également augmenter, ce qui va agrandir la période de surchauffe. Il faudrait donc élargir la zone d'activité des protections solaires, pour les activer au minimum de début avril à fin octobre. Il est

également possible d’agir sur les protections solaires en choisissant des protections ayant une meilleure efficacité. Précédemment le choix s’était porté sur des protections extérieures pouvant laisser passer 19.5 % des radiations. D’après l’ EPBD (2025), il en existe qui ne laissent passer aucune radiation, ce qui permettrait également de réduire la surchauffe intérieure.

Le free cooling impacte également la surchauffe intérieure mais reste bien moins efficace que les protections solaires. Celui-ci est activé lors des mois de juillet et août entre 20h et 8h. A l’instar des protections solaires, cette technique passive voit sa contribution diminuer en 2081-2100 car les températures pendant ces 2 mois seront élevées. De plus, cette mesure est active lorsque la température de l’air intérieur atteint les 24°C et quand la température extérieure est inférieure à celle-ci. Elle est également appliquée dans les pièces où se situent le système de refroidissement (pareil pour les compositions sans mesure active). Ainsi, en regardant les résultats, le constat est que les températures lors de cette période seront chaudes et empêcheront l’utilisation du freecooling. Les compositions avec mesures actives auront un freecooling avec une faible contribution (Tableau 25) contrairement aux compositions sans mesures actives qui ont un free cooling qui est négligeable, voire qui produit l’effet inverse (Tableau 26). Les compositions légères à ossature bois sont plus réactives au refroidissement nocturne même si elles sont plus vulnérables à la chaleur. Ceci est contraire aux compositions massives qui ont une forte inertie, et qui ont du mal à se décharger de la chaleur accumulée lors de la journée, surtout durant les chaleurs nocturnes (Rahif, 2023). C’est donc l’inertie du bâtiment qui provoquerait cet effet inverse.

En revanche, il faudrait que le free cooling suive le même schéma que les protections solaires en élargissant sa période d’activité et en étant appliquée dans plus de pièces. Dans ce cas-ci, il serait utile pour le printemps et l’automne et permettrait de réduire le nombre de degrés-heures sur l’année.

Tableau 25 : Contribution des mesures passives à la réduction de la surchauffe - Chauffage/refroidissement actif

		2021-2040			2081-2100		
		PS	FC	PS + FC	PS	FC	PS + FC
Compositions massives	EPS et PIR (Initiale)	81,01%	6,30%	87,31%	45,85%	2,51%	48,35%
	Herbe	80,19%	8,79%	88,98%	50,47%	3,13%	53,60%
	Lin	80,74%	8,61%	89,35%	49,81%	2,56%	52,37%
	Miscanthus	79,32%	9,19%	88,52%	50,78%	4,07%	54,85%
	Laine de mouton	81,09%	8,53%	89,62%	49,23%	2,23%	51,46%
	Moyenne	80,47%	8,29%	88,75%	49,23%	2,90%	52,13%
Compositions légères	Cellulose (Initiale)	76,50%	7,34%	83,83%	43,66%	3,94%	47,61%
	Herbe	77,00%	7,53%	84,53%	44,17%	3,86%	48,03%
	Lin	76,53%	7,29%	83,82%	43,48%	3,89%	47,37%
	Miscanthus	78,43%	8,16%	86,59%	44,72%	4,43%	49,16%
	Laine de mouton	76,28%	7,19%	83,47%	43,12%	3,95%	47,07%
	Moyenne	76,95%	7,50%	84,45%	43,83%	4,01%	47,85%

* PS : Protection solaire

* FC : Free cooling

Tableau 26 : Contribution des mesures passives à la réduction de la surchauffe - Chauffage/refroidissement non actif

		2021-2040			2081-2100		
		PS	FC	PS + FC	PS	FC	PS + FC
Compositions massives	EPS et PIR (Initiale)	69,41%	3,16%	72,57%	29,05%	-2,18%	26,87%
	Herbe	70,40%	5,06%	75,46%	38,77%	-1,17%	37,60%
	Lin	71,85%	4,72%	76,57%	36,46%	-0,84%	35,62%
	Miscanthus	67,49%	5,79%	73,28%	42,11%	-0,64%	41,47%
	Laine de mouton	72,68%	4,39%	77,06%	35,16%	-0,74%	34,42%
	Moyenne	70,37%	4,62%	74,99%	36,31%	-1,11%	35,19%
Compositions légères	Cellulose (Initiale)	66,45%	4,30%	70,75%	27,17%	1,50%	28,67%
	Herbe	66,83%	4,42%	71,26%	28,11%	1,59%	29,70%
	Lin	66,46%	4,25%	70,71%	27,13%	1,54%	28,68%
	Miscanthus	68,54%	4,94%	73,48%	29,95%	1,43%	31,38%
	Laine de mouton	66,33%	4,20%	70,53%	26,78%	1,53%	28,31%
	Moyenne	66,92%	4,42%	71,34%	27,83%	1,52%	29,35%

* PS : Protection solaire

* FC : Free cooling

Quant au choix de son placement, celui-ci peut être discuté. En effet, le freecooling est exécutée dans les chambres et le salon. En termes de sécurité, il est déconseillé de laisser son rez-de-chaussée ouvert pendant la nuit (Fédération de l'Industrie du Verre, 2014, p.7, dans Abrahams et al., 2015). Le free cooling se ferait donc seulement à l'étage. Il est également considéré que ce sont les occupants qui ouvrent les fenêtres et non un système paramétrés. Ce cas-ci est donc une utilisation optimale de la mesure passive, ce qui n'arriverait pas dans la réalité.

4.2.4. Besoin net en énergie pour le chauffage et le refroidissement

Malgré le fait que les constructions massives ont un nombre de degrés-heures inférieur à ceux des constructions légères, celles-ci ont un besoin d'énergie en chauffage plus élevé (Figure 34 et Figure 35). En effet, leur inertie est la source de ce problème car le bâtiment absorbe beaucoup de chaleur avant de voir sa température intérieure monter. Cependant, l'avantage est qu'il a moins besoin de refroidissement car cette capacité lui permet de capturer la chaleur lors des pics de températures pour la relâcher lorsqu'il fait plus frais, ce qui permet de réduire les besoins.

Lors de la période 2021-2040, les compositions massives en herbe et en miscanthus ne respectent déjà plus le critère du label passif de demande d'énergie en chauffage. La demande en refroidissement est relativement faible et avoisine les 3 kWh/m².an pour les simulations avec protections solaires (Figure 36 et Figure 37). Celle-ci décline au fur et à mesure qu'une mesure passive est ajoutée, contrairement aux besoins en chauffage qui varient faiblement, mais qui augmentent avec l'ajout des mesures passives pour certains cas (Annexe XI). Ceux-ci peuvent s'expliquer de 2 manières. Premièrement les protections solaires sont appliquées de mai à septembre. Il peut y avoir des journées froides lors de cette période, ce qui rend la conservation de la chaleur intérieure difficile. Si les stores s'abaissent, le bâtiment se retrouve privé de gains externes et a donc besoin de chauffage pour maintenir sa température intérieure à 20°C lorsque les occupants sont présents. Suite à l'intégration de la deuxième mesure passive, le free cooling, la demande continue d'augmenter. Ce résultat s'explique suite à l'encodage choisi pour le free cooling dans TRNSYS. Un hystérésis est utilisé pour contrôler l'activation et la désactivation de cette mesure passive, de manière à ce qu'elle ne s'active pas en même temps que le chauffage et la climatisation. Cependant la température de désactivation choisie est de 20°C. Ce qui signifie que le free cooling peut être enclenché quand la température intérieure est jugée proche de la surchauffe (24°C) mais que les conditions extérieures sont plutôt fraîches. Donc quand la température intérieure retombe à 20°C, le chauffage pourrait s'activer pour équilibrer la température du bâtiment. Il faudrait alors soit augmenter la température de désactivation du free cooling ou ne pas faire chevaucher les plages horaires du chauffage et du free cooling nocturne, pour éviter cette augmentation.

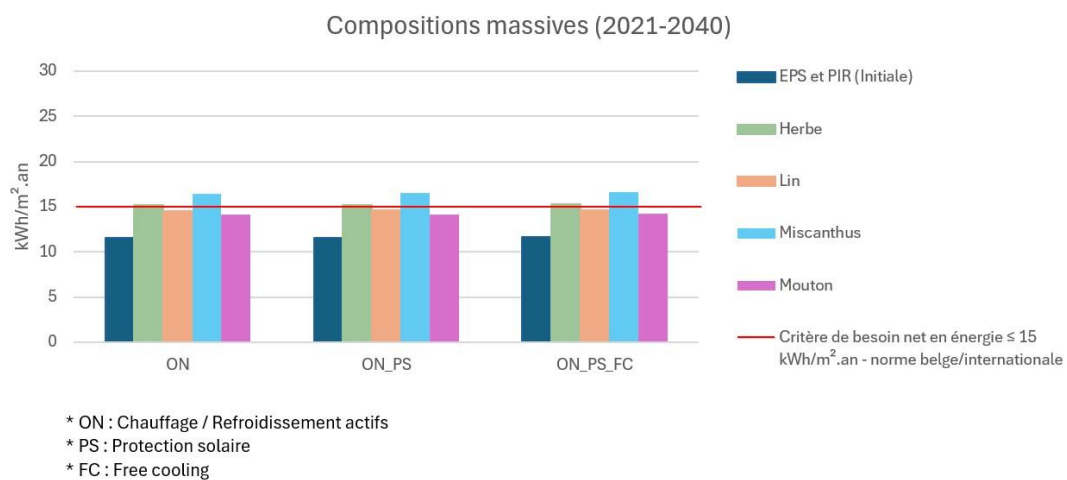


Figure 34 : Besoin net en énergie pour le chauffage pour les compositions massives (2021-2040)

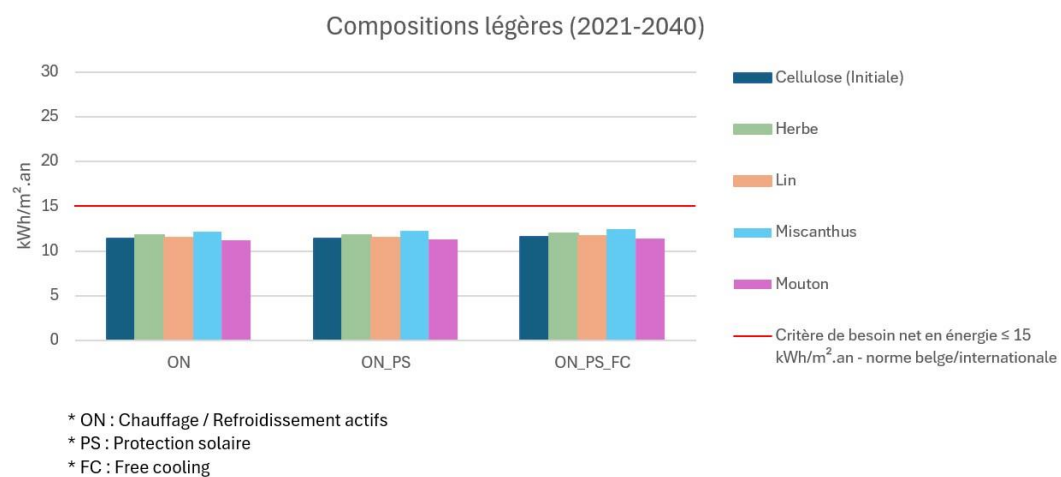


Figure 35 : Besoin net en énergie pour le chauffage pour les compositions légères (2021-2040)

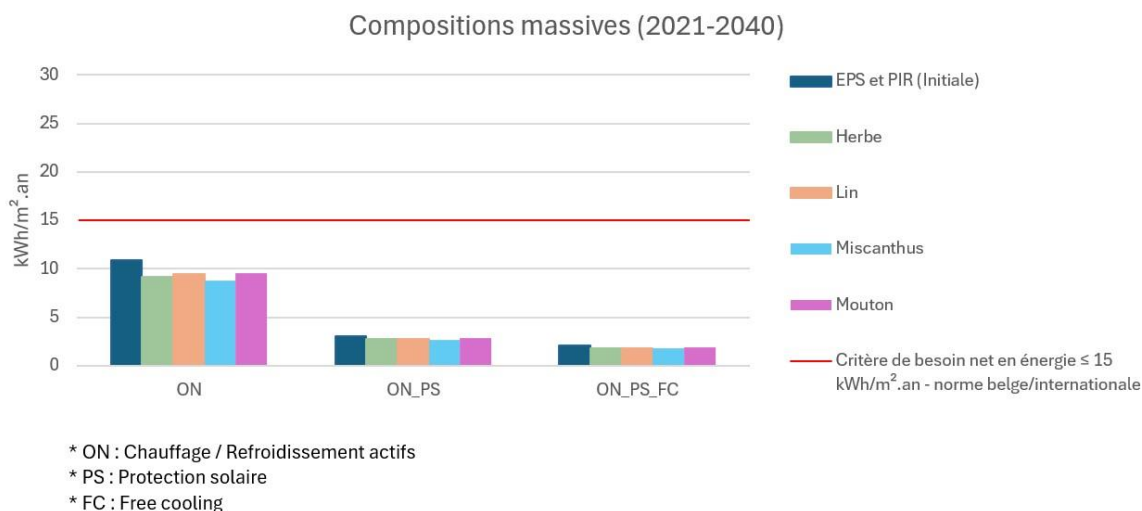


Figure 36 : Besoin net en énergie pour le refroidissement pour les compositions massives (2021-2040)

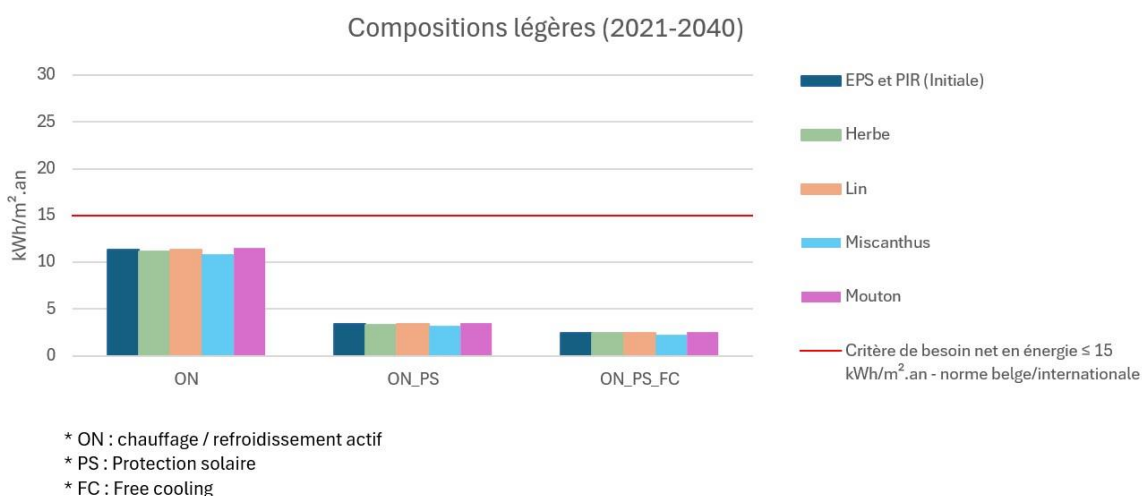


Figure 37 : Besoin net en énergie pour le refroidissement pour les compositions légères (2021-2040)

A partir de la période 2081-2100, toutes les compositions voient leur besoin en énergie de chauffage être inférieur au critère de la norme passive (Figure 38 et Figure 39). Les compositions n'ayant aucune mesure passive voient leur besoin en refroidissement augmenter de 250% en moyenne pour les compositions massives et de 225% pour les compositions légères (Figure 40 et Figure 41). C'est en les intégrant que le besoin de refroidissement passe sous la barre des 15 kWh/m².an. Le miscanthus détient la demande d'énergie en chauffage la plus haute mais a un besoin en énergie de refroidissement plus faible que les autres isolants. En comparant le total de demande d'énergie (chauffage + refroidissement) des compositions avec mesures actives et passives, les compositions légères sont celles qui en demandent le moins, peu importe la période. Seule la composition massive initiale détient le plus faible demande d'énergie totale

s'élevant à 13.67 kWh/m².an pour la période 2021-2040 et à 22.01 kWh/m².an pour la période 2081-2100.

Pour ces simulations, le seuil de 25°C correspond à l'activation du refroidissement, contrairement à la norme "Civil Building Indoor Temperature Design Code" qui requiert une température de climatisation minimale de 26°C. Elle estime cette température comme confortable, qui permettrait de faire de grandes économies d'énergies (Zero Technologies Co., Ltd, 2024). Néanmoins cela demande un choix entre faire des économies d'énergies et assurer le confort pour tous (nourrissons, enfants, personnes âgées, etc.).

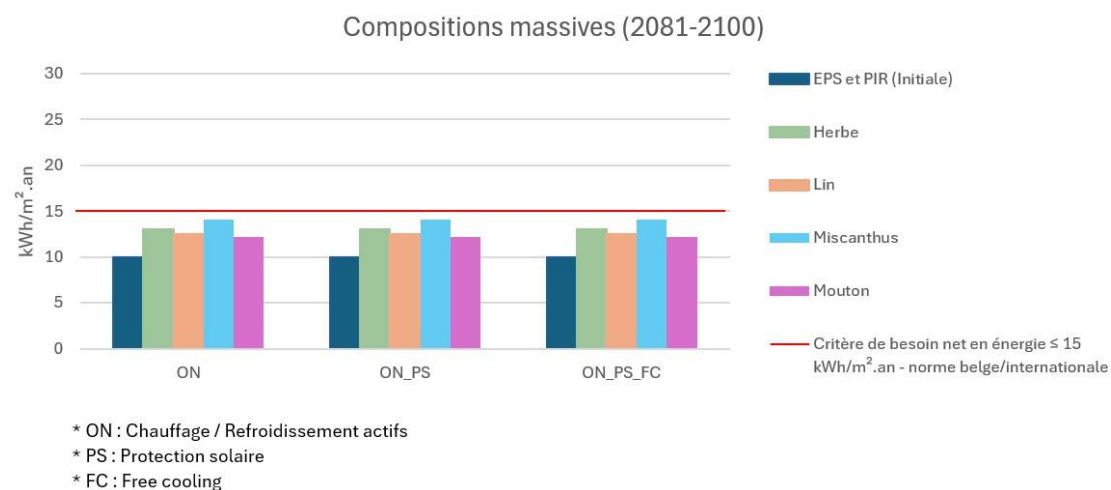


Figure 38 : Besoin net en énergie pour le chauffage pour les compositions massives (2081-2100)

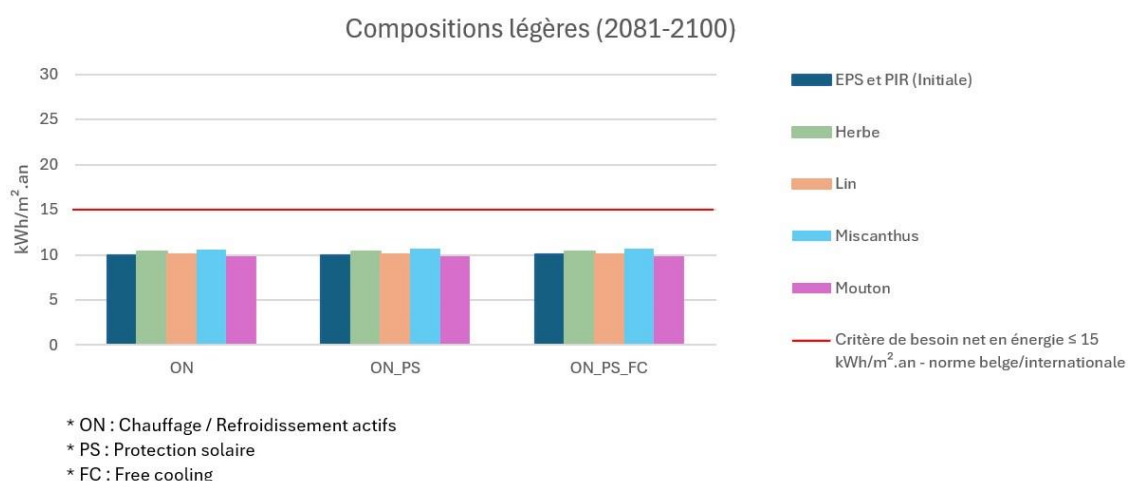


Figure 39 : Besoin net en énergie pour le chauffage pour les compositions légères (2081-2100)

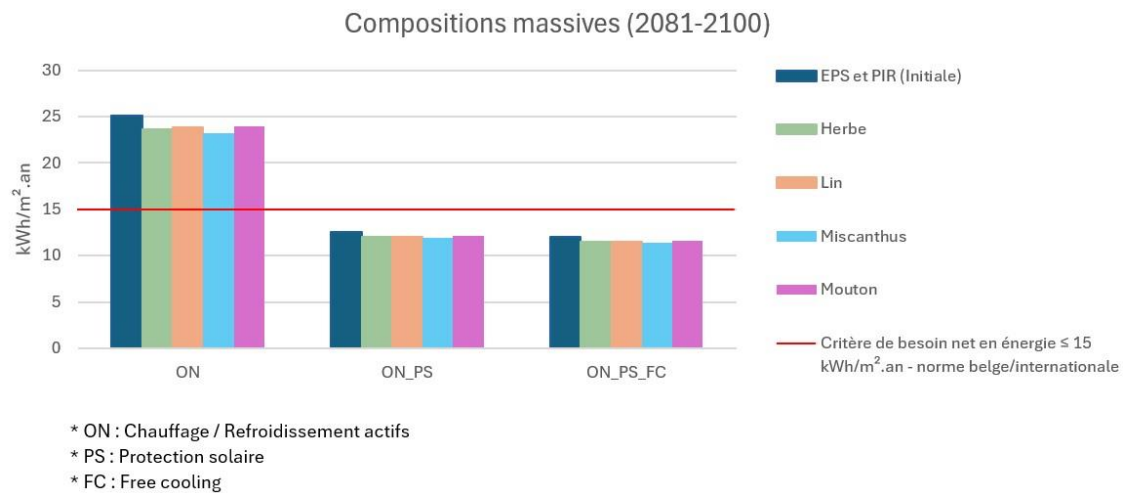


Figure 40 : Besoin net en énergie pour le refroidissement pour les compositions massives (2081-2100)

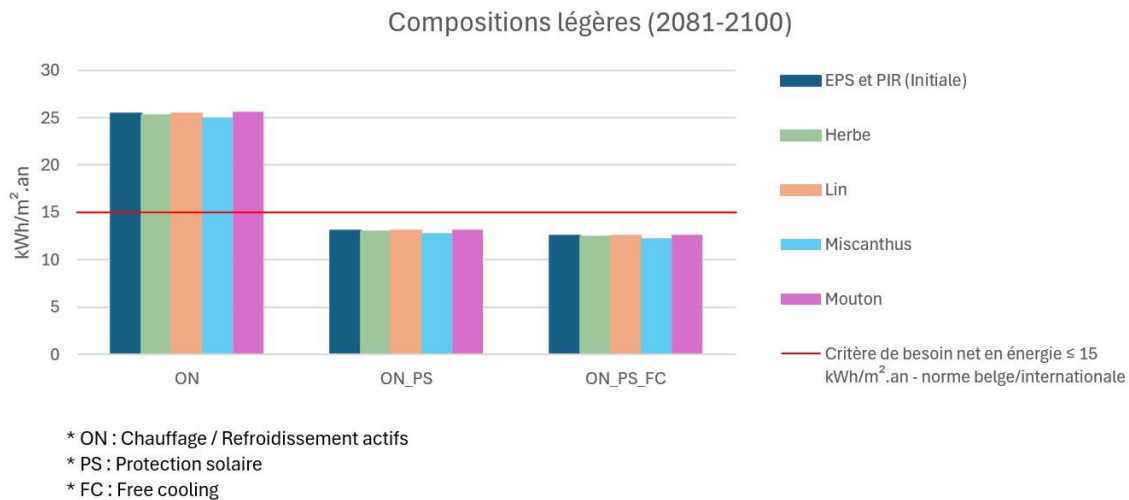


Figure 41 : Besoin net en énergie pour le refroidissement pour les compositions légères (2081-2100)

4.2.5. Bilan des performances énergétiques et du confort

L'utilisation de matériaux biosourcés peut être bénéfique pour apporter un certain équilibre entre performances énergétiques et confort. Certes, ces compositions biosourcées ne sont pas celles qui ont la demande d'énergie en chauffage la plus faible, mais peuvent limiter davantage le risque de surchauffe par leurs performances thermiques. En parallèle, les mesures passives ont montré leur efficacité dans la lutte contre la surchauffe intérieure et dans la réduction des besoins en refroidissement, notamment les protections solaires. En effet, sur la période 2021-2040, seuls 3 compositions, avec mesures actives et passives, respectent les critères de besoin net en énergie et de surchauffe établit pour la Belgique et l'internationale :

- Composition(s) massive(s) : Lin et Mouton
- Composition(s) légère(s) : Miscanthus

Toutes les compositions avec systèmes actifs et détenant une ou deux mesures actives (CR_ON_PS et CR_ON_PS_FC) respectent seulement les critères internationaux établis par la Passive House Institute sauf les compositions massives en herbe et en miscanthus qui ont un besoin en chauffage supérieur à 15kWh/m².an.

Les compositions massives biosourcées, sans les systèmes actifs et avec mesures passives (CR_OFF_PS_FC), répondent aux critères internationaux en ayant une surchauffe inférieure à 10%. En optimisant les systèmes et leur utilisation, il serait possible que les compositions légères (CR_OFF_PS_FC) respectent également le critère de surchauffe international sous le climat 2021-2040. Cependant, elles affichent un taux de sous-chauffe élevée rendant les conditions intérieures inconfortables pour les occupants, notamment en période hivernale.

Néanmoins, sur la période 2081-2100, aucune composition ne respecte les critères actuels d'un bâtiment passif qu'elles soient équipées de systèmes actifs ou pas. C'est sur cette période que certains matériaux biosourcés tels que l'herbe, le miscanthus apportent un équilibre plus marqué contrairement aux compositions initiales. En effet, pour les compositions massives avec mesures passives (CR_ON_PS_FC), le miscanthus a 7.85% de surchauffe annuelle en moins que la composition initiale, tout en ayant une demande de refroidissement inférieure. Cependant, son besoin en énergie de chauffage est supérieur mais il reste valide quant au critère de besoin net en énergie. Les autres isolants biosourcés suivent le miscanthus tout en ayant leur besoin en refroidissement inférieur à celui de la composition initiale en EPS et en PIR. Pour les compositions légères, seules les compositions en herbe et en miscanthus rivalisent avec la cellulose en ayant une surchauffe et un besoin en refroidissement inférieur. Sans les mesures actives, ces deux isolants biosourcés offrent un meilleur confort que l'EPS/PIR et la cellulose. Du point de vue global, les compositions ayant les moins bonnes performances thermiques sont celles qui apportent un meilleur confort sous le climat futur.

Au fur et à mesure des décennies ce besoin en chauffage va réduire et le besoin en refroidissement deviendra plus important. Le site de La Maison Passive a pris en compte ce besoin de refroidissement dans ces critères en abaissant le nombre de degrés heures à 5%, comme expliqué dans l'état de l'art. Cependant, ce besoin devra avoir son propre critère dans les années à venir et sera plus important que celui du chauffage.

Il est également important de noter que ces simulations sont faites sous le scénario pessimiste SSP5-8.5 et le modèle MIROC 6, ce qui est le pire cas des projections climatiques actuelles. Sous d'autres conditions, plus optimistes, la demande de chauffage serait plus élevée tandis que celle du refroidissement serait plus basse.

4.3. Analyse de l'impact environnemental


4.3.1. Énergie consommée par les compositions

Comme énoncé en section 3.5.2, chaque personne constituant un ménage familial consomme en moyenne 35 L d'eau à 60°C, ce qui représente 51,1 m³/an d'eau à 60°C pour un ménage de 4 personnes (Annexe XII). Pour une PAC chauffant l'eau à une température de 55°C, le volume annuel représente 56.8 m³/an. Ainsi un besoin de 2971.5 kWh/an est nécessaire pour fournir ce volume annuel, ce qui correspond à 10 697.5 mégajoules. Pour finir, cette quantité est divisée par le SCOP à 55°C de la PAC donnant ainsi la quantité d'énergie consommée par celle-ci pour chauffer ce volume d'eau sur une année. Cette valeur s'élève à 3212.46 mégajoules.

Les résultats de la variante composée du chauffage, du refroidissement et des mesures passives (ON_PS_FC) des 10 compositions sont utilisés pour déterminer la quantité d'énergie, en mégajoules, consommée par les PACs pour le chauffage et le refroidissement. Les calculs permettant de déterminer l'énergie totale consommée par la PAC air-eau, couplant chauffage et ECS, sous la période 2021-2040 sont ci-dessous (Tableau 27 et Tableau 28).

Tableau 27 : Energie totale consommée par la PAC air/eau - Compositions massives

	Compositions massives (2021-2040)				
	EPS/PIR	Herbe	Lin	Miscanthus	Mouton
Chauffage (kWh/m ² .an)	11,61	15,29	14,66	16,60	14,23
Chauffage (kWh/an)	1674,63	2205,43	2114,56	2394,38	2052,54
Chauffage (MJ/an)	6028,66	7939,55	7612,41	8619,78	7389,13
Electricité consommé par la PAC (MJ/an) pour le chauffage	1330,83	1752,66	1680,44	1902,82	1631,15
Electricité totale consommé par la PAC (MJ/an)	4543,29	4965,12	4892,91	5115,29	4843,62



x 144
x 3,6
÷ 4,53
+ 3212,46

Tableau 28 : Energie totale consommée par la PAC air/eau - Compositions légères

	Compositions légères (2021-2040)				
	Cellulose	Herbe	Lin	Miscanthus	Mouton
Chauffage (kWh/m².an)	11,60	11,99	11,63	12,42	11,43
Chauffage (kWh/an)	1673,18	1729,44	1677,51	1791,46	1648,66
Chauffage (MJ/an)	6023,46	6225,98	6039,04	6449,26	5935,19
Electricité consommé par la PAC (MJ/an) pour le chauffage	1329,68	1374,39	1333,12	1423,68	1310,20
Electricité totale consommé par la PAC (MJ/an)	4542,15	4586,85	4545,59	4636,14	4522,66

x 144
x 3,6
÷ 4,53
+ 3212,46

Ceux permettant de déterminer l'énergie totale consommée par la PAC air-air sous la période 2021-2040 sont ci-dessous (Tableau 29 et Tableau 30).

Tableau 29: Energie totale consommée par la PAC air/air - Compositions massives

	Compositions massives (2021-2040)				
	EPS/PIR	Herbe	Lin	Miscanthus	Mouton
Refroidissement (kWh/m².an)	2,06	1,83	1,84	1,76	1,86
Refroidissement (kWh/an)	216,30	192,15	193,20	184,80	195,30
Refroidissement (MJ/an)	778,68	691,74	695,52	665,28	703,08
Electricité consommé par la PAC (MJ/an) pour le refroidissement	91,61	81,38	81,83	78,27	82,72

x 105
x 3,6
÷ 8,5

Tableau 30 : Energie totale consommée par la PAC air/air - Compositions légères

	Compositions légères (2021-2040)				
	Cellulose	Herbe	Lin	Miscanthus	Mouton
Refroidissement (kWh/m².an)	2,48	2,43	2,50	2,26	2,55
Refroidissement (kWh/an)	260,40	255,15	262,50	237,30	267,75
Refroidissement (MJ/an)	937,44	918,54	945,00	854,28	963,90
Electricité consommé par la PAC (MJ/an) pour le refroidissement	110,29	108,06	111,18	100,50	113,40

x 105
x 3,6
÷ 8,5

Comme précisé en section 3.5.1.2, l'utilisation de deux systèmes s'explique par l'application des systèmes actifs à différents endroits. Le demande d'énergie en chauffage est nécessaire dans tout le bâtiment contrairement au refroidissement qui est appliquée seulement dans 5 zones. C'est pourquoi un chauffage par plancher chauffant et un refroidissement par l'air sont utilisés. Si un chauffage par radiateurs à eau était utilisé, la consommation d'énergie électrique par la PAC serait plus importante car ils fonctionnent avec une eau à 55°C (Atlantic, s. d.). Dans ce cas-ci l'utilisation d'une PAC réversible n'était pas réalisable. Il aurait fallu appliquer le chauffage et le refroidissement dans les mêmes pièces pour que cela fonctionne. Cependant, cela aurait permis de réduire la maintenance et le nombre d'appareils car tout serait centralisé.

4.3.2. Impact environnemental des compositions

Après avoir introduit l'énergie électrique totale consommée par les deux PAC, l'impact environnemental de chaque bâtiment est calculé sous la période 2021-2040. En comparant le score environnemental des bâtiments en construction massive et légère, il en ressort que la composition en herbe est celle qui obtient le meilleur score avec un impact de 50,15 mPt/m²SPU pour la composition massive et de 51,17 mPt/m²SPU pour la composition légère (Annexe XIII). En général, l'impact des matériaux des constructions massives est plus faible que pour les constructions légères hormis pour la construction initiale (Figure 42 et Figure 43). Ceci s'explique par la quantité de matériaux supplémentaires dans les parois des compositions légères. D'un point de vue global, la composition en herbe reste favorable aux deux types de construction s'il fallait prendre en compte l'impact des matériaux et de l'énergie sur l'environnement.

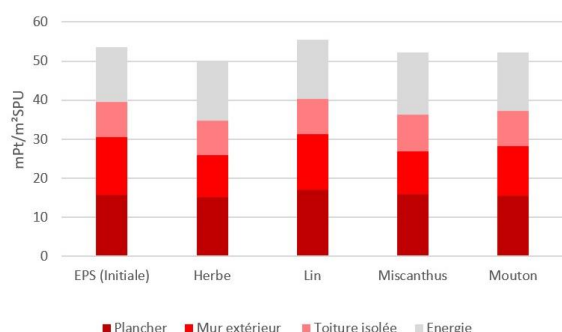


Figure 42 : Impact matériaux/énergie - Composition massive

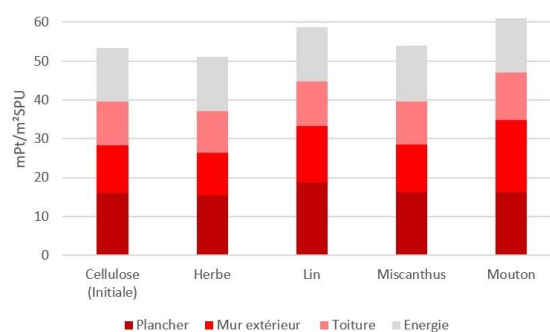


Figure 43 : Impact matériaux/énergie - Composition légère

L'énergie consommée par le bâtiment peut représenter jusqu'à 30% de l'impact total selon la composition choisie (Annexe XIV). Ce qui permet de comparer les matériaux au niveau environnemental, mais également au niveau énergétique. L'impact de chaque composition est relié aux performances thermiques des isolants. Par exemple, la composition massive initiale contient de l'EPS dans ces parois verticales qui a une conductivité thermique de 0.032 W/m.K (Knauf, 2025). Comparée au tableau récapitulatif en section 3.3.2.5, cette valeur est la plus faible et limite donc davantage les transferts et pertes de chaleur. Donc pour une même épaisseur d'isolation et un même profil de simulation, plus la conductivité thermique est faible plus l'impact lié à l'énergie est faible (Tableau 31). Toutefois, il convient de noter que la conductivité thermique utilisée pour les panneaux en laine de mouton, n'est pas celle utilisée par les entreprises. Ce qui aurait pour conséquence, l'augmentation de l'énergie utilisée et donc de son impact sur le bâtiment. Avoir l'impact énergétique le plus faible ne signifie pas que le

matériau utilisé est le plus adéquat et le moins impactant d'un point de vue environnemental. Le plus important est de noter que l'énergie consommée et leur impact sur chaque composition seraient en réalité plus importants que les résultats présents. En effet, l'énergie finale ne prend pas en compte l'éclairage, la demande d'énergie de la ventilation mécanique double flux et son système by-pass, les consommations domestiques ou encore des auxiliaires.

Tableau 31 : Impact de l'énergie par m²

		Impact de l'énergie sur le bâtiment				
		Initiale	Herbe	Lin	Miscanthus	Mouton
Composition massive	Impact en mPt/m ² SPU	13,86	15,36	15,1	15,9	14,93
	Contribution à l'impact global (%)	25,90%	30,64%	27,21%	30,45%	28,59%
Composition légère	Impact en mPt/m ² SPU	13,92	14,08	13,94	14,23	13,86
	Contribution à l'impact global (%)	26,04%	27,51%	23,75%	26,39%	22,72%

Afin d'obtenir une comparaison plus franche au niveau de l'impact lié aux matériaux, les parois modifiées sont comparées entre elles. Les principales différences constatées sont sur les murs extérieurs et le plancher des combles car ce sont les parties où les isolants sont les plus présents. En ce qui concerne les constructions massives, les isolants en herbe et en miscanthus ont un impact inférieur aux autres (Figure 44). Le mur en EPS graphité a l'impact environnemental le plus élevé avec un impact de 13.32 mPt/m²SPU, là où celui en herbe et en miscanthus ont le plus faible avec un impact de 9.93 et 9 mPt/m²SPU (Annexe XIV). Néanmoins l'EPS graphité détient un score environnementale plus faible que lin (Annexe XV). Il faut prendre en compte que les isolants biosourcés sont entre des montants en bois, et que le bois a un certain impact. Si seuls les isolants sont analysés, il est constaté que l'isolant en EPS graphité a un impact plus important que les isolants biosourcés avec leurs montants (Annexe XVI). Il est possible d'envisager que cet écart serait d'autant plus conséquent si les isolants biosourcés ne nécessitaient pas de montants. En effet, cela aurait également des répercussions sur l'impact global des matériaux et sur l'énergie. Les parois biosourcées seraient donc mieux isolées et les compositions biosourcées verraient leur besoin en énergie de chauffage se réduire.

En se penchant sur le plancher des combles, il est constaté que le lin a le moins bon impact environnemental. Il est suivi par le PIR qui a pourtant le score environnemental le plus faible

après le plancher en herbe (Annexe XVII et Annexe XVIII). Ceci s'explique par sa capacité à limiter les pertes thermiques à l'aide de sa conductivité thermique relativement faible de 0.022 W/m.K (Recticel insulation, 2025).

A propos des constructions légères, la cellulose, placée dans la composition légère initiale, est produite à base de papier recyclé et demande peu de transformation, ce qui induit un impact environnemental plutôt faible (Trachte & Stiernon, 2023, p.43)(Figure 45). Il faut noter que le miscanthus et la cellulose détiennent des composants supplémentaires dans leur structure, qui sont les panneaux OSB, permettant le maintien de l'isolant dans les parois. Ils auraient donc un impact plus faible s'ils avaient la même composition de parois que les autres isolants. L'impact lié aux compositions à base d'herbe reste en partie constant, ce qui montre que cet isolant reste avantageux quelque soit la composition choisie.

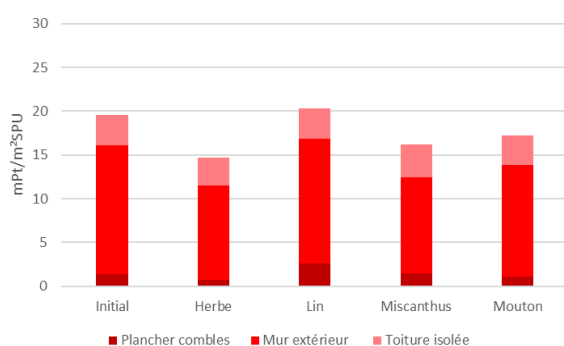


Figure 44 : Impact des parois modifiées - Compositions massives

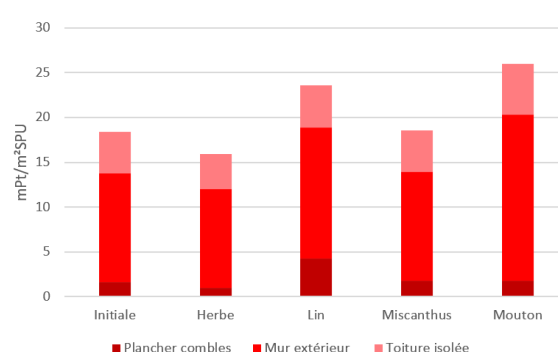


Figure 45 : Impact des parois modifiées - Compositions légères

La différenciation provient majoritairement des étapes de production et de l'élimination des déchets des matériaux biosourcés utilisés (Annexe XIX). En effet la production dans l'analyse de cycle de vie (ACV) reprend 3 modules qui sont l'apport de matière première, le transport (jusqu'au site de production) et la fabrication (Trachte & Stiernon, 2023, p.121). Par exemple, l'herbe se trouve en plus grande quantité et n'a pas besoin d'être cultivée contrairement au lin. De plus, sa propre essence est utilisée pour la production de ses isolants, ce qui réduit son impact sur le changement climatique (Geß et al., 2021 ; Trachte & Stiernon, 2023, p.40). Concernant le miscanthus, celui-ci a des propriétés qui lui permettent d'avoir un bilan carbone négatif, ce qui l'avantage vis-à-vis des autres isolants sur l'impact du bâtiment (Annexe XX). Sur le cycle de production il est celui qui a le plus petit impact avec une valeur de 19 mPt/m²SPU pour la construction massive et de 20 mPt/m²SPU pour la construction légère (Tableau 32). Comparé au lin, la culture et la fabrication d'isolant en miscanthus sont bien

moins énergivores de par son rendement élevé en biomasse et de la non-présence d'additifs lors de sa fabrication (Schulte et al., 2021). Ceci explique pourquoi la phase de production du miscanthus est si peu impactante par rapport aux autres isolants. Cependant Schulte et al. (2021) constatent que sur la phase de fin de vie, lors de l'incinération, il est celui qui dégage le plus d'énergie avec un pouvoir calorifique de 17.9 MJ/kg (ECN, 2019a, dans Schulte et al., 2021) contrairement au lin qui est à 17.7 MJ/kg (Boukaous et al., 2018 dans Schulte et al., 2021), ce qui génère plus d'émissions de CO₂.

La laine de mouton a la phase de production qui impacte le plus l'environnement (Figure 46). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que c'est une ressource qui provient d'origine animale et dont la production reste faible comparé aux autres isolants. Il se pourrait également que la technique d'élevage soit la source de cet impact. La grande différence entre sa construction massive et légère pourrait s'expliquer par la quantité d'isolant à utiliser. En effet, la différence de quantité n'aurait pas le même impact sur la production et donc sur l'impact environnemental du bâtiment. Contrairement aux autres isolants, celle-ci a un impact plus conséquent sur certains indicateurs tels que l'acidification, l'eutrophisation, l'acidification des sols et le changement climatique (Annexe XX). Ces points ne sont pas analysés plus en profondeur dans ce cas d'études mais mériteraient d'être approfondi. Cascione et al. (2025) ont comparé la laine de mouton au lin et à l'EPS (polystyrène expansé). Ils en concluent que dans le pire scénario, regroupant un nombre de conditions qui maximisent les impacts, le lin aurait un impact deux fois supérieur à celui de la laine de mouton et que l'EPS aurait l'impact le plus faible des trois. En effet, il est prit en compte que le lin inclut des pratiques agricoles intensives et l'utilisation de plastiques. Ceci n'est peut-être pas le cas de l'isolant rentré dans la base de données de Totem et ce qui expliquerait également pourquoi le lin a un impact plus faible que la laine de mouton.

Tableau 32 : Impact de l'étape de production (A1-A3) de chaque composition

	ACV - Production (A1-A3)				
	Initial	Herbe	Lin	Miscanthus	Mouton
Impact en mPt/m ² SPU (Massif)	23	21	27	19	24
Impact en mPt/m ² SPU (Léger)	23	21	29	20	32

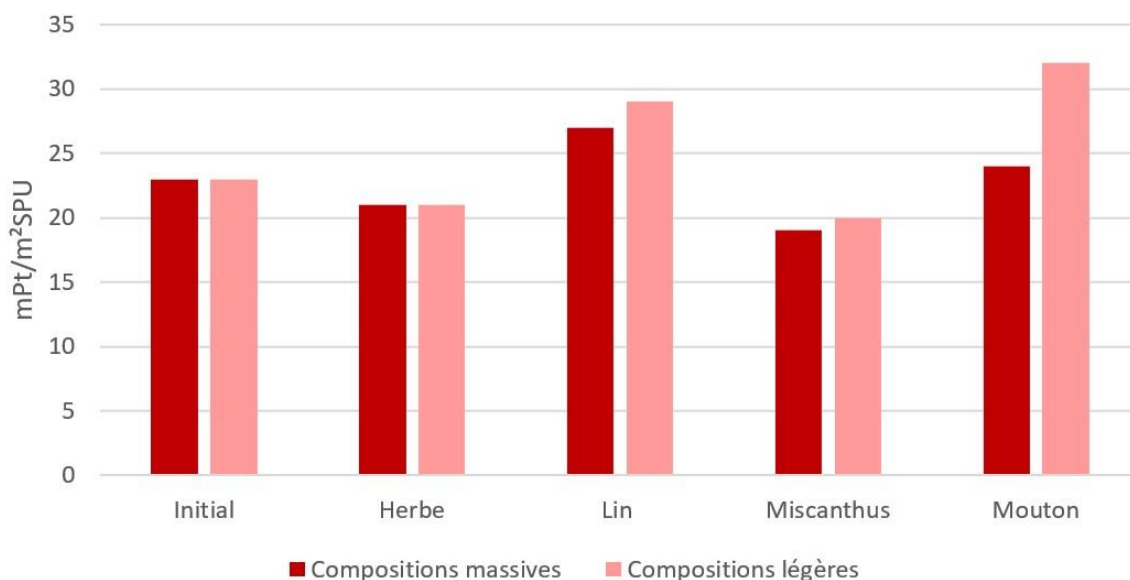


Figure 46 : Etape de production (A1-A3) du cycle de vie des différentes compositions

4.3.3. Les émissions de gaz à effet de serre

Le score agrégé en mPt/m²SPU de chaque composition comprend plusieurs indicateurs dont celui de l'impact sur le changement climatique qui exprime la quantité d'émissions de gaz à effet de serre émis par les compositions sur une durée de 60 ans. Le constat est que les compositions biosourcées massives permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre lorsqu'elles remplacent le polystyrène expansé (EPS) et le PIR (Tableau 33). Celles-ci sont dominées par les compositions en herbe et en miscanthus qui ont une quantité similaire. Concernant les compositions légères, ces deux matériaux rivalisent avec la cellulose. Cependant, comme dit précédemment, le miscanthus et la cellulose ont des éléments supplémentaires dans leur structure. Ce serait donc le miscanthus qui permet la plus haute réduction de GES.

Tableau 33 : Émissions totales émises par chaque composition

		Emissions de gaz à effet de serre				
		Initiale	Herbe	Lin	Miscanthus	Mouton
Composition massive	Impact en kg de CO ₂ équivalent/m ²	540,56	460,64	483,06	462,84	502,42
	Impact en Tonnes de CO ₂ équivalent sur le bâtiment	77,8	66,3	69,6	66,6	72,3
Composition légère	Impact en kg de CO ₂ équivalent/m ²	449,58	445,1	478,38	447,73	551,56
	Impact en Tonnes de CO ₂ équivalent sur le bâtiment	64,7	64,1	68,9	64,5	79,4

4.3.4. Bilan de l'impact environnemental

L'ajout des besoins énergétiques a permis d'analyser et de comparer la contribution des matériaux et de l'énergie de chaque composition. Il en ressort que les compositions légères ont un impact global plus conséquent sur l'environnement, bien que leur besoin énergétique soit moins impactant que les compositions massives, à cause de la quantité de matériaux utilisée.

Du côté des compositions massives, l'herbe et le miscanthus seraient des solutions favorables pour réduire l'impact des matériaux sur le bâtiment, contrairement au lin qui a un impact et un score environnemental plus élevés que ceux des isolants traditionnels. Il émet cependant moins d'émissions de GES que l'EPS et le PIR. Quant à la laine de mouton, il n'est pas possible de dire si celle-ci est favorable tant que les hypothèses émises dans la section 4.3.2 ne sont pas vérifiées.

Pour les compositions légères, les solutions en herbe et en miscanthus font concurrence à la cellulose qui est l'isolant biosourcé le plus produit et utilisée en Wallonie (Cluster Eco-construction, 2024). Il serait donc intéressant de les comparer sur d'autres points tels que leur capacité à résister à l'humidité et à la réguler au sein du bâtiment.

Bien que le miscanthus et l'herbe aient une demande énergétique en chauffage supérieure aux autres isolants et ne respectent pas le critère de besoin net en énergie imposé par la norme belge et internationale, ceux-ci proposent les meilleurs impacts environnementaux ainsi qu'une plus haute réduction d'émissions de gaz à effet de serre. Ils permettent également d'obtenir un meilleur confort avec les nombres de degrés-heures les plus bas. Il y aurait donc un équilibre à faire entre les besoins énergétiques et l'impact des matériaux utilisés pour réduire les émissions de GES émises par le bâtiment. D'un point de vue environnemental, l'utilisation de ces matériaux biosourcés contribuerait à atteindre l'objectif fixé par l'Accord de Paris qui est de limiter l'augmentation de la température terrestre à 1.5°C.

4.4. Les limites de l'étude

L'objectif de cette étude consiste à évaluer le potentiel des isolants biosourcés, disponibles en Wallonie, sur l'aspect environnemental, thermique et énergétique d'un bâtiment résidentiel belge dans un contexte de réchauffement climatique. Pour commencer, cette étude s'est concentrée sur une maison unifamiliale et mériterait à être poussée sur les différentes

typologies de bâti. Ce qui permettrait d'obtenir plus de réponses quant à l'utilisation des matériaux biosourcés dans le parc immobilier et ainsi d'aider à les démocratiser.

Les hypothèses choisies pour cette étude influencent grandement le comportement de la maison, surtout au niveau des besoins énergétiques. En effet, l'emploi du temps de la famille est le même toutes les semaines de l'année. Si celui-ci variait et que des périodes de vacances étaient insérées, les résultats seraient tout autres car les systèmes actifs n'auraient pas les mêmes périodes d'activation. Ceci diminuerait les besoins de chauffage ou de refroidissement selon la période.

Les isolants biosourcés ont été comparé à deux isolants traditionnels et seulement sur la composition massive. Il aurait fallu les intégrer dans la composition légère pour obtenir une meilleure comparaison. Il en est de même pour la cellulose avec la composition massive. De plus cela ne permet pas d'affirmer que les isolants biosourcés ont de meilleures performances thermiques et environnementales que l'entièreté des isolants traditionnels. Il faudrait les comparer à d'autres isolants traditionnels pour prouver leur efficacité.

Les logiciels utilisés ont également leurs limites, tout comme les connaissances de l'utilisateur à leur sujet. Par exemple, il y a un manque de compatibilité entre TOTEM et TRNSYS. Certains matériaux n'étant pas présents dans la base de données de TOTEM ont été remplacés par des matériaux similaires. Cependant ces parois n'ont pu être encodées telles quelles dans TRNSYS. Certaines parois, encodées dans TRNBuild, et paramètres ont dû faire l'objet de modifications pour être simulées dans l'environnement, ce qui peut créer quelques écarts quant aux résultats. La prise en main du logiciel étant complexe, un approfondissement de connaissances quant à son utilisation aurait pu permettre de mieux gérer le profil de simulation, notamment pour l'encodage du free cooling. L'emploi d'un débit constant pour représenter la ventilation naturelle nocturne (free cooling) ne reflète pas la réalité. En effet, quelques facteurs tels que la vitesse et la direction du vent, l'environnement du bâti, le sens des ouvertures et les différences de pression n'ont pas été pris en compte (Castro & Virgone, 2006 ; dans Wachtelaer, 2024). De plus, son emploi est effectué en fonction de la température intérieure, ce qui est le cas optimal. En réalité, ce serait les occupants qui ouvriraient les fenêtres mais pas forcément au moment où la température intérieure atteint les 24°C. Ils ouvriraient ou fermeraient la fenêtre en fonction de leur ressenti. De la même manière, le contrôle des protections solaires est effectué de manière optimale par des capteurs qui évaluent

la puissance du rayonnement direct incident et qui actionnent le mécanisme de fermeture et d'ouverture des protections. Seulement ceux-ci n'ont pas été pris en compte dans la simulation. Concernant l'encodage du chauffage, celui-ci a été représenté avec une fraction radiative égal à 0 correspondant à un chauffage par l'air, ce qui ne correspond ni à des radiateurs (~ 2/3 de convectif) ni à un plancher chauffant (~ moitié radiatif, moitié convectif).

4.5. Perspectives

Cette étude compare le polystyrène expansé graphité (EPS graphité), le polyisocyanurate (PIR) et l'isolant biosourcé le plus utilisé en Wallonie (Cellulose) à des isolants biosourcés en développement. Elle a aidé à trouver une alternative aux isolants traditionnels qui ont un impact conséquent sur le réchauffement climatique en proposant d'autres matériaux locaux biosourcés. Il serait intéressant de comparer ses nouveaux isolants biosourcés à d'autres isolants traditionnels, de manière à encourager leur utilisation dans des constructions futures. D'autres études quant à leur réaction face à l'humidité seraient nécessaires pour éviter de se retrouver face à des dégradations majeures, notamment le risque de condensation qui peut apparaître dans les parois épaisses. Ces isolants sont une avancée dans la recherche pour combattre les émissions de GES. Il serait pertinent de coupler ces matériaux biosourcés aux principes de la maison à énergie positive, comme celles du projet VallÉnergie, ce qui permettrait de réduire davantage les émissions de GES et l'impact environnemental des bâtiments.

La Belgique se dirige vers un environnement plus chaud sur la fin de siècle, il serait intéressant d'utiliser les mêmes compositions de parois mais en réduisant l'épaisseur des isolants pour analyser le comportement du bâtiment au niveau énergétique et confort intérieur. La dimension économique de ces matériaux n'a pas été prise en compte dans cette étude, il serait donc nécessaire de faire une comparaison financière avec les matériaux traditionnels.

De plus, une analyse plus approfondie du cycle de vie de chaque matériau biosourcé permettrait de donner une explication aux résultats obtenus, comme ceux de la laine de mouton. Cela permettrait d'ôter les doutes quant à leur impact et de connaître leur potentiel d'utilisation dans les années à venir.

5. Conclusion

La température moyenne mondiale ne cesse d'augmenter depuis ces dernières années. Les projections climatiques établies par le GIEC estiment une augmentation de 4°C depuis l'ère préindustrielle de 1850-1900, sous le scénario SSP5-8.5 pour la fin de siècle. Le secteur du bâtiment étant le principal contributeur, il est le premier à devoir agir. Pour limiter ce réchauffement, l'Homme doit employer tous les moyens nécessaires pour réduire ces émissions de GES.

Pour cela, cette étude se concentre sur deux potentiels moyens de réduction que sont les matériaux biosourcés et les maisons passives par leur capacité à engendrer des besoins énergétiques relativement faibles. Les objectifs étaient d'analyser le comportement d'une maison passive face au changement climatique et de définir si les matériaux biosourcés apportaient une plus-value sur la performance énergétique et sur l'impact environnemental du bâtiment. En parallèle, un autre objectif était de vérifier si les maisons passives pouvaient se passer de systèmes actifs tels que le chauffage et le refroidissement tout en respectant le critère de surchauffe du label passif.

Les résultats de cette étude ont montré que les isolants biosourcés en herbe et en miscanthus rivalisent avec la cellulose et permettent une meilleure adaptation dans le temps que l'isolant traditionnel en termes d'impact environnemental et de confort thermique. Leur intégration a permis la réduction des émissions de gaz à effet de serre du bâtiment et à conserver son label passif, dans certains cas, tout en respectant les critères de besoin net en énergie de chauffage et de surchauffe. Seulement cela dépend si le bâtiment est analysé sous les normes belges ou internationales. Néanmoins, sous le climat 2081-2100, les compositions perdent leur label avec une augmentation drastique de la surchauffe intérieure. Il est également important de noter que l'utilisation de mesures passives tels que les protections solaires et la ventilation naturelle nocturne est primordiale pour conserver le label passif en 2021-2040 et assurer un confort intérieur aux occupants tout le long de l'année. Faute de quoi, le besoin net en énergie de refroidissement et la surchauffe prendront de l'ampleur.

En somme, cette étude a montré le potentiel que représentent les isolants biosourcés pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, leur efficacité dépend de la période climatique, des mesures prises en compte (notamment les mesures passives) et de l'évaluation choisie (normes belges ou internationales). Il est donc indispensable de poursuivre les

recherches sur leur durabilité, leur comportement face à l'humidité ainsi que leur caractère économique pour encourager leur intégration à grande échelle. Les défis climatiques du secteur du bâtiment pourront être surmontés seulement si une approche intégrant à la fois la qualité de vie, les performances (thermiques, hygroscopiques), les contraintes environnementales et économiques, est mise en place.

6. Bibliographie

- Abrahams, P., André, P., & Rogiest, C. (2015). Simulations dynamiques de maisons à énergie positive (E+) avec le logiciel TRNSYS 17 : Projet VallEnergie - Action 3 - recherche de nouveaux concepts en énergies renouvelables : les maisons E+.
- ABT Construction Bois. (2024, 17 septembre). *Notre savoir faire - ABT Construction Bois*.<https://www.abt-constructionbois.fr/savoir-faire/>
- Adil. (2016). *Le miscanthus : un nouveau matériau de construction*. VEGETAL-E.
https://www.vegetal-e.com/fichiers/2016-le-miscanthus-un-nouveau-materiau-de-construction_1702633079.pdf
- Allwood, J. M., Bosetti, V., Dubash, N. K., Gómez-Echeverri, L., & Von Stechow, C. (2014). Glossaire, sigles, acronymes et symboles chimiques. Dans *Changements climatiques 2014, L'atténuation du changement climatique*.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_WG3_glossary_FR.pdf
- Amaripadath, D., Prasad, D., Safi, T. O., & Attia, S. (2024). Design optimization of an assisted living facility to improve summer thermal comfort in warming climates. *Journal Of Building Engineering*, 93, 109814. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109814>
- Archive météo Liège - meteoblue. (2025). Meteoblue.
https://www.meteoblue.com/fr/meteo/historyclimate/weatherarchive/li%c3%a8ge_belgique_2792413?fcstlength=1y&year=2024&month=5 Travaux réalisés par l'équipe de recherche BEMS (Building Energy Monitoring and Simulation) – Université de Liège, Campus Environnement ARLON
- Atlantic. (s. d.). *Est-ce qu'une PAC consomme beaucoup d'électricité ?* - Atlantic.
<https://www.atlantic.fr/aide/pompe-a-chaleur/fonctionnement/est-ce-qu'une-pac-consomme-beaucoup-d-electricite>
- Attia, S., & Gobin, C. (2020). Climate Change Effects on Belgian Households : A Case Study of a Nearly Zero Energy Building. *Energies*, 13(20), 5357.
<https://doi.org/10.3390/en13205357>

- Bastian, Z., Arnautu, D., Geiger, C., Radeva, G., Schnieders, J., Kaufmann, B., Mikeska, T., & Peper, S. (2022). *Building Certification Guide* (5^e éd.). Passive House Institute.
- Bolduc, L. P. (2021, 29 juillet). *Innovation biomatériaux : un isolant à base d'herbe !* <https://www.ecohabitation.com/guides/3471/innovation-un-isolant-a-base-d-herbe/>
- Bošković, I., & Radivojević, A. (2023). Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime concrete wall constructions in Serbia : The impact of carbon sequestration, transport, waste production and end of life biogenic carbon emission. *Journal Of Building Engineering*, 66, 105908. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105908>
- Bourbia, S., Kazeoui, H., & Belarbi, R. (2023). A review on recent research on bio-based building materials and their applications. *Materials For Renewable And Sustainable Energy*, 12(2), 117-139. <https://doi.org/10.1007/s40243-023-00234-7>
- Chevillard, P. (2022, 17 juin). *Les matériaux biosourcés en dix questions*. CONSTRUIRE SA MAISON. <https://www.construisesamaison.com/construire/materiaux-construction/les-materiaux-biosources-en-dix-questions/a20482>
- CIRAD. (2012). *ÉPICEA*. <https://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/FR/Temperrees/EPICEA.pdf>
- Cluster Eco-construction. (2024). Evaluation du potentiel d'isolants biosourcés pour la rénovation du bâti résidentiel wallon. [Synthèse délivrée par l'entreprise - non public]
- Commission européenne (2013) Rapport de la commission au parlement européen et au conseil : Progrès réalisés par les Etats membres vers des bâtiments dont la consommations d'énergie est quasi nulle. EUR-Lex - 52013DC0483 - EN - EUR-Lex
- Consommation d'eau chaude sanitaire. (2007, 25 septembre). Energie Plus le Site. Consulté le 29 avril 2025, à l'adresse <https://energieplus-lesite.be/theories/eau-chaude-sanitaire12/consommation-d-eau-chaude-sanitaire/>
- Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC). (2021). Rapport d'essais : Mesure de la conductivité thermique de paille/plaquettes de miscanthus type « Promisc » (DE-HY-0136 / HY-20-189-01).

- CSTC-Contact. (2018). Détermination des performances environnementales des bâtiments à l'aide de l'outil TOTEM. *CSTC-Contact*, 2018/2.
- Dams, B., Maskell, D., Shea, A., Allen, S., Cascione, V., & Walker, P. (2023). Upscaling bio-based construction : challenges and opportunities. *Building Research & Information*, 51(7), 764-782. <https://doi.org/10.1080/09613218.2023.2204414>
- Detienne, R. (2018). *Projet VALLENERGIE : Monitoring et calibration d'une maison passive* [Travail de fin d'étude]. Liège université - Arlon Campus Environnement.
- De Troch, R., Bertrand, C., Journée, M., Tricot, C., Akkermans, T., Clerbaux, N., De Backer, H., Dewitte, S., Mangold, A., Nevens, S., Van Malderen, R., De Cruz, L., Roulin, E., Vannitsem, S., Van Schaeybroeck, B., Berckmans, J., Duchêne, F., Hamdi, R., Termonia, P., & Gellens, D. (2020). Rapport Climatique 2020. Dans *IRM - Institut Royal Météorologique de Belgique*. <https://www.meteo.be>
- Di Virgilio, G., Ji, F., Tam, E., Evans, J., Kala, J., Andrys, J., Thomas, C., Choudhury, D., Rocha, C., Li, Y., & Riley, M. (2024). Evaluation of CORDEX ERA5-forced 'NARClIM2.0' regional climate models over Australia using the Weather Research and Forecasting (WRF) model version 4.1.2. *Geoscientific Model Development*. <https://doi.org/10.5194/gmd-2024-41>
- Doutreloup, S., & Fettweis, X. (2021). Typical & ; Extreme Meteorological Year and Heatwaves for Dynamic Building Simulations in Belgium based on MAR model Simulations [Base de données]. Dans *Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5606983>
- Doutreloup, S., Fettweis, X., Rahif, R., Elnagar, E., Pourkiaei, M. S., Amaripadath, D., & Attia, S. (2022). Historical and future weather data for dynamic building simulations in Belgium using the regional climate model MAR : typical and extreme meteorological year and heatwaves. *Earth System Science Data*, 14(7), 3039-3051. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3039-2022>
- Elnagar, E., Gendebien, S., Georges, E., Berardi, U., Doutreloup, S., & Lemort, V. (2023). Framework to assess climate change impact on heating and cooling energy demands in

- building stock : A case study of Belgium in 2050 and 2100. *Energy And Buildings*, 298, 113547. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113547>
- Energie Plus Le Site. (2007, 25 septembre). *Légionellose*. Energie Plus le Site. <https://energieplus-lesite.be/theories/eau-chaude-sanitaire12/legionellose/>
- Energie Plus Le Site. (s. d.). *Ventilation intensive naturelle d'été*. Energie Plus le Site. <https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-intensive/ventilation-intensive-naturelle-d-ete/>
- EPBD. (2025). *Données produits PEB reconnues* (Version du 25/04/2025) [Base de données ; Fichier Excel]. <https://epbd.be/fr/donnees-produits-peb-reconnues/>
- Feist, W. (s. d.). *15 years Passive House in Darmstadt - Kranichstein*. https://passiv.de/former_conferences/Kran/First_Passive_House_Kranichstein_en.html
- Felsche, E., Böhnisch, A., Poschlod, B., & Ludwig, R. (2024). European hot and dry summers are projected to become more frequent and expand northwards. *Communications Earth & Environment*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01575-5>
- Fernandes, J., Cosentino, L., & Mateus, R. (2024). Geo- and Bio-Based Materials as Circular Solutions Towards a Regenerative Built Environment. Dans *Lecture notes in civil engineering* (p. 542-551). https://doi.org/10.1007/978-3-031-57800-7_50
- Fettweis, X. (2024, 19 septembre). *Le CLIMAT en Wallonie dans 10 ans* [Webinaire], ULiège, Belgique.
- Francis, J. A., Skific, N., & Zobel, Z. (2023). Weather whiplash events in Europe and North Atlantic assessed as continental-scale atmospheric regime shifts. *Npj Climate And Atmospheric Science*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00542-9>
- Groupe D'experts Intergouvernemental Sur L'évolution du Climat (GIEC). (2013). *Changements Climatiques 2013 : Les éléments scientifiques*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf
- Gramitherm. (2025, 20 janvier). *Produit - Gramitherm*. <https://gramitherm.eu/produits/>

- Gramitherm. (2024). *GRAMITHERM : matériau isolant en fibres d'herbes selon l'ETA* (ETA-21/0260). <https://gramitherm.eu/wp-content/uploads/2024/09/Fiche-technique-Gramitherm-V8-juillet-2024.pdf>
- Grau, C. (2025, 27 mai). *Comment bien choisir sa climatisation ?* Hello Watt. <https://www.hellowatt.fr/pompe-a-chaaleur/climatisation/>
- GreenBIM Engineering. (2024, 1 février). *Qu'est ce que ASHRAE ? - GreenBIM Engineering*. <https://greenbim-eng.com/ashrae/?lang=fr>
- Grove-Smith, J. (2020). The impact of warming climate conditions on buildings. Dans *Passive House Institute*. 24th International Passive House. https://passipedia.org/media/picopen/22_fact_sheet_impact_warming_climate_on_buildings.pdf
- Guide Bâtiment Durable. (2019, 24 janvier). *Outils disponibles pour le refroidissement passif* <https://guidebatimentdurable.brussels/appliquer-strategie-refroidissement-passif/outils-disponibles-refroidissement-passif>
- Guide Bâtiment Durable. (2016, 29 janvier). *Possibilités de free-cooling naturel*. <https://guidebatimentdurable.brussels/free-cooling/possibilites-free-cooling-naturel>
- Guide Bâtiment Durable. (2022, 13 octobre). *Solution : TOTEM - un outil belge pour améliorer la performance environnementale des bâtiments : Méthodologie*. <https://guidebatimentdurable.brussels/totem-outil-belge-ameliorer-performance-environnementale-batiments/methodologie>
- Hauglustaine, J. M., & Simon, F. (2018). *La ventilation et l'énergie : Guide pratique pour les architectes* (2^e éd.). <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/guide-bleu-ventilation-optimize.pdf?IDR=41652>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2015). Part A : Global and sectoral aspects. Dans *Climate Change 2014 – Impacts, adaptation and Vulnerability* (p. 1-32). Cambridge University Press.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022, 4 avril). *The evidence is clear : the time for action is now. we can halve emissions by 2030*. [Communiqué de presse]. Consulté le 7 avril 2025, à l'adresse https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2022/04/IPCC_AR6_WGIII_PressRelease_English.pdf
- Isolteam. (s. d.). *Isolation en lin*. <https://www.isolteam.be/fr/materiaux-isolants/isolation-en-lin>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023a). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023b). Climate Change 2023 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (s. d.). *FAQ Chapter 1 — Global Warming of 1.5 °C*. IPCC. Consulté le 18 février 2025, à l'adresse <https://www.ipcc.ch/sr15/faq/faq-chapter-1/>
- Joskin, E. (2025, 9 janvier). *Quel climat dans le futur en Wallonie ?* Canopea. <https://www.canopea.be/quel-climat-dans-le-futur-en-wallonie/>
- Kapedani, E., Herssens, J., & Verbeeck, G. (2019). Designing for the future ? Integrating energy efficiency and universal design in Belgian passive houses. *Energy Research & Social Science*, 50, 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.011>
- Karitnig, A. (2008). Comparison of the two building simulation environments TRNSYS and designBuilder. Na
- Knauf. (2025, janvier). *EPS 032 T/M gris : Panneau isolant pour système de façade isolante / Knauf*. https://knauf.com/fr-BE/p/produit/eps-032-t-m-gris-10382_0217

La maison positive. (s. d.). <https://www.maisonpositive.com/>

Label produit Biosourcé. (s. d.). <https://produitbiosource.eu/>

Laine de lin. (s. d.). Eurabo. <https://www.eurabo.be/fr/lexique/Laine-de-lin>

Le Miscanthus : la ressource de l'avenir. (s. d.).
https://www.promisc.be/Promis/Le_Miscanthus_la_ressource_de_lavenir.html

Lepousez, V., & Aboukrat, M. (2022, juillet). *Les scénarios SSP / Carbone 4.*
<https://www.carbone4.com/publication-scenarios-ssp-adaptation>

Ma, Y., Shamsi, M. H., Sharifi, M., Kouti, A., Lauwaet, D., & Verbeke, S. (2023). A district level analysis for evaluating the future summer overheating in Belgium. *Building Simulation Conference Proceedings*, 18. [https://doi.org/10.26868/25222708.2023.1325\\$](https://doi.org/10.26868/25222708.2023.1325$)

Maison Passive. (2022a, 26 juillet). *Statistiques / Plate-forme Maison Passive by Objectif Zéro.* Plate-forme Maison Passive By Objectif Zéro. <https://www.maisonpassive.be/les-projets-certifies-passifs/statistiques/>

Maison Passive. (2022b, 28 juillet). *Les principes du passif / Plate-forme Maison Passive by Objectif Zéro.* Plate-forme Maison Passive By Objectif Zéro. <https://www.maisonpassive.be/le-passif-en-belgique/quest-ce-quun-batiment-passif/>

Maison Passive. (2024, 29 janvier). *Critères Pour le résidentiel neuf / Plate-forme Maison Passive by Objectif Zéro.* Plate-forme Maison Passive By Objectif Zéro. <https://www.maisonpassive.be/le-passif-en-belgique/les-criteres-du-passif/pour-le-residentiel-neuf/>

Menet, J. (2014). *Étude de l'impact environnemental de murs pourvus d'isolants «biosourcés» issus de déchets agricoles.* <https://hal.science/hal-01078070v1>


Mouton, L., Ramon, D., Trigaux, D., Allacker, K., & Crawford, R. H. (2024). Life cycle environmental benchmarks for Flemish dwellings. *Environmental Research Infrastructure And Sustainability*, 4(1), 015005. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad1bb7>

Multizone building modeling with Type56 and TRNBuild - Volume 5 (Trnsys 18). (s. d.). [Logiciel d'ordinateur].

- NETO, J. (2022, août). *Les différents usages possibles du miscanthus et du switchgrass hors paillages agricoles* (Par C. LOBRY). Chambre D'agriculture Landes. Consulté le 27 mars 2025, à l'adresse https://landes.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Nouvelle-Aquitaine/101_Inst-Landes/Documents/techniques_et_innovations/PV/Miscanthus/miscanthus_utilisation_construction.pdf
- Novabiom. (2014). *Isoler sa maison avec du miscanthus !* [Vidéo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=xSQQPO5iKIs>
- Organisation Météorologique Mondiale. (2025, 19 mars). *Un rapport de l'OMM fait état de l'aggravation des effets du temps et du climat* [Communiqué de presse]. Consulté le 16 avril 2025, à l'adresse <https://wmo.int/fr/news/media-centre/un-rapport-de-lomm-fait-etat-de-laggravation-des-effets-du-temps-et-du-climat>
- Passive House Institute. (2023). *Criteria for buildings : Passive House - ENERPHIT - PHI Low energy building* (Version 10c). https://passiv.de/downloads/03_building_criteria_en.pdf
- Passive House Institute (s. d.). *Building Certification Guide* - Passive House Institute. https://passivehouse.com/03_certification/02_certification_buildings/09_guide/09_guide.html
- “PHPP – Passive House Planning Package” (2025, 27 mars). Dans Passipedia https://passipedia.org/planning/calculating_energy_efficiency/phpp_the_passive_house_planning_package
- Pons Ribera, S. (2025). Bio-based materials as a robust solution for building renovation. Dans *Elsevier eBooks* (p. 65-88). <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-23974-8.00009-x>
- Rahif, R., Amaripadath, D., & Attia, S. (2021). Review on Time-Integrated Overheating Evaluation Methods for Residential Buildings in Temperate Climates of Europe. *Energy And Buildings*, 252, 111463. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111463>

- Rahif, R., Fani, A., Kosinski, P., & Attia, S. (2021). Climate change sensitive overheating assessment in dwellings : a case study in Belgium. *Building Simulation Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30125>
- Rahif, R. (2023). Impact of Climate Change on High-Performance Belgian Houses: Thermal Comfort, HVAC Energy Performance, and HVAC GHG Emissions [Doctoral thesis, ULiège - University of Liège]. ORBi-University of Liège. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/303336>
- Recticel insulation. (2025). *Powerroof® / Recticel Insulation*. Recticel Insulation. https://www.recticelinsulation.com/sites/default/files/downloads/FicheTechnique_Powerroof_230804.pdf?name=CR_LT_fiche_technique_powerroof_BEFR
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., . . . Tavoni, M. (2016). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications : An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Robine, J., Cheung, S. L. K., Roy, S. L., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J., & Herrmann, F. R. (2007). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies*, 331(2), 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2007.12.001>
- Robine, J., Cheung, S. L. K., Roy, S. L., Van Oyen, H., & Herrmann, F. R. (2007). Report on excess mortality in Europe during summer 2003. *EU Community Action Programme For Public Health, Grant Agreement 2005114*. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Report%20on%20excess%20mortality%20in%20Europe%20during%20summer%202003&journal=EU%20Community%20Action%20Program.%20Public%20Health%20Grant%20Agreement.&volume=2005114&publication_year=2007&author=Robine%2CJ-M&author=Cheung%2CSL&author=Roy%2CS&author=Oyen%2CH&author=Herrmann%2CFR
- Rogiest, C. (s.d.) Cahier spécial des charges du marché public de service ayant pour objet l'étude de 2 maison à énergie positive dans le cadre du projet vallEnergie

- Rondin, M. (2022). *Sur les traces d'une nouvelle filière dans le secteur du bâtiment : le miscanthus* [Mémoire de master, ENSA Nantes]. HAL open science. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03855107v1>
- Saeed, S., Brisson, E., Demuzere, M., Tabari, H., Willems, P., & Van Lipzig, N. P. M. (2016). Multidecadal convection permitting climate simulations over Belgium : sensitivity of future precipitation extremes. *Atmospheric Science Letters*, 18(1), 29-36. <https://doi.org/10.1002/asl.720>
- SAMB. (s. d.). *Fiche technique - DESCRIPTIF BOIS MASSIFS*. <https://document.samb-ing.fr/47/47/supports/12989/catDoc147/descriptif-bois-massif-v2.pdf>
- Sedlmeier, K., Feldmann, H., & Schädler, G. (2017). Compound summer temperature and precipitation extremes over central Europe. *Theoretical And Applied Climatology*, 131(3-4), 1493-1501. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2061-5>
- Service Changements climatiques. (s. d.-a). *Changements observés*. Klimaat | Climat. <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/changements-observees>
- Service Changements climatiques. (s. d.-b). *Réchauffement planétaire*. Klimaat | Climat. <https://climat.be/changements-climatiques/changements-observees/rechauffement-planetaire>
- Service Changements climatiques. (s. d.-c). *Rapports du GIEC* <https://climat.be/changements-climatiques/changements-observees/rapports-du-giec>
- Schulte, M., Lewandowski, I., Pude, R., & Wagner, M. (2021). Comparative life cycle assessment of bio-based insulation materials : Environmental and economic performances. *GCB Bioenergy*, 13(6), 979-998. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12825>
- Spw. Environnement (s. d.). *Le bois, matériau durable*. L'Environnement En Wallonie. <https://environnement.wallonie.be/home/milieus/forets-et-nature/forets-wallonnes/production-de-bois/le-bois-materiau-durable.html>
- Suray, C. (2025). Évaluation du potentiel d'isolation biosourcé des maisons en Wallonie à partir des ressources agricoles régionales [Mémoire de master, Université de Liège]. MatheO. <http://hdl.handle.net/2268.2/22313>

Taka Yaka. (2018, 15 septembre).  *SUPER ISOLANT maison Écologique EN HERBE Gramitherm ! PASSIBAT 2018* [Vidéo]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=RQ55YFXz6Jk>

Tettey, U. Y. A., Dodoo, A., & Gustavsson, L. (2018). Design strategies and measures to minimise operation energy use for passive houses under different climate scenarios. *Energy Efficiency*, 12(1), 299-313. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9719-4>

“The Passive House – historical review” (2022, 27 août) Dans Passipedia [The Passive House – historical review \[Passipedia EN\]](#)

“The Passive House Classes : Classic, Plus and Premium” (2024, 19 avril). Dans Passipedia https://passipedia.org/certification/passive_house_categories

TOTEM (3.3.5). (2025). [Logiciel d’ordinateur].

Trachte, S. (2024). Les matériaux bio et géosourcés, mise en contexte pour lever les aprioris [Paper presentation]. Séminaire Bruxelles Environnement "Matériaux bio & géo-sourcés : catalogue d’inspirations", Bruxelles, Belgium.

Trachte, S., & Stiernon, D. (2023). Isolant thermique en rénovation : Réaliser un choix équilibré entre confort, performance énergétique, approche environnementale et gestion circulaire des ressources.

Trnsys. (2009a). TRNFLOW Manual : A module of an air flow network for coupled simulation with TYPE 56 (multi-zone building of TRNSYS) (Version 1.4).

Trnsys. (2009b). TRNSYS 18 : Standard Component Library Overview [Volume 3]

Trnsys (Version 18). (2017). [Logiciel d’ordinateur].

United Nations Environmental Programme (2022) 2022 Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. United Nations Environment programme, vol. 224

Unipso. (s. d.). *L’eau chaude sanitaire et le chauffage* [Diapositives]. Unipso.be.
https://www.unipso.be/IMG/pdf/seminaire_energie_unipso_04-06-2015_-_presentation_ecs_1_-_re-ecs.pdf

- Université de Liège. (2017, 13 décembre). *Le MAR, le modèle du climat qui prévoit l'évolution des précipitations hivernales en Belgique*. Consulté le 22 mars 2025, à l'adresse https://www.news.uliege.be/cms/c_9622585/fr/le-mar-le-modele-du-climat-qui-prevoit-l-evolution-des-precipitations-hivernales-en-belgique
- Valbiom. (2021a). Panorama des fibres végétales en Europe et en Wallonie : Edition 2021. <https://www.valbiom.be/outils/panorama-des-fibres-vegetales>
- Valbiom. (2021b, mars 13). *Le label « Produit biosourcé » : lancé en Wallonie*. https://www.valbiom.be/actualites/le-label-produit-biosource-lance-en-wallonie#_ftn1
- Valbiom. (2023a, 3 juillet). Etat des lieux : la laine en Wallonie en 2023 | Valbiom - Valorisation de la biomasse. <https://www.valbiom.be/actualites/etat-des-lieux-la-laine-en-wallonie-en-2023>
- Valbiom. (2023b, février 6). Filière laine : quel potentiel en Wallonie ? | Valbiom - Valorisation de la biomasse. <https://www.valbiom.be/actualites/filiere-laine-quel-potentiel-en-wallonie>
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways : an overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Wachtelaer, V. (2024). Étude du potentiel des surfaces réfléchissantes en tant que mesure d'adaptation du bâti résidentiel belge exposé aux vagues de chaleur induites par le changement climatique [Mémoire, Uliège]. <http://hdl.handle.net/2268.2/20816>
- Witzleben, S. (2022). Minimizing the Global Warming Potential with Geopolymer-Based Insulation Material with Miscanthus Fiber. *Polymers*, 14(15), 3191. <https://doi.org/10.3390/polym14153191>
- Woolconcept®. (2025, 28 février). *Woolconcept® - Isolation en laine de mouton*. <https://woolconcept.be/>
- World Meteorological Organization. (2025). *State of the global climate 2024* (WMO-No. 1368). <https://library.wmo.int/idurl/4/69455>

Zero Technologies Co., Ltd. (2024, 21 juin). *Does Setting AC to 26°C Maximize Energy Efficiency ?* [LinkedIn.] Consulté le 21 mai 2025, à l'adresse <https://www.linkedin.com/pulse/does-setting-ac-26c-maximize-energy-efficiency-zerohvacr-kcs0c/>

Annexe I : Formulaire de consentement

Université de Liège - Master ingénieur civil architecte

Formulaire de consentement pour l'utilisation de données à caractère personnel dans le cadre d'un travail de fin d'étude



Étudiant : Martin MICHAU
Etudiant à l'Université de Liège
martin.michau@student.uliege.be

Promoteur : Philippe André
Professeur à l'Université de Liège
p.andre@uliege.be

Vous avez participé comme source au travail de fin d'études de Martin MICHAU en lui communiquant des données propres à votre entreprise. Celui-ci vise à étudier l'impact des isolants biosourcés sur l'aspect environnemental et le comportement thermique de l'enveloppe des maisons passives face au changement climatique.

En signant ce formulaire, vous consentez à l'utilisation des données récoltées selon les modalités définies ci-après :

– Les données collectées ne serviront que dans le cadre du travail de recherche. Vous gardez le droit de refuser que votre nom soit associé à ces données. Dans le cas d'un refus de votre part, ces données seront anonymisées de manière à ce que toute post-identification soit alors impossible.

Je soussigné(e) _____ (prénom et nom), déclare avoir bien pris connaissance et avoir compris les informations reprises ci-dessus. Je marque mon accord pour participer à cette étude. J'ai reçu une copie de ce formulaire.

Je donne la permission pour que les informations délivrées par mails soient reprises dans le travail de fin d'étude (entourer votre choix).

- Mon nom
- Des citations directes issues de communications écrites, associées à mon nom / entreprise
- Des citations directes issues de communications écrites, mais sans association à ma personne / mon entreprise
- Je refuse que ces données soient utilisées

Date et signature de l'intervenant

Date et signature de l'étudiant

Annexe II : Normes ASHRAE – Gains par activité

18.4

2013 ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI)

Table 1 Representative Rates at Which Heat and Moisture Are Given Off by Human Beings in Different States of Activity

Degree of Activity	Location	Total Heat, W		Sensible Heat, W	Latent Heat, W	% Sensible Heat that is Radiant ^b	
		Adult Male	Adjusted, M/F ^a			Low <i>V</i>	High <i>V</i>
Seated at theater	Theater, matinee	115	95	65	30		
Seated at theater, night	Theater, night	115	105	70	35	60	27
Seated, very light work	Offices, hotels, apartments	130	115	70	45		
Moderately active office work	Offices, hotels, apartments	140	130	75	55		
Standing, light work; walking	Department store; retail store	160	130	75	55	58	38
Walking, standing	Drug store, bank	160	145	75	70		
Sedentary work	Restaurant ^c	145	160	80	80		
Light bench work	Factory	235	220	80	140		
Moderate dancing	Dance hall	265	250	90	160	49	35
Walking 4.8 km/h; light machine work	Factory	295	295	110	185		
Bowling ^d	Bowling alley	440	425	170	255		
Heavy work	Factory	440	425	170	255	54	19
Heavy machine work; lifting	Factory	470	470	185	285		
Athletics	Gymnasium	585	525	210	315		

Notes:

1. Tabulated values are based on 24°C room dry-bulb temperature. For 27°C room dry bulb, total heat remains the same, but sensible heat values should be decreased by approximately 20%, and latent heat values increased accordingly.

2. Also see Table 4, Chapter 9, for additional rates of metabolic heat generation.

3. All values are rounded to nearest 5 W.

^aAdjusted heat gain is based on normal percentage of men, women, and children for the application listed, and assumes that gain from an adult female is 85% of that for an adult male, and gain from a child is 75% of that for an adult male.

^bValues approximated from data in Table 6, Chapter 9, where *V* is air velocity with limits shown in that table.

^cAdjusted heat gain includes 18 W for food per individual (9 W sensible and 9 W latent).

^dFigure one person per alley actually bowling, and all others as sitting (117 W) or standing or walking slowly (231 W).

Annexe III : EPBD – Données produits PEB – Protections solaires

Marque	Nom du produit	ID_produit	Classification produit	Gamme d'épaisseur		
Merk	Productnaam	Product_ID	Product classificatie	Dikterange		$\lambda_{U,i}$
				min	max	
				m	m	W/m.K
<u>Woolconcept</u>	BELGOLAN	BELGOLAN	1.1.1.14	0,04	0,12	0,039

Annexe IV : Parois non modifiées et conservées

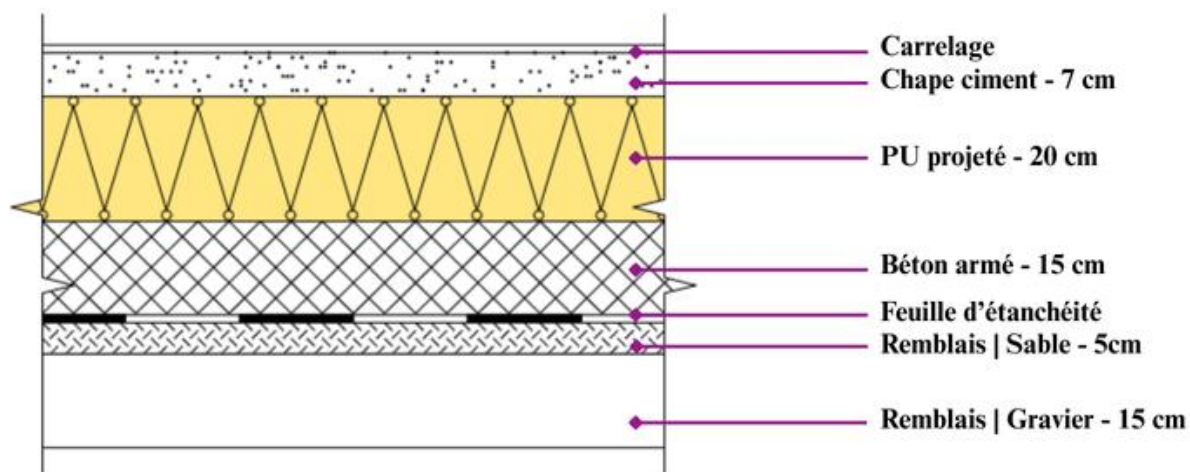


Figure 47 : Plancher sol - Composition massive et légère

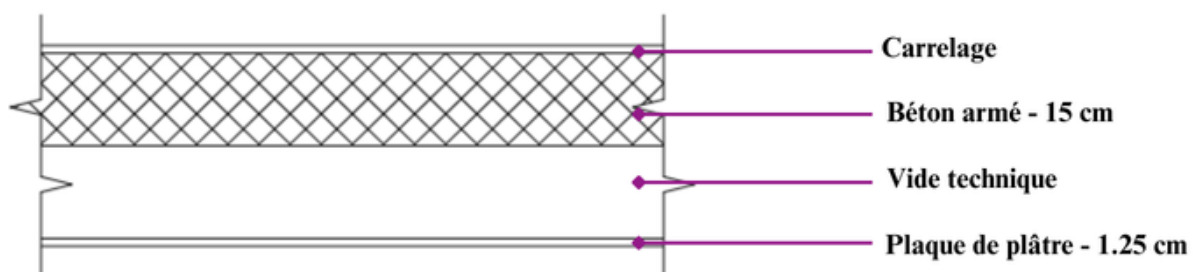


Figure 48 : Plancher étage - Composition massive et légère

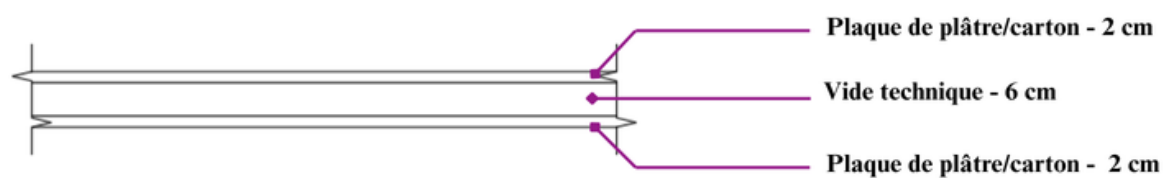


Figure 49 : Mur intérieur non porteur - Composition massive

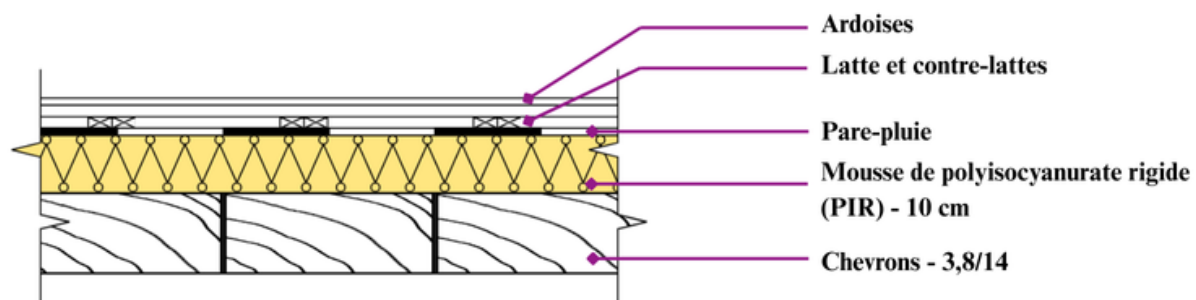


Figure 50 : Toiture non isolée - Composition massive

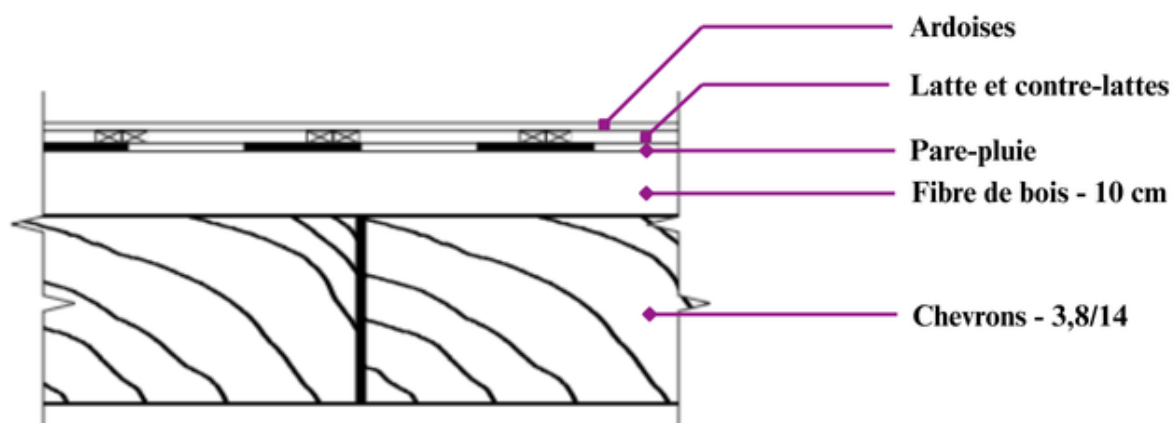


Figure 51 : Toiture non isolée - Composition légère

Annexe V : Parois modifiées

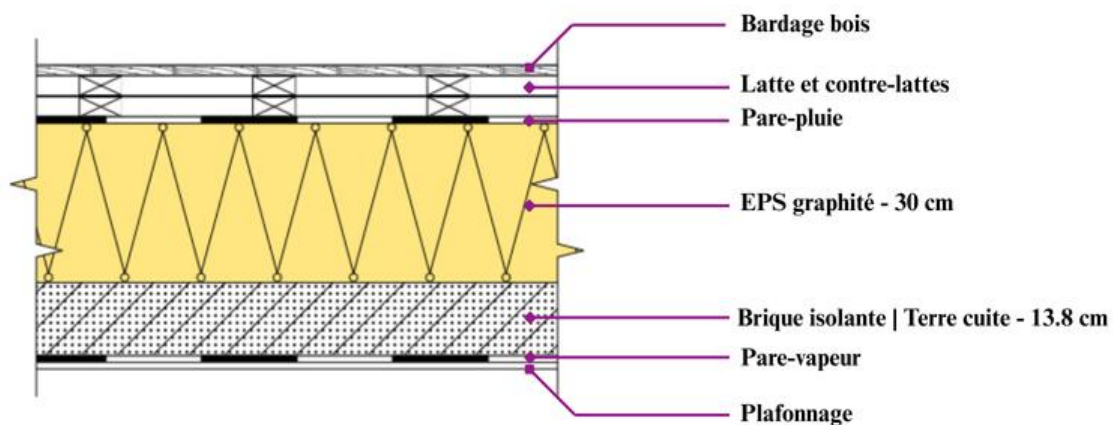


Figure 52 : Mur extérieur initial (EPS graphité) - Composition massive

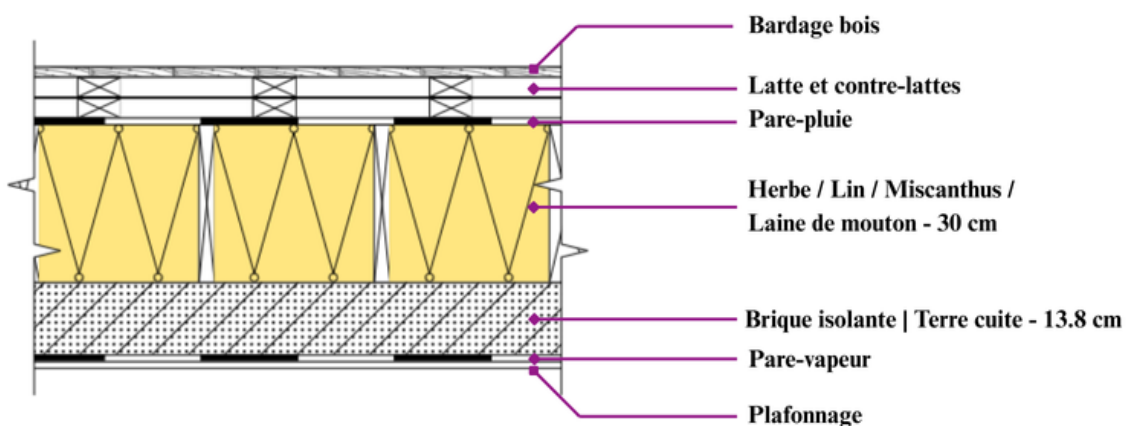


Figure 53 : Mur extérieur biosourcée - Composition massive

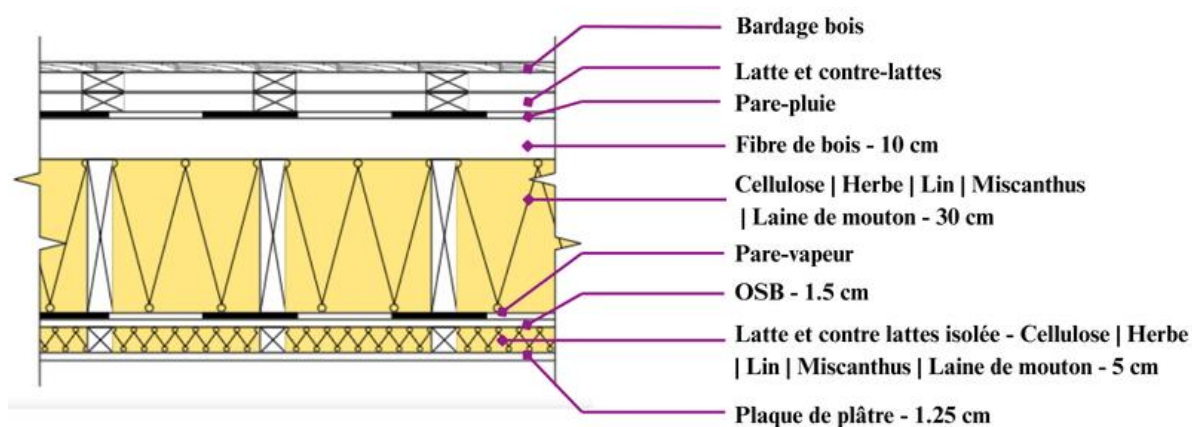


Figure 54 : Mur extérieur initial (Cellulose) et biosourcée - Composition légère

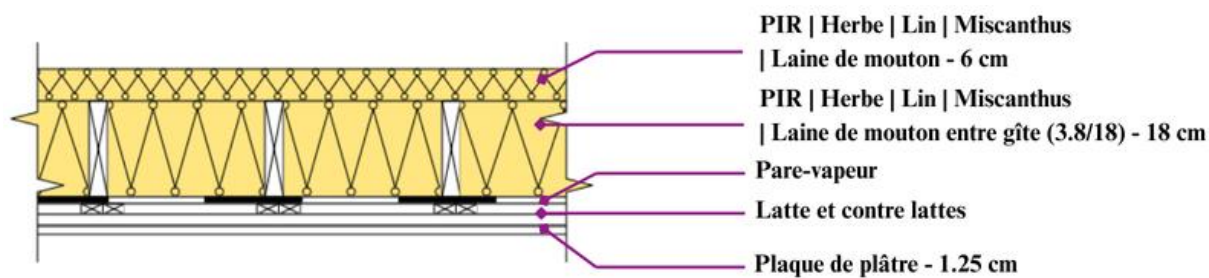


Figure 55 : Plancher combles initial (PIR) et biosourcée - Composition massive

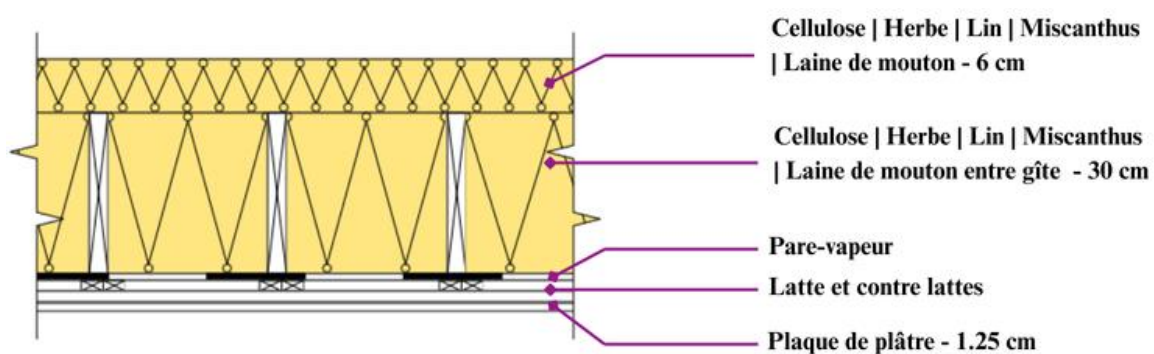


Figure 56 : Plancher combles initial (Cellulose) et biosourcée - Composition légère

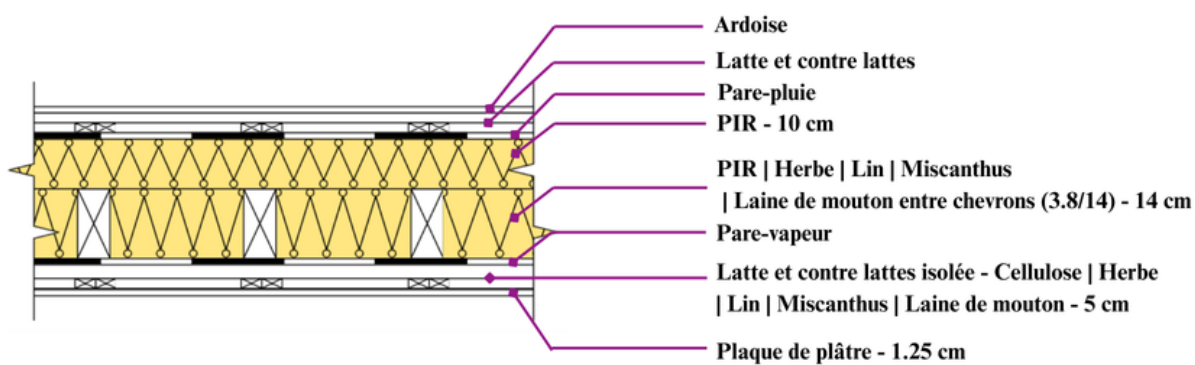


Figure 57 : Toiture isolée initial (PIR) et biosourcée - Composition massive

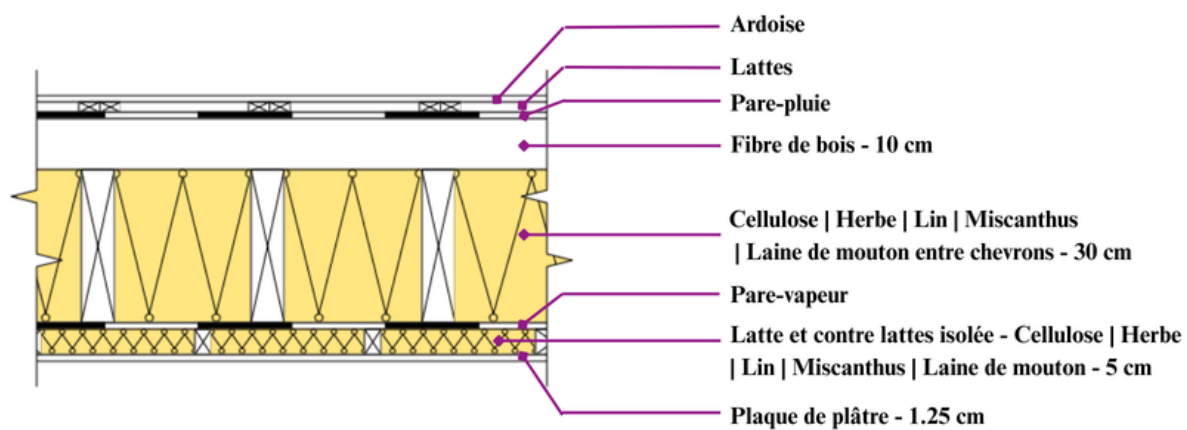


Figure 58 : Toiture isolée initiale (PIR) et biosourcée - Composition légère

Annexe VI : Rapport bois/isolant des parois

Type de paroi : Mur



Tableau des couches

#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	R [m²K/W]
1	Simple	Mortier de ciment (Plâtres, mortiers et enduits) - U: 1.5	0,020	0,013
2	Simple	Steico Protect (265).ref - U: 0.048	0,100	2,083
3	Composée	15% de Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - U: 0.13 85% de ISOFLC / Flocons de cellulose - U: 0.039	0,300	5,698
4	Simple	Panneau d'OSB (Oriented Strand Board) (Bois et dérivés de bois) - U: 0.13	0,015	0,115
5	Composée	15% de Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - U: 0.13 85% de Homatherm flex.ref - U: 0.039	0,025	0,475
6	Simple	Air non ventilé (Air)	0,025	0,180
7	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	0,014	0,050

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Exigence
B- ME bois + enduit	81,04	Environnement extérieur	0,11		✓

Figure 59 : Composition légère - Mur extérieur – Rapport PEB

Type de paroi : Plancher/Plafond



Tableau des couches

#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	R [m²K/W]
1	Simple	Recticel Insulation / Powerroof - U: 0.024	0,060	2,500
2	Composée	11% de Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - U: 0.13 89% de Recticel Insulation / Powerroof - U: 0.024	0,180	5,048
3	Simple	Air non ventilé (Air)	0,050	0,160
4	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	0,014	0,050

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Exigence
A- plafond étage	44,08	Espace adjacent non chauffé	0,09		✓

Figure 60 : Composition massive/légère - Plancher combles – Rapport PEB

Type de paroi : Toiture



Tableau des couches

#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	R [m²K/W]
1	Simple	Air fortement ventilé (Air)	-	0,000
2	Simple	Recticel Insulation / Powerroof - U: 0.024	0,100	4,167
3	Composée	20% de Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - U: 0.13 80% de Recticel Insulation / Powerroof - U: 0.024	0,140	3,097
4	Simple	Air non ventilé (Air)	0,050	0,160
5	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	0,014	0,050

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Exigence
A- toiture inclinée	32,23	Environnement extérieur	0,13		✓

Figure 61 : Composition massive/légère – Toiture non isolée – Rapport PEB

Annexe VII : Mur intérieur modifié

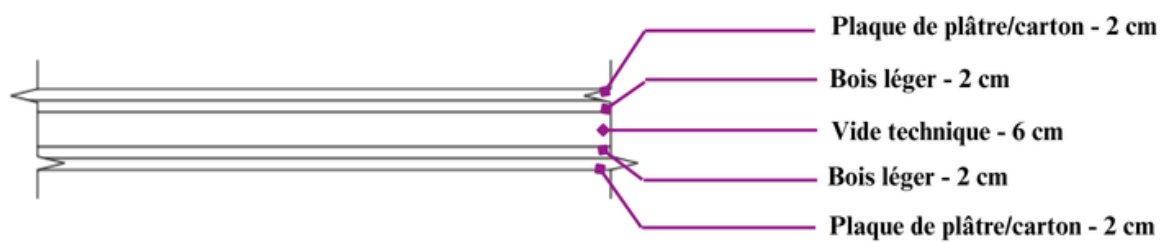


Figure 62 : Composition légère - Mur intérieur

Annexe VIII : Fiche technique de la PAC choisie

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES & PERFORMANCES

DÉSIGNATION	UNITÉ	ALFÉA EXTENSA A.I R32									
		5	6	8	10	DUO 3	DUO 5	DUO 6	DUO 8	DUO 10	
Référence		526 331	526 332	526 333	526 334	526 340	526 341	526 342	526 343	526 344	
Réfrigérant		R32	R32	R32	R32	R32	R32	R32	R32	R32	
CARACTÉRISTIQUES ET PERFORMANCES CHAUFFAGE											
Classe énergétique - chauffage (35°C/55°C) package	/	A+++/A++	A+++/A++	A+++/A++	A+++/A++	A+++/A+	A+++/A++	A+++/A++	A+++/A++	A+++/A++	A+++/A++
Puissance thermique (35°C/55°C) ⁽¹⁾	kW	5/5	6/5	7/6	9/8	4/4	5/5	6/5	7/6	9/8	
Consommation annuelle d'énergie - chauffage (35°C/55°C)	kWh	2322/3035	2594/3411	2982/3903	3875/5083	2040/2715	2322/3035	2594/3411	2982/3903	3875/5083	
Efficacité énergétique saisonnière - chauffage (35°/55°) ⁽¹⁾	%	175/125	175/125	177/128	178/130	175/119	175/125	175/125	177/128	178/130	
Efficacité énergétique saisonnière - chauffage (35°/55°) avec sonde extérieure	%	177/127	177/127	179/130	180/132	177/121	177/127	177/127	179/130	180/132	
Puissance acoustique (intérieur/extérieur) ⁽¹⁾	dB(A)	40/57	40/57	40/60	42/62	40/57	40/57	40/57	40/60	42/62	
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES											
SCOP 35 °C/55 °C		4,45/3,20	4,44/3,21	4,5/3,28	4,53/3,33	4,46/3,04	4,45/3,20	4,44/3,21	4,5/3,28	4,53/3,33	
Puissance calorifique +7°C/+35°C - PC	kW	4,50	5,50	7,50	9,50	3,35	4,50	5,50	7,50	9,50	
COP +7°C/+35°C - PC		4,74	4,65	4,43	4,50	4,89	4,74	4,65	4,43	4,50	
Puissance calorifique -7°C/+35°C - PC	kW	4,40	5,00	5,70	8,90		4,40	5,00	5,70	8,90	
Puissance absorbée -7°C/+35°C - PC	kW	1,59	1,90	2,13	3,36	Nous consulter	1,59	1,90	2,13	3,36	
COP -7°C/+35°C - PC		2,76	2,63	2,68	2,65		2,76	2,63	2,68	2,65	
Puissance calorifique +7°C/+55°C - Rad	kW	4,50	5,50	7,00	9,00	3,70	4,50	5,50	7,00	9,00	
COP +7°C/+55°C - Rad		2,64	2,67	2,66	2,70	2,63	2,64	2,67	2,66	2,70	
Puissance calorifique -7°C/+55°C - Rad	kW	3,90	4,25	5,30	8,00	Nous consulter	3,90	4,25	5,30	8,00	
COP -7°C/+55°C - Rad		1,85	1,89	1,90	1,95	Nous consulter	1,85	1,89	1,90	1,95	
Puissance appoint électrique	kW	3/6 ⁽²⁾	3/6 ⁽²⁾	3/6 ⁽²⁾	3/6 ⁽²⁾	3/6 ⁽²⁾	3/6 ⁽²⁾	3/6 ⁽²⁾	3/6 ⁽²⁾	3/6 ⁽²⁾	
MODULE INTÉRIEUR											
Niveau sonore ⁽³⁾	dB(A)	32	32	32	34	32	32	32	32	34	
Poids à vide/en eau	kg	45/61	45/61	45/61	45/61	145/359	145/359	145/359	145/359	145/359	
CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES											
Contenance ballon échangeur	L	16	16	16	16	16	16	16	16	16	
Contenance vase expansion	L	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
Diamètres Entrée et Sortie circuit chauffage (filetage mâle)	pouce	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Plage de fonctionnement conseillée mini/ maxi - mode chaud	°C	-20/+35	-20/+35	-20/+35	-20/+35	-20/+35	-20/+35	-20/+35	-20/+35	-20/+35	
RACCORDEMENTS ÉLECTRIQUES											
Alimentation	V/Hz	230/50	230/50	230/50	230/50	230/50	230/50	230/50	230/50	230/50	
Consommation veille	W	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
Calibre disjoncteurs appoints PAC courbe C ⁽⁴⁾	A	16/32 ⁽²⁾	16/32 ⁽²⁾	16/32 ⁽²⁾	16/32 ⁽²⁾	16/32 ⁽²⁾	16/32 ⁽²⁾	16/32 ⁽²⁾	16/32 ⁽²⁾	16/32 ⁽²⁾	
Câble d'alimentation appoints PAC ⁽⁵⁾	mm ²	3G1,5/3G6 ⁽²⁾	3G1,5/3G6 ⁽²⁾	3G1,5/3G6 ⁽²⁾	3G1,5/3G6 ⁽²⁾	3G1,5/3G6 ⁽²⁾	3G1,5/3G6 ⁽²⁾	3G1,5/3G6 ⁽²⁾	3G1,5/3G6 ⁽²⁾	3G1,5/3G6 ⁽²⁾	
GROUPE EXTÉRIEUR FUJITSU											
Niveau sonore ⁽¹⁾	dB(A)	35	35	38	40	35	35	35	38	40	
Poids en fonctionnement	kg	39	39	42	62	39	39	39	42	62	
CARACTÉRISTIQUES FRIGORIFIQUES											
Diamètre gaz	pouce	1/2	1/2	1/2	5/8	1/2	1/2	1/2	1/2	5/8	
Diamètre liquide	pouce	1/4	1/4	1/4	3/8	1/4	1/4	1/4	1/4	3/8	
Charge usine en fluide frigorigène HFC R32	g	970	970	1 020	1 630	970	970	970	1 020	1 630	
Quantité en tonne équivalent CO ₂	t	0,65	0,65	0,69	1,10	0,65	0,65	0,65	0,69	1,10	
Longueur mini/ maxi	m	3/30	3/30	3/30	3/30	3/30	3/30	3/30	3/30	3/30	
Dénivelé maxi	m	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
Longueur maxi sans complément de charge	m	15	15	15	20	15	15	15	15	20	
Masse de gaz à rajouter par m supplémentaire	g	25	25	25	20	25	25	25	25	20	
RACCORDEMENTS ÉLECTRIQUES											
Alimentation	V/Hz	230/50	230/50	230/50	230/50	230/50	230/50	230/50	230/50	230/50	
Consommation veille	W	38	38	38	38	38	38	38	38	38	
Intensité maximale	A	13	13	18	19	13	13	13	18	19	
Calibre disjoncteurs courbe C ⁽³⁾	A	16	16	20	32	16	16	16	20	32	
Câble d'alimentation groupe extérieur ⁽³⁾	mm ²	3G1,5	3G1,5	3G2,5	3G4 ou 3G6	3G1,5	3G1,5	3G1,5	3G2,5	3G4 ou 3G6	
Câble d'interconnexion groupe extérieur-Module Intérieur	mm ²	4G1,5	4G1,5	4G1,5	4G1,5	4G1,5	4G1,5	4G1,5	4G1,5	4G1,5	

ALFÉA EXTENSA DUO A.I R32

DÉSIGNATION	UNITÉ	ALFÉA EXTENSA DUO A.I 3 R32	ALFÉA EXTENSA DUO A.I 5 R32	ALFÉA EXTENSA DUO A.I 6 R32	ALFÉA EXTENSA DUO A.I 8 R32	ALFÉA EXTENSA DUO A.I 10 R32	
CARACTÉRISTIQUES ET PERFORMANCES ECS							
Profil de soutirage - ECS ⁽¹⁾	/	L	L	L	L	L	
Classe énergétique - ECS	/	A+	A+	A+	A+	A+	
Consommation annuelle d'énergie - ECS	kWh	793	793	793	793	793	
Efficacité énergétique ECS ⁽¹⁾	%	130	130	130	130	130	
CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES ECS							
Contenance ballon ECS	L	190	190	190	190	190	
Appoint électrique ECS	kW	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	
Matériaux ballon ECS				Acier émaillé			
Période de mise en température selon EN 16 147	h/mn	1h35	1h35	1h35	1h35	1h15	
Température de référence selon EN 16 147	°C	54	54	54	54	54	
COP selon EN 16 147	/	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	
Volume max eau chaude utilisable selon EN 16 147	L	245	245	245	245	245	
Puissance réserve Pes selon EN 16 147	W	30	30	30	30	35	
RACCORDEMENTS ÉLECTRIQUES ECS							
Calibre disjoncteurs appoints ECS courbe C ⁽³⁾	A	16	16	16	16	16	
Câble d'alimentation appoints ECS ⁽³⁾	mm ²	3G1,5	3G1,5	3G1,5	3G1,5	3G1,5	

Figure 63 : Fiche technique - Pompe à chaleur Atlantic Alféa Extensa DUO A.I. R32 - Pompe à chaleur air/eau Atlantic Alféa Extensa DUO A.I. 10 R32 | [download.php](#)

Annexe IX : PAC air-air avec 5 unités intérieurs – Climatisation

Fiche de produit Règlement délégué (UE) n° 626/2011	
Nom du fournisseur ou marque commerciale	Panasonic
Référence du modèle	CS-MZ16TKE + CS-MZ16TKE + CS-MZ16TKE + CS-MZ16TKE + CS-Z25TKEW / CU-5Z90TBE
Référence(s) du modèle intérieur	CS-Z25TKEW
Référence du modèle extérieur	CU-5Z90TBE
Niveaux de puissance acoustique intérieurs (mode «refroidissement»)	54 dB
Niveaux de puissance acoustique intérieurs (mode «chauffage»)	55 dB
Niveaux de puissance acoustique extérieurs (mode «refroidissement»)	69 dB
Niveaux de puissance acoustique extérieurs (mode «chauffage»)	70 dB
Dénomination de l'agent réfrigérant	R32
PRP de l'agent réfrigérant	675
Les fuites de réfrigérants accentuent le changement climatique. En cas de fuite, l'impact sur le réchauffement de la planète sera d'autant plus limité que le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) du réfrigérant est faible. Cet appareil utilise un réfrigérant dont le PRP est égal à 675. En d'autres termes, si 1 kg de ce réfrigérant est relâché dans l'atmosphère, son impact sur le réchauffement de la planète sera 675 fois supérieur à celui d'1 kg de CO ₂ , sur une période de 100 ans. Ne tentez jamais d'intervenir dans le circuit frigorifique et de démonter les pièces vous-même et adressez-vous systématiquement à un professionnel.	
Mode «refroidissement»	
Coefficient d'efficacité énergétique saisonnier (SEER)	8,5
Classe d'efficacité énergétique	A++
Consommation annuelle d'électricité	Consommation d'énergie de 371 kWh par an, déterminée sur la base des résultats obtenus dans des conditions d'essai normalisées. La consommation d'énergie réelle dépend des conditions d'utilisation et de l'emplacement de l'appareil.
Charge nominale	9,0 kW
Mode «chauffage»	
Coefficient de performance saisonnier (SCOP) (saison moyenne)	4,7
Classe d'efficacité énergétique (saison moyenne)	A++
Consommation annuelle d'électricité (saison moyenne)	Consommation d'énergie de 2 543 kWh par an, déterminée sur la base des résultats obtenus dans des conditions d'essai normalisées. La consommation d'énergie réelle dépend des conditions d'utilisation et de l'emplacement de l'appareil.
Coefficient de performance saisonnier (SCOP) (saison plus chaude)	-
Coefficient de performance saisonnier (SCOP) (saison plus froide)	-
Classe d'efficacité énergétique (saison plus chaude)	-

Figure 64 : Fiche technique - Climatiseur Réversible Inverter Penta-Split CU-5Z90TBE PANASONIC - [Climatiseur Réversible Inverter Penta-Split CU-5Z90TBE PANASONIC](#)

Annexe X : Évolution de la surchauffe par composition/

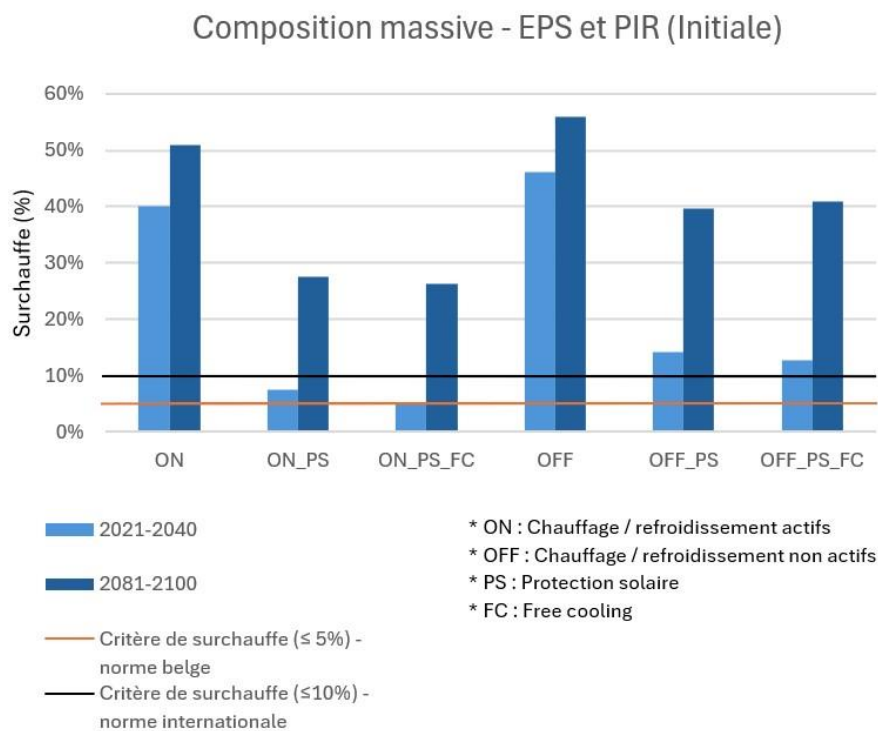


Figure 65 : Composition massive – EPS et PIR (Initiale) - Surchauffe

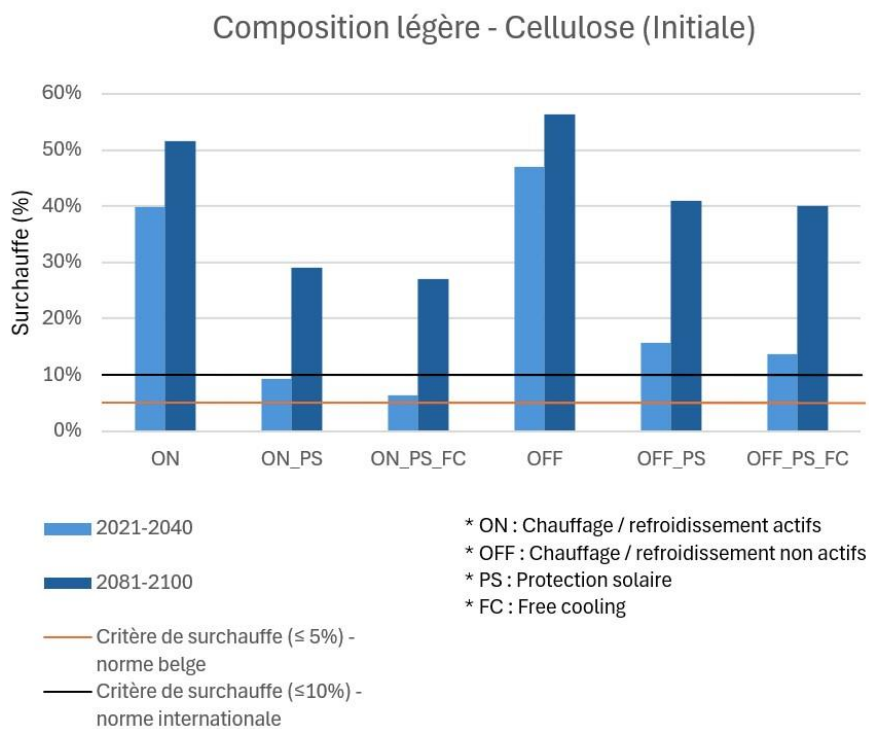


Figure 66 : Composition légère – Cellulose (Initiale) - Surchauffe

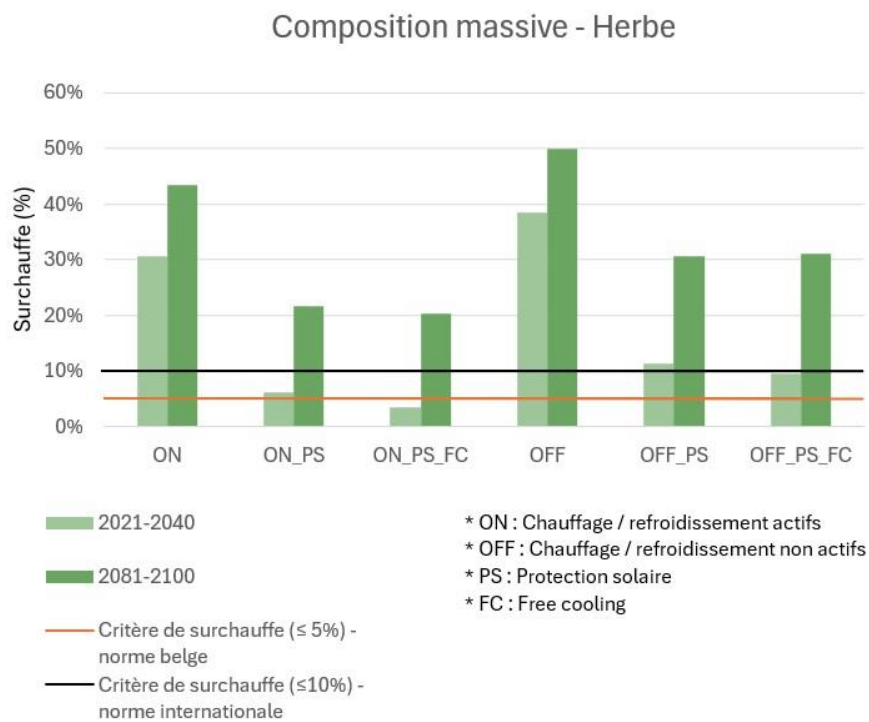


Figure 67 : Composition massive - Herbe - Surchauffe

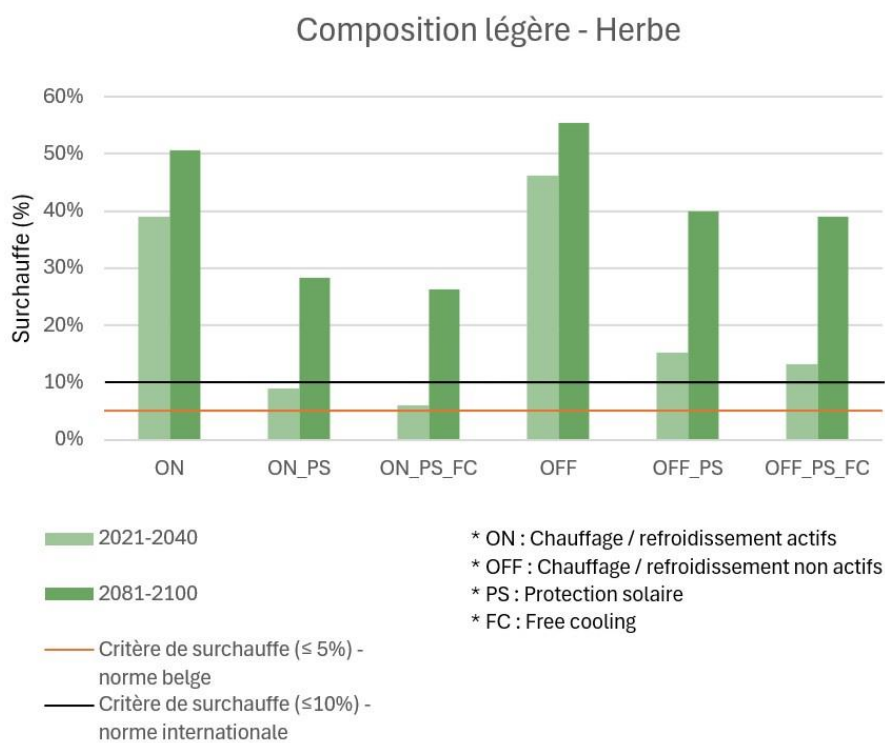


Figure 68 : Composition légère - Herbe - Surchauffe

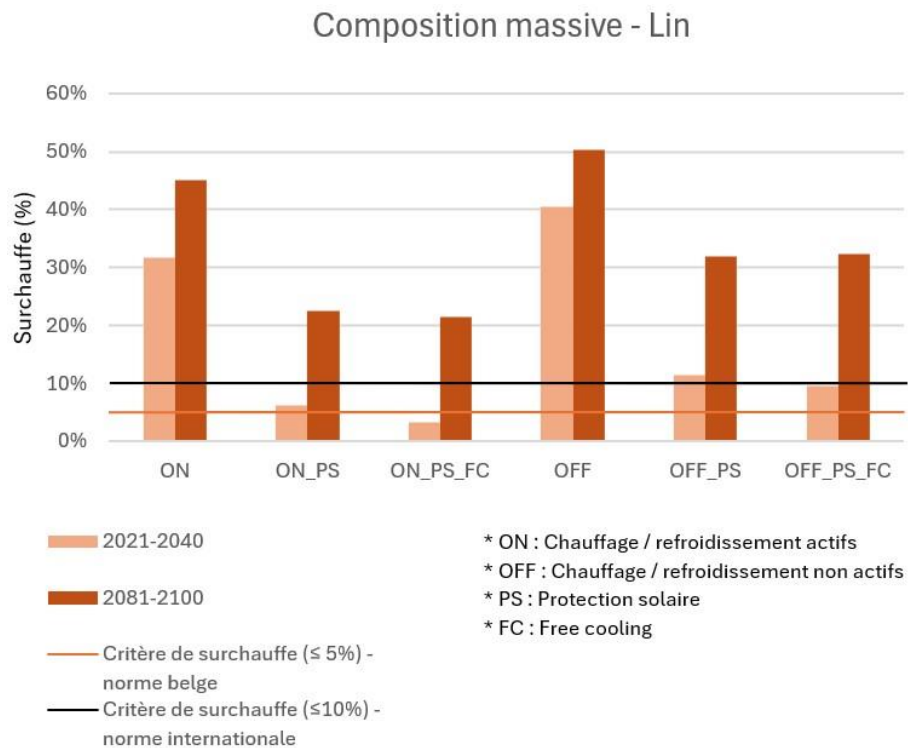


Figure 69 : Composition massive - Lin - Surchauffe

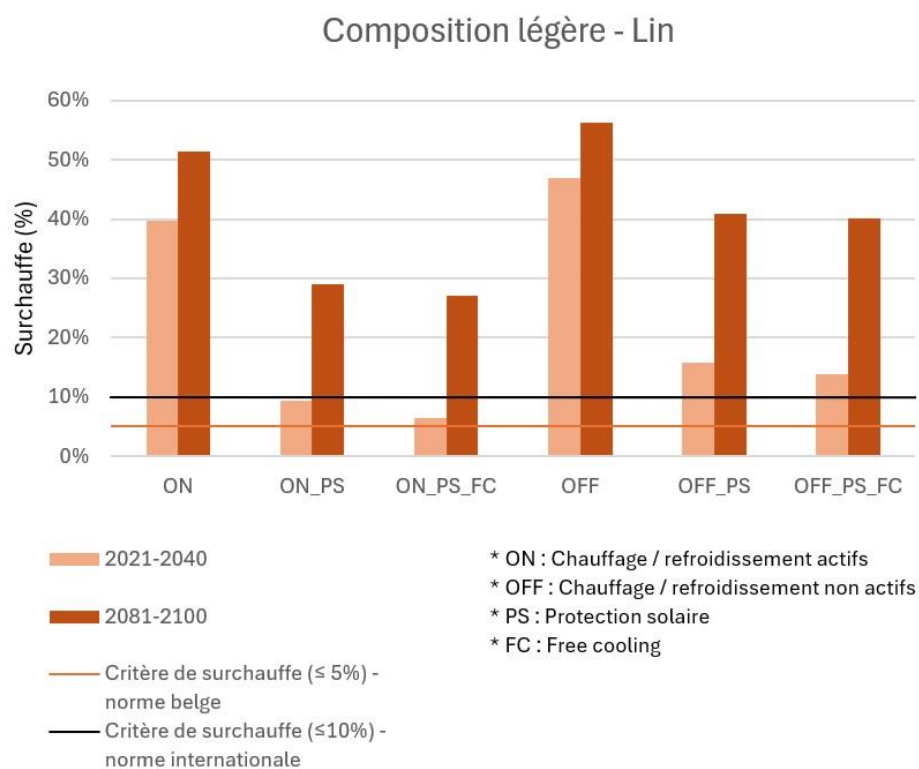


Figure 70 : Composition légère - Lin - Surchauffe

Composition massive - Miscanthus

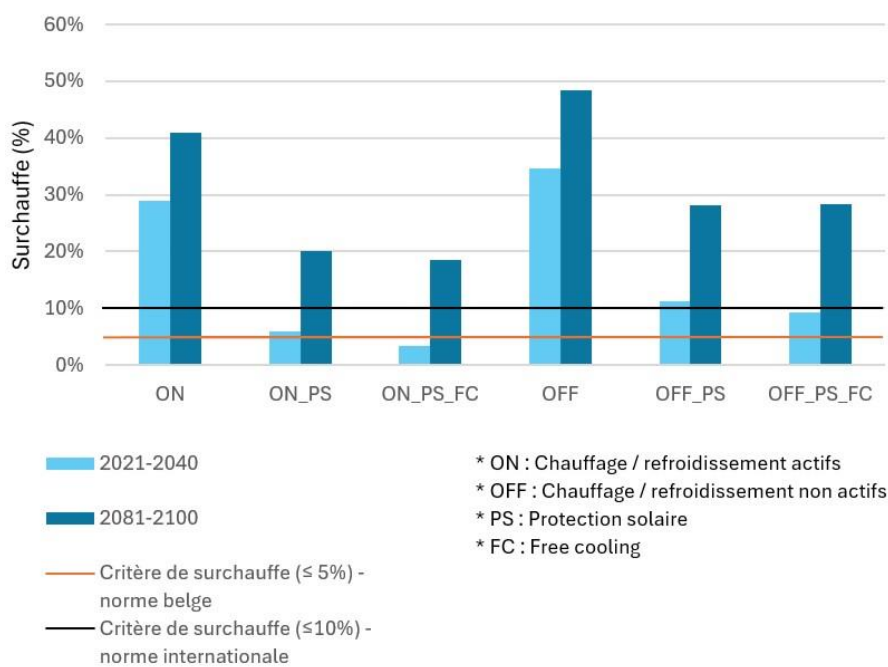


Figure 71 : Composition massive - Miscanthus - Surchauffe

Composition légère - Miscanthus

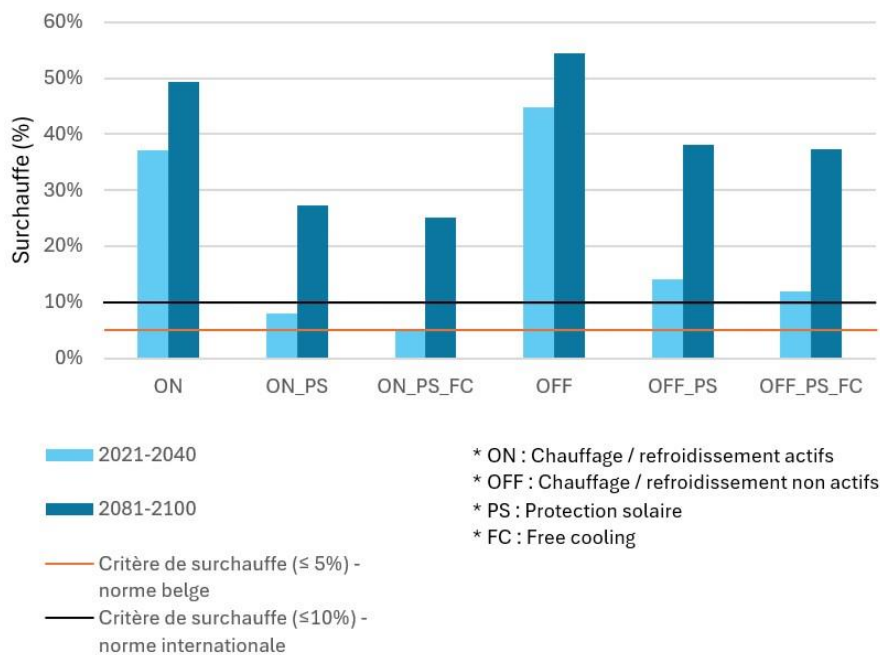


Figure 72 : Composition légère - Miscanthus - Surchauffe

Composition massive - Laine de mouton

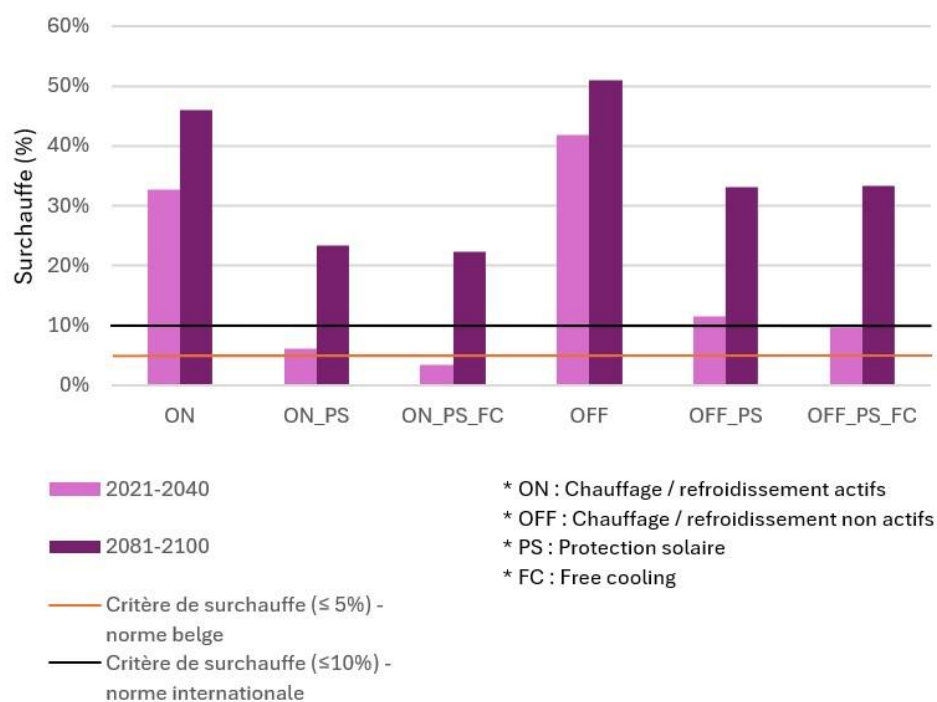


Figure 73 : Composition massive – Laine de mouton - Surchauffe

Composition légère - Laine de mouton

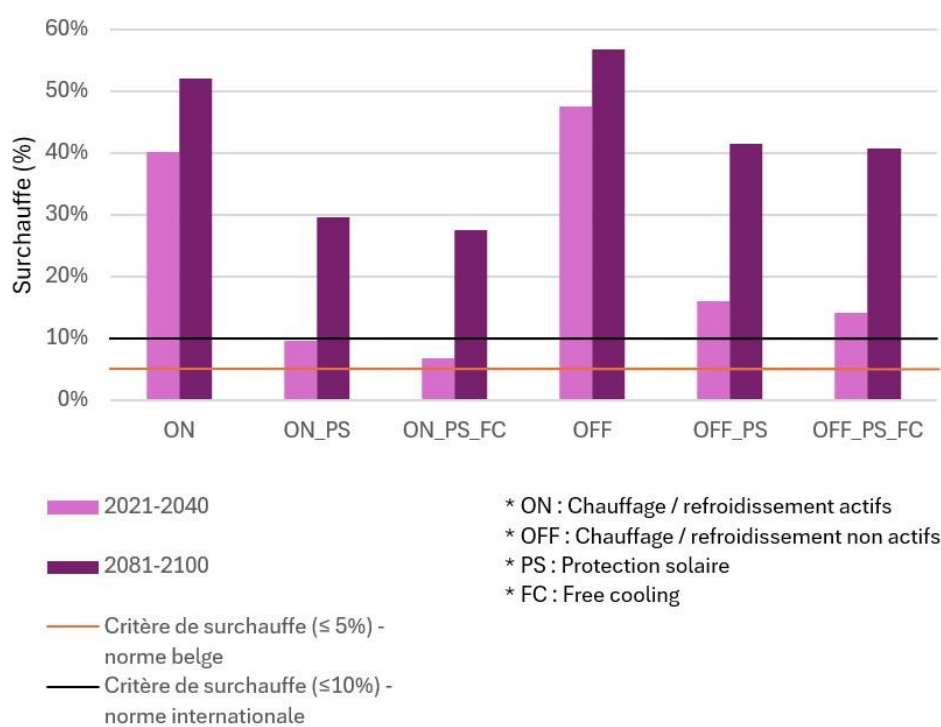


Figure 74 : Composition légère – Laine de mouton - Surchauffe

Annexe XI : Évolution de la demande énergétique annuelle de chauffage/refroidissement de chaque composition

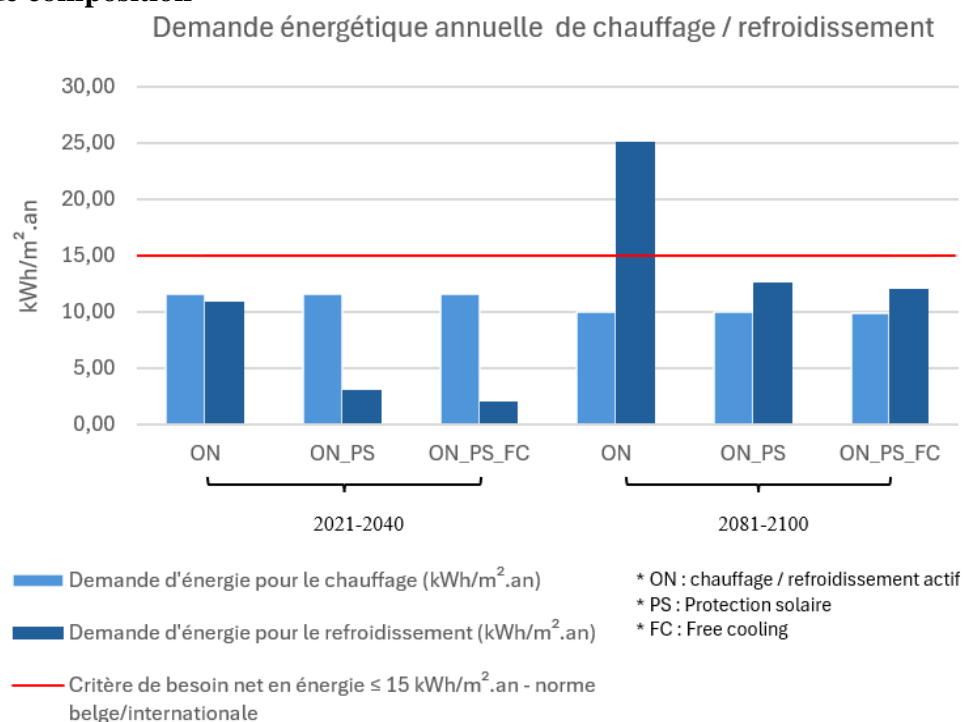


Figure 75 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition massive – EPS et PIR (Initiale)

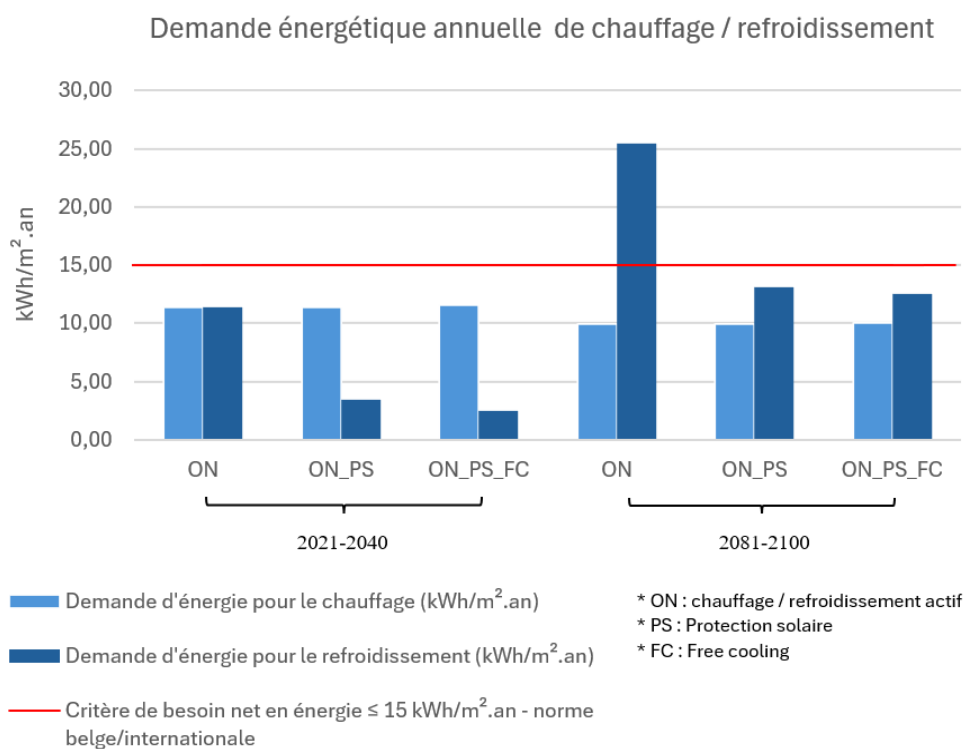


Figure 76 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition légère – Cellulose (Initiale)

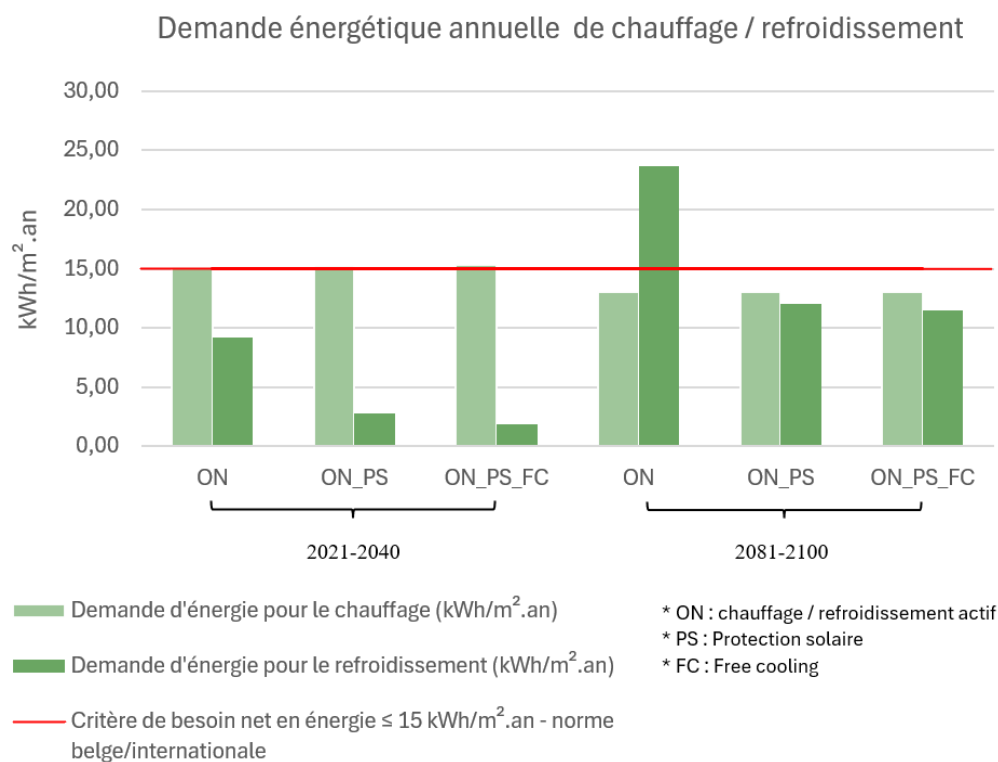


Figure 77 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition massive - Herbe

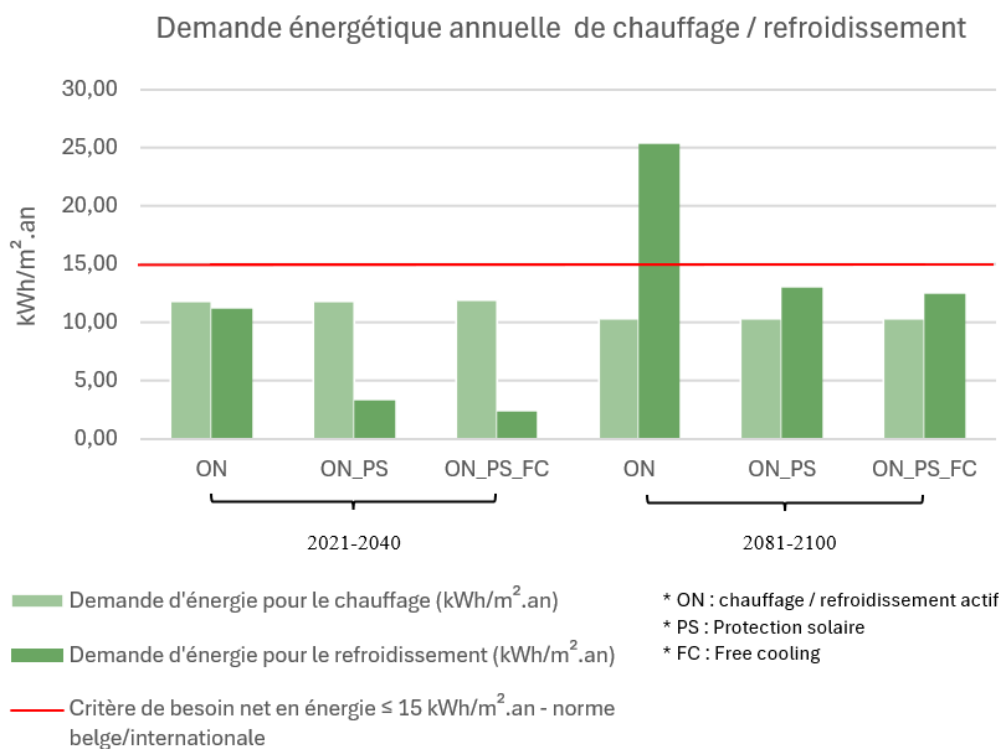


Figure 78 / Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition légère - Herbe

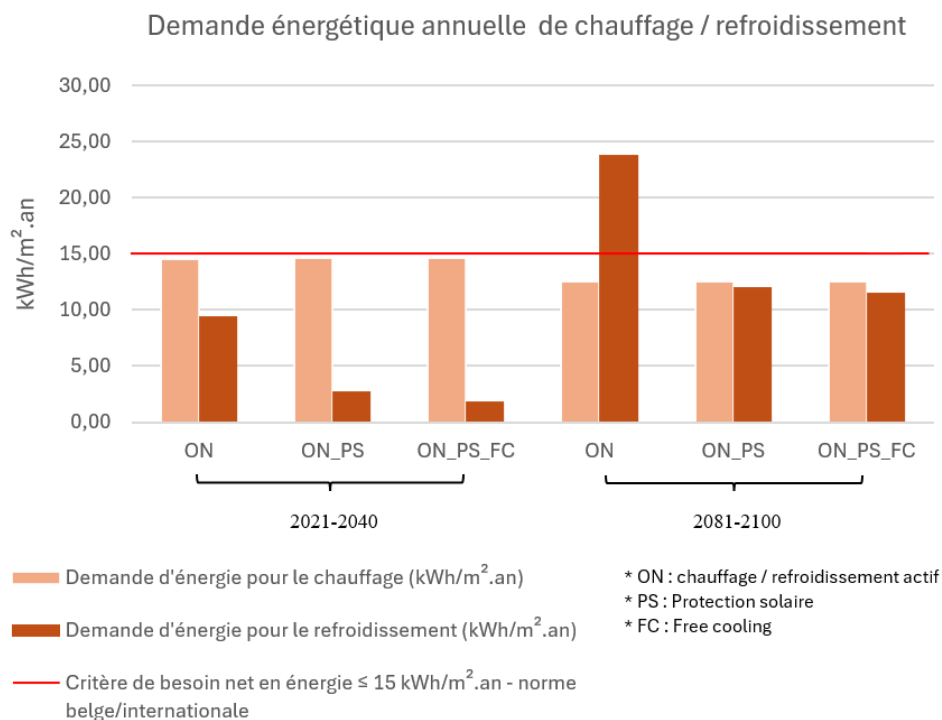


Figure 79 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition massive - Lin

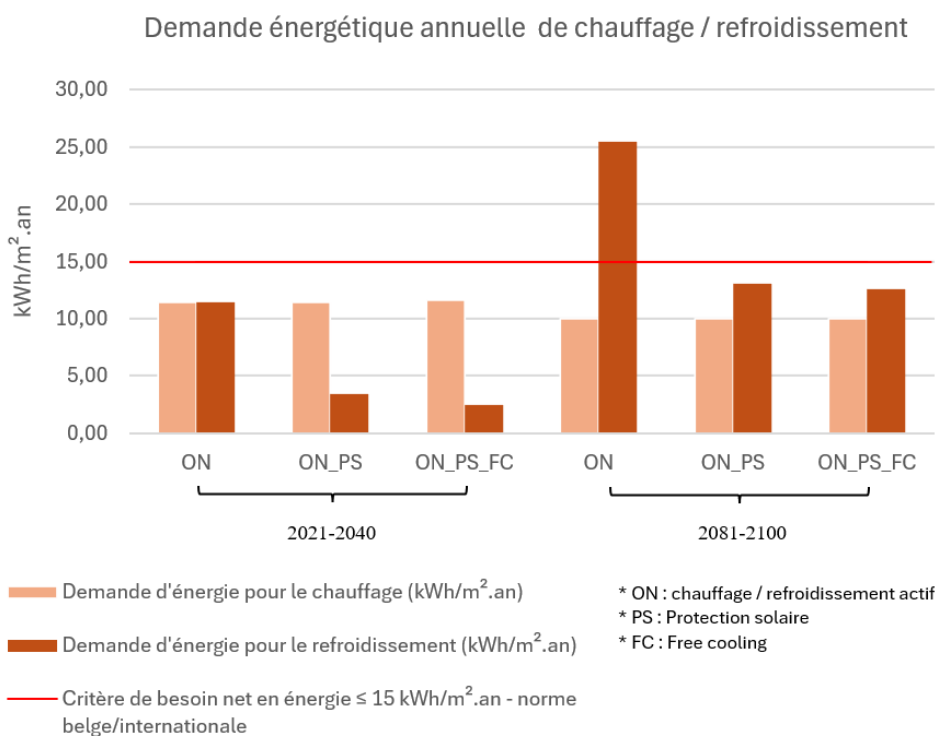


Figure 80 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition légère - Lin

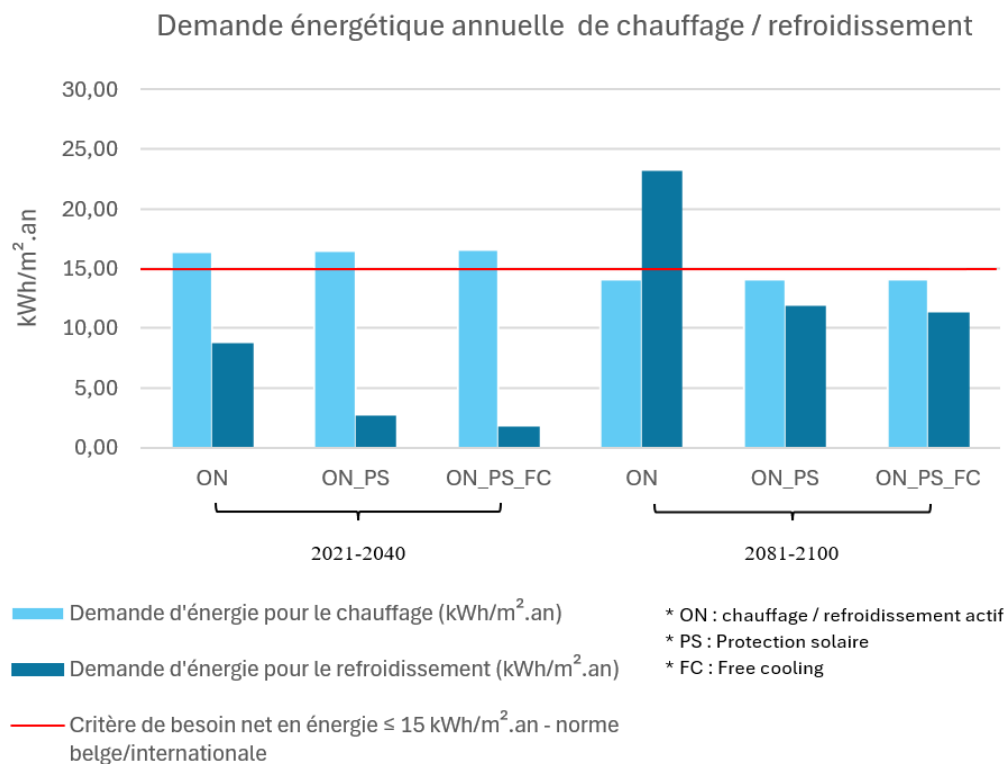


Figure 81 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition massive - Miscanthus

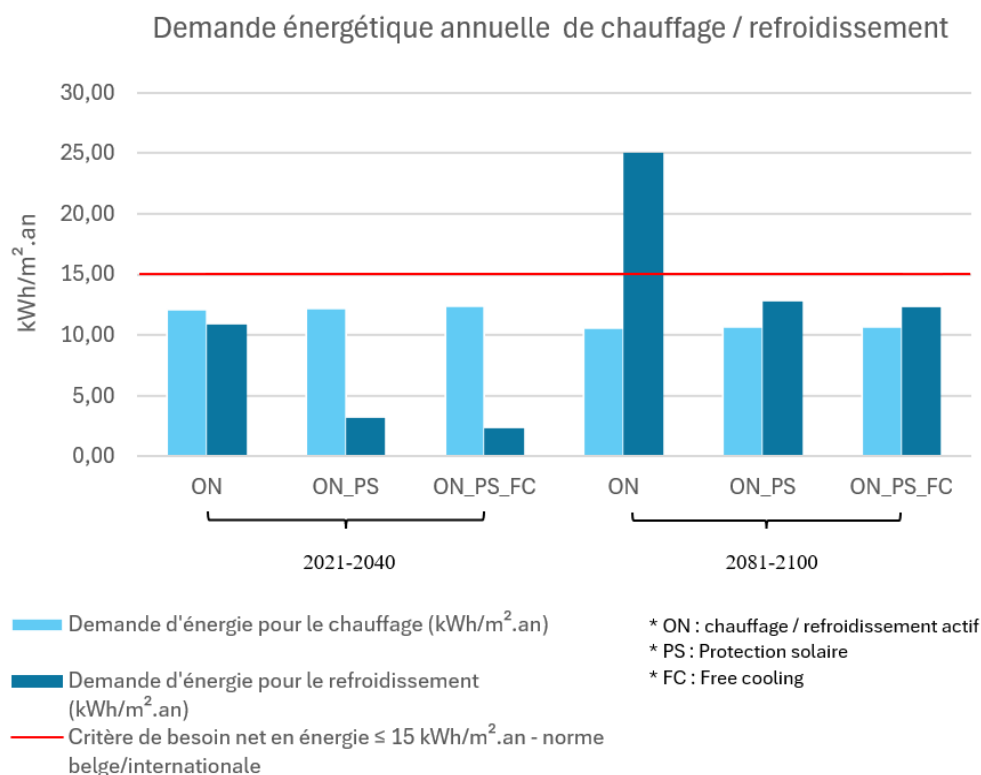


Figure 82 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition légère - Miscanthus

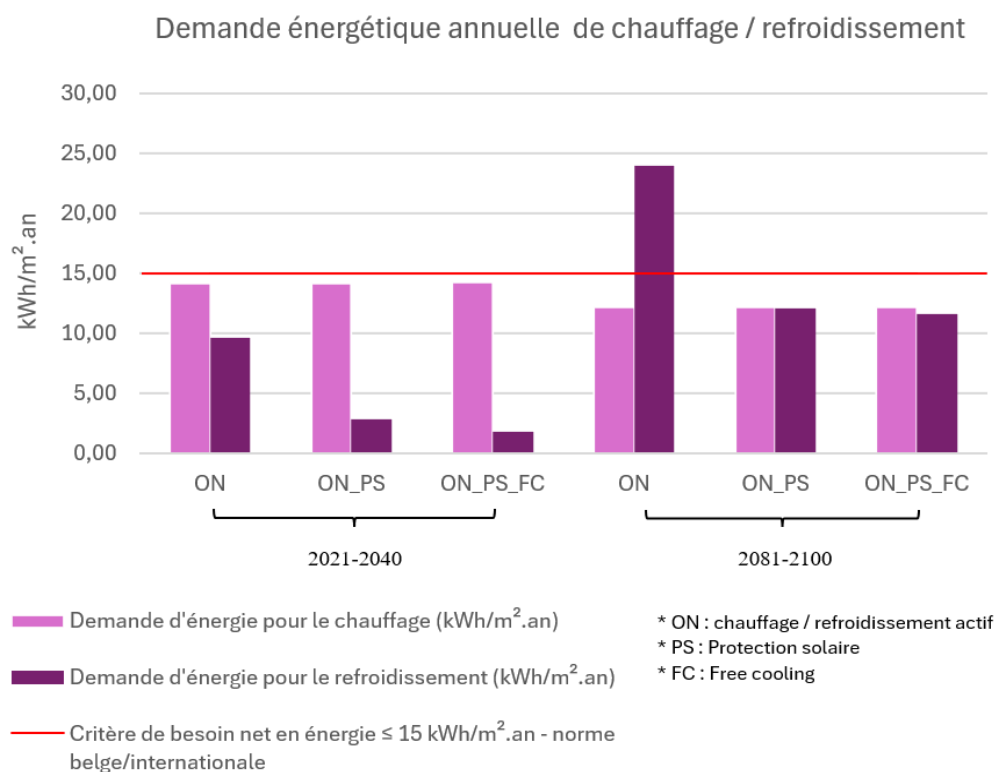


Figure 83 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition massive – Laine de mouton

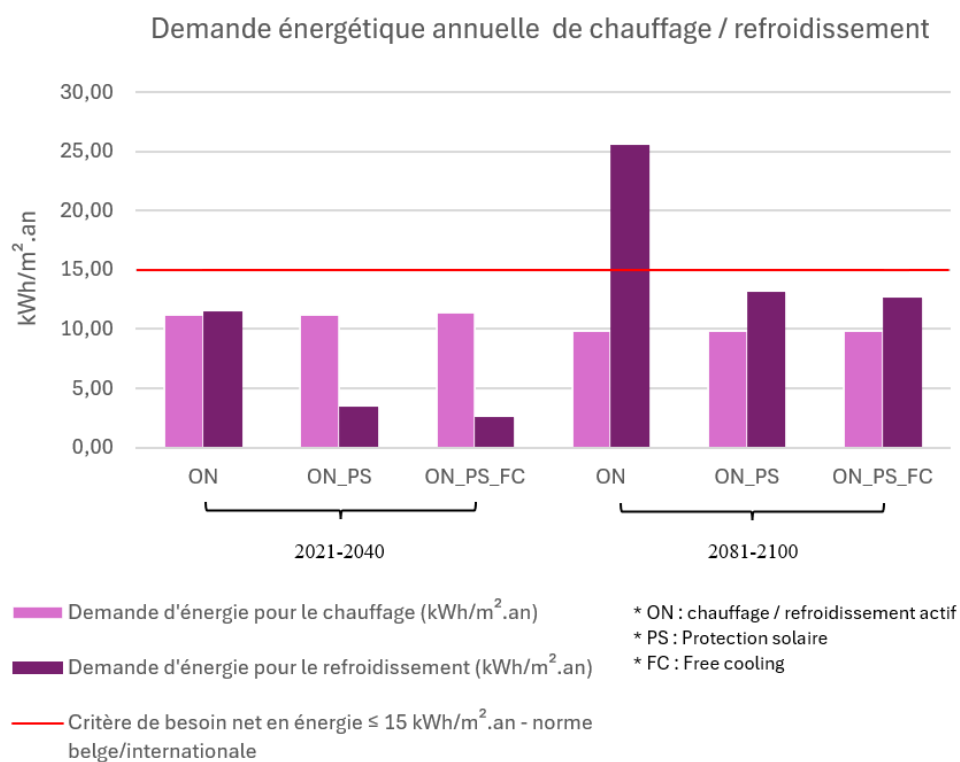


Figure 84 : Demande énergétique annuelle de chauffage / refroidissement - Composition légère – Laine de mouton

Tableau 34 : Résultats des simulations de 2021-2040

		ON	ON_PS	ON_PS_FC	OFF	OFF_PS	OFF_PS_FC
EPS et PIR (Initiale)	Chauffage	11,54	11,55	11,61	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	10,87	3,06	2,06	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	40,03%	7,60%	5,08%	46,20%	14,13%	12,67%
Cellulose (Initiale)	Chauffage	11,42	11,43	11,60	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	11,38	3,42	2,48	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	39,83%	9,36%	6,44%	46,99%	15,76%	13,74%
Herbe	Chauffage	15,15	15,21	15,29	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	9,20	2,78	1,83	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	30,65%	6,07%	3,38%	38,38%	11,36%	9,42%
Herbe	Chauffage	11,81	11,82	11,99	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	11,17	3,36	2,43	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	38,96%	8,96%	6,03%	46,19%	15,32%	13,28%
Lin	Chauffage	14,54	14,59	14,66	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	9,42	2,80	1,84	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	31,83%	6,13%	3,39%	40,59%	11,43%	9,51%
Lin	Chauffage	11,45	11,46	11,63	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	11,39	3,43	2,50	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	39,79%	9,34%	6,44%	46,96%	15,75%	13,76%
Miscanthus	Chauffage	16,39	16,51	16,60	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	8,74	2,69	1,76	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	28,93%	5,98%	3,32%	34,69%	11,28%	9,27%
Miscanthus	Chauffage	12,14	12,21	12,42	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	10,86	3,20	2,26	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	37,20%	8,03%	4,99%	44,81%	14,10%	11,88%
Mouton	Chauffage	14,12	14,16	14,23	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	9,60	2,82	1,86	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	32,77%	6,20%	3,40%	41,91%	11,45%	9,61%
Mouton	Chauffage	11,24	11,25	11,43	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	11,53	3,49	2,55	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	40,18%	9,53%	6,64%	47,57%	16,02%	14,02%

Tableau 35: Résultats des simulations de 2081-2100

		ON	ON_PS	ON_PS_FC	OFF	OFF_PS	OFF_PS_FC
EPS et PIR (Initiale)	Chauffage	10,01	10,01	9,94	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	25,09	12,57	12,07	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	50,99%	27,61%	26,34%	55,91%	39,67%	40,89%
Cellulose (Initiale)	Chauffage	9,99	9,99	10,01	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	25,47	13,07	12,57	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	51,53%	29,03%	27,00%	56,26%	40,97%	40,13%
Herbe	Chauffage	13,06	13,07	13,01	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	23,65	12,01	11,48	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	43,47%	21,53%	20,17%	49,79%	30,49%	31,07%
Herbe	Chauffage	10,32	10,33	10,35	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	25,30	13,00	12,49	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	50,61%	28,25%	26,30%	55,43%	39,85%	38,97%
Lin	Chauffage	12,55	12,56	12,50	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	23,84	12,06	11,53	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	45,08%	22,63%	21,47%	50,32%	31,97%	32,40%
Lin	Chauffage	10,02	10,02	10,04	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	25,48	13,09	12,59	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	51,40%	29,05%	27,05%	56,21%	40,96%	40,09%
Miscanthus	Chauffage	14,09	14,10	14,05	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	23,23	11,88	11,35	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	40,96%	20,16%	18,49%	48,47%	28,06%	28,37%
Miscanthus	Chauffage	10,59	10,64	10,66	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	25,01	12,79	12,25	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	49,44%	27,33%	25,14%	54,38%	38,09%	37,32%
Mouton	Chauffage	12,20	12,21	12,15	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	24,00	12,11	11,59	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	46,07%	23,39%	22,36%	50,91%	33,01%	33,39%
Mouton	Chauffage	9,84	9,84	9,86	0,00	0,00	0,00
	refroidissement	25,61	13,16	12,66	0,00	0,00	0,00
	Surchauffe	52,02%	29,59%	27,53%	56,77%	41,56%	40,70%

Annexe XII : Consommation annuelle d'eau chaude sanitaire

Tableau 36 : Consommation annuelle d'eau chaude sanitaire

Consommation annuelle d'eau chaude sanitaire

- encodez les données relatives à votre situation dans les cases bleues.
- Les résultats sont repris dans les cases jaunes.

1. Evaluation des besoins d'eau à 60°C en m³/an

1.1. Par ratio de bâtiment (sur base du fichier de données en Eau chaude sanitaire)

Etablissement	Caractéristiques	Besoins en litres à 60°C		Valeur	Nombre d'unités	Nombre de jours	Total m³ à 60°C/an	
Hotel	- 3 étoiles en montagne (sports d'hiver)	par chambre et par jour	170	170	0	0	0,0	m³/an
	- 3 étoiles tous lieux	par chambre et par jour	130 à 140	135	0	0	0,0	m³/an
	- hôtel de vacances à la semaine avec bain	par chambre et par jour	100	100	0	0	0,0	m³/an
	- 1 étoile avec douche (50%) et bain (50%)	par chambre et par jour	75	75	0	0	0,0	m³/an
	- lingerie	par kg de linge sec	4 à 5	4,5	0	0	0,0	m³/an
Restaurant	150 à 50 repas par jour	par repas	12 à 20	16	0	0	0,0	m³/an
Bureaux	En absence de douches, restaurant, ...	par personne et par jour	2 à 6	4	0	0	0,0	m³/an
cuisine	cuisine à liaison froide	par repas	2 à 3	2,5	0	0	0,0	m³/an
Ecole	- chambre d'internat	par lit et par jour	30 à 40	35	0	0	0,0	m³/an
	- Repas, hors lave-v.	par repas	3 à 5	4	0	0	0,0	m³/an
	- Repas, avec lave-v.	par repas	9 à 10	9,5	0	0	0,0	m³/an
Maison de	- chambre	par lit et par jour	40	40			0,0	m³/an
	- Repas, hors lave-v.	par repas	3 à 5	4			0,0	m³/an
	- Repas, avec lave-v.	par repas	9 à 10	9,5	0	0	0,0	m³/an
Maternité	- chambre	par lit et par jour	60	60	0	0	0,0	m³/an
	- Cuisine, avec lave-v.	par repas	10 à 15	12,5	0	0	0,0	m³/an
Hôpitaux	- chambre	par lit et par jour	50 à 60	55	0	0	0,0	m³/an
	- Cuisine, avec lave-v. (de 1 700 à 300 repas par jour)	par repas	8 à 12	10	0	0	0,0	m³/an
Foyer pour handicapés	- chambre	par lit et par jour	100	100	0	0	0,0	m³/an
	- Cuisine, avec lave-v.	par repas	9 à 10	9,5	0	0	0,0	m³/an
Centre d'Aide par le Travail	- chambre	par lit et par jour	60	60	0	0	0,0	m³/an
	- Cuisine, avec lave-v.	par repas	9 à 10	9,5	0	0	0,0	m³/an
Camping	- 3 et 4 étoiles	par campeur et par jour	12	12	0	0	0,0	m³/an
		par emplacement et par jour	45	45	0	0	0,0	m³/an
Villa familiale	standard simple	par personne et par jour	35	35	4	365	51,1	m³/an
Appartement	standard moyen	par personne et par jour	40	40	0	0	0,0	m³/an
Immeuble d'appartements en location		par personne et par jour	35	35	0	0	0,0	m³/an
TOTAL :							51,1	m³/an à 60°C

(mais des valeurs moitié de celles-ci ont été mesurées dans les immeubles HLM en France).

(mais des valeurs moitié de celles-ci ont été mesurées dans les immeubles HLM en France).

Annexe XIII : Score environnemental global des compositions

Maison A - EPS et PIR (Initiale)

53.5



Maison A - herbe

50.15



Maison A - lin

55.5



Maison A - Miscanthus

52.22



Maison A - mouton

52.2



Maison B - Cellulose (Initiale)

53.46



Maison B - herbe

51.17



Maison B - lin

58.7



Maison B - miscanthus

53.92



Maison B - mouton

60.99



Figure 85 : Score environnemental global des 10 composition

Annexe XIV : Contribution des éléments à l'impact environnemental

Tableau 37 : Contribution des éléments à l'impact environnemental - Compositions massives

Compositions massives	Quantité (m²)	EPS et PIR (Initiale)		Herbe		Lin		Miscanthus		Mouton	
		Impact par SPU (mPt/m²SPU)	Contribution relative (%)	Impact par SPU (mPt/m²SPU)	Contribution relative (%)	Impact par SPU (mPt/m²SPU)	Contribution relative (%)	Impact par SPU (mPt/m²SPU)	Contribution relative (%)	Impact par SPU (mPt/m²SPU)	Contribution relative (%)
Matériaux		39,64	74,10%	34,78	69,36%	40,4	72,79%	36,31	69,55%	37,28	71,41%
Plancher		15,87	29,66%	15,19	30,30%	17,13	30,86%	16	30,65%	15,63	29,95%
Plancher sol	60	14,49	27,09%	14,49	28,90%	14,49	26,11%	14,49	27,75%	14,49	27,76%
Plancher combles	44	1,37	2,57%	0,7	1,40%	2,64	4,75%	1,51	2,89%	1,14	2,18%
Mur extérieur		14,74	27,54%	10,82	21,57%	14,21	25,60%	10,93	20,93%	12,71	24,35%
Mur extérieur - bardage	15	1,42	2,65%	0,89	1,78%	1,23	2,21%	1,03	1,98%	1,08	2,07%
Mur extérieur - crépi	138	13,32	24,89%	9,93	19,80%	12,98	23,39%	9,9	18,96%	11,63	22,28%
Toiture		9,04	16,90%	8,77	17,49%	9,06	16,33%	9,38	17,97%	8,93	17,11%
Toiture isolée	32	3,43	6,42%	3,16	6,31%	3,46	6,23%	3,78	7,23%	3,33	6,38%
Toiture non-isolée	63	5,61	10,48%	5,61	11,18%	5,61	10,10%	5,61	10,74%	5,61	10,74%
Energie		13,86	25,90%	15,36	30,64%	15,1	27,21%	15,9	30,45%	14,93	28,59%
Chauffage		4,88	9,11%	6,42	12,81%	6,16	11,09%	6,97	13,35%	5,98	11,45%
Refroidissement		0,34	0,63%	0,3	0,60%	0,3	0,54%	0,29	0,55%	0,31	0,59%
Eau chaude sanitaire		8,64	16,16%	8,64	17,23%	8,64	15,57%	8,64	16,55%	8,64	16,56%
Total bâtiment		53,5	100,00%	50,15	100,00%	55,5	100,00%	52,22	100,00%	52,2	100,00%

Tableau 38 : Contribution des éléments à l'impact environnemental - Compositions légères

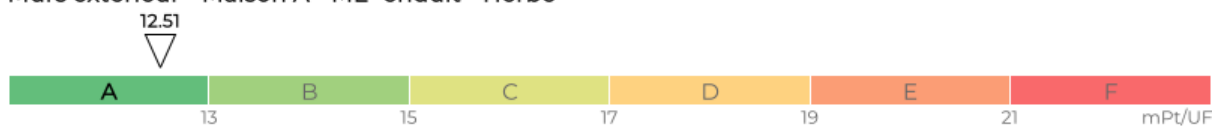
Compositions légères	Quantité (m²)	Cellulose (Initiale)		Herbe		Lin		Miscanthus		Mouton	
		Impact par SPU (mPt/m²SPU)	Contribution relative (%)	Impact par SPU (mPt/m²SPU)	Contribution relative (%)	Impact par SPU (mPt/m²SPU)	Contribution relative (%)	Impact par SPU (mPt/m²SPU)	Contribution relative (%)	Impact par SPU (mPt/m²SPU)	Contribution relative (%)
Matériaux		39,54	73,96%	37,1	72,49%	44,76	76,25%	39,69	73,61%	47,13	77,28%
Plancher		16,14	30,20%	15,52	30,32%	18,74	31,93%	16,26	30,16%	16,25	26,64%
Plancher sol	60	14,49	27,11%	14,49	28,32%	14,49	24,69%	14,49	26,88%	14,49	23,76%
Plancher combles	44	1,65	3,09%	1,02	2,00%	4,25	7,25%	1,77	3,28%	1,76	2,88%
Mur extérieur		12,14	22,71%	10,96	21,42%	14,64	24,94%	12,19	22,61%	18,59	30,48%
Mur extérieur - bardage	15	1,16	2,17%	1,05	2,06%	1,43	2,43%	1,18	2,18%	1,81	2,97%
Mur extérieur - crépi	138	10,98	20,54%	9,91	19,36%	13,21	22,50%	11,01	20,43%	16,78	27,51%
Toiture		11,26	21,06%	10,62	20,75%	11,38	19,38%	11,24	20,84%	12,29	20,15%
Toiture isolée	32	4,59	8,59%	3,96	7,73%	4,72	8,03%	4,57	8,48%	5,63	9,23%
Toiture non-isolée	63	6,66	12,46%	6,66	13,02%	6,66	11,35%	6,66	12,35%	6,66	10,92%
Energie		13,92	26,04%	14,08	27,51%	13,94	23,75%	14,23	26,39%	13,86	22,72%
Chauffage		4,87	9,11%	5,04	9,84%	4,88	8,32%	5,22	9,68%	4,8	7,87%
		0,41	0,76%	0,4	0,78%	0,41	0,70%	0,37	0,69%	0,42	0,69%
Eau chaude sanitaire		8,64	16,17%	8,64	16,89%	8,64	14,72%	8,64	16,03%	8,64	14,17%
Total bâtiment		53,46	100,00%	51,17	100,00%	58,7	100,00%	53,92	100,00%	60,99	100,00%

Annexe XV : Score environnemental des murs avec enduit - Compositions massives

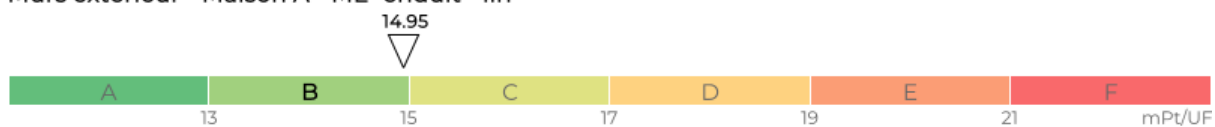
Murs extérieur - Maison A - ME+enduit - EPS Graphité



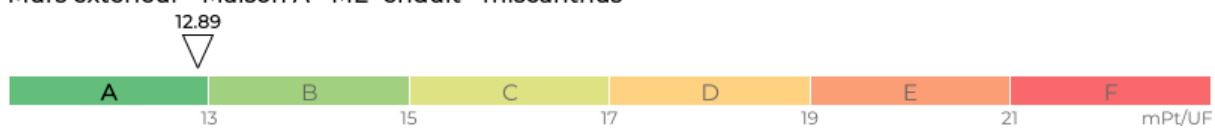
Murs extérieur - Maison A - ME+enduit - Herbe



Murs extérieur - Maison A - ME+enduit - lin



Murs extérieur - Maison A - ME+enduit - miscanthus



Murs extérieur - Maison A - ME+enduit - mouton

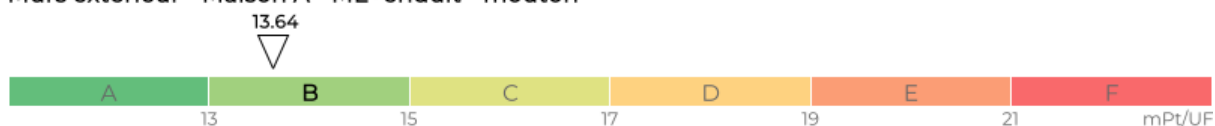


Figure 86 : Score environnemental des murs extérieurs avec crépi - Compositions massives

Annexe XVI : Impact par composant - Murs extérieurs avec crépi - Compositions massives

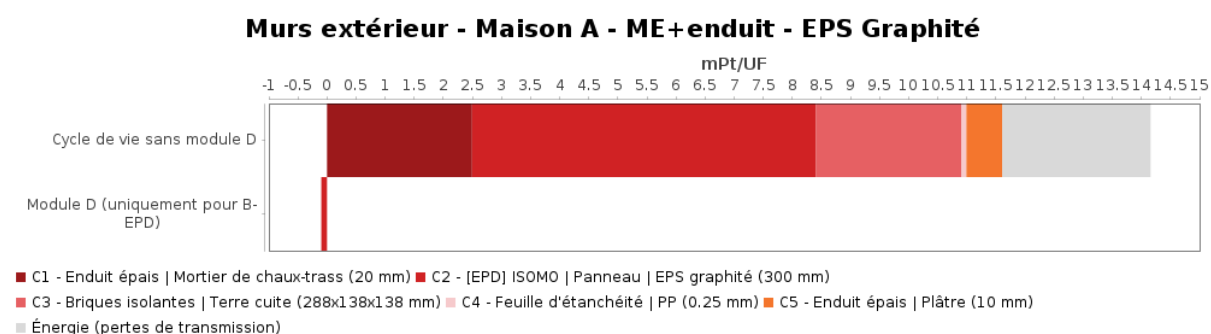


Figure 87 : Impact murs extérieurs avec crépi - Composition massive - EPS graphité

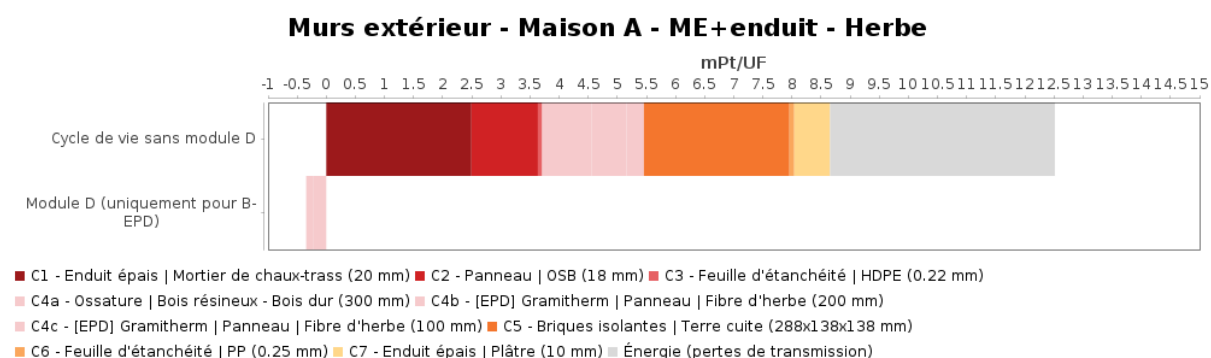


Figure 88 : Impact murs extérieurs avec crépi - Composition massive - Herbe

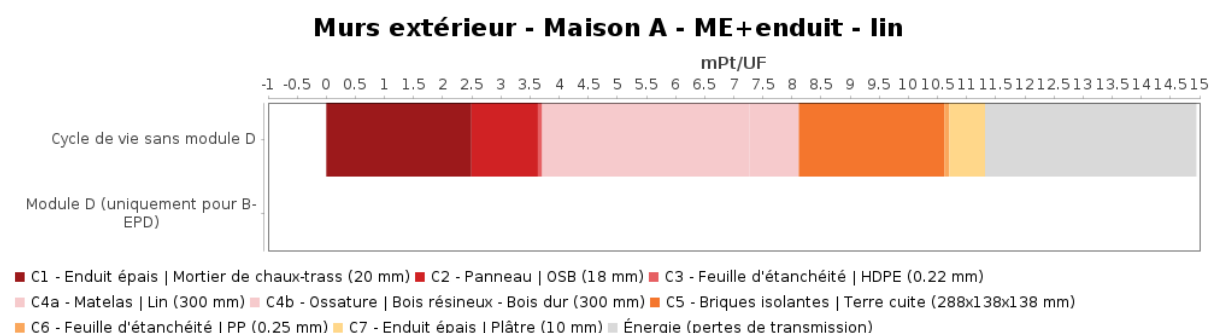


Figure 89 : Impact murs extérieurs avec crépi - Composition massive - Lin

Murs extérieur - Maison A - ME+enduit - miscanthus

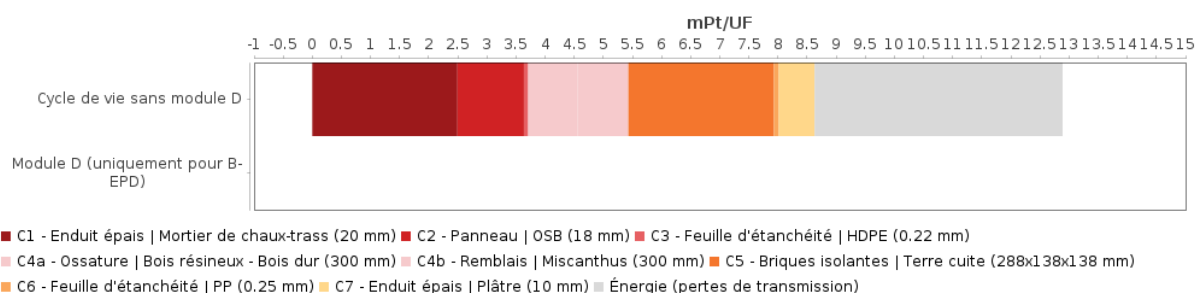


Figure 90 : Impact murs extérieurs avec crépi - Composition massive - Miscanthus

Murs extérieur - Maison A - ME+enduit - mouton

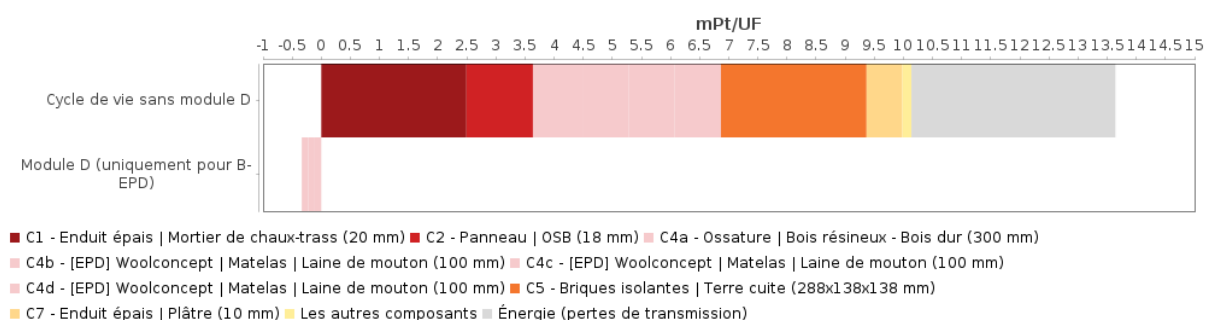
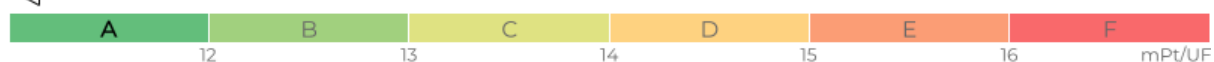


Figure 91 : Impact murs extérieurs avec crépi - Composition massive - Laine de mouton

Annexe XVII : Score environnemental des planchers des combles - Compositions massives

Plancher grenier - Maison A - PIR

7.14



Plancher grenier - Maison A - herbe

6.59



Plancher grenier - Maison A - lin

11.62



Plancher grenier - Maison A - miscanthus

9.08



Plancher grenier - Maison A - mouton

7.37



Figure 92 : Score environnemental des plancher des combles - Compositions massives

Annexe XVIII : Impact par composant - Plancher des combles - Compositions massives

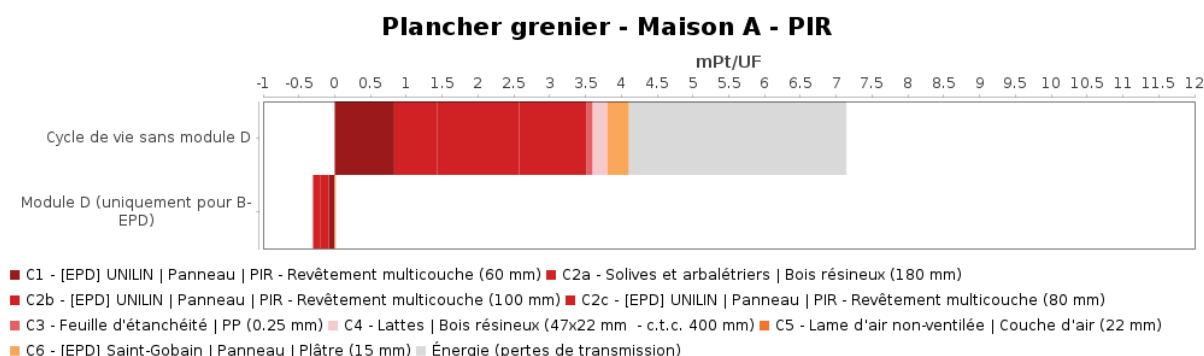


Figure 93 : Impact plancher des combles - Composition massive - PIR

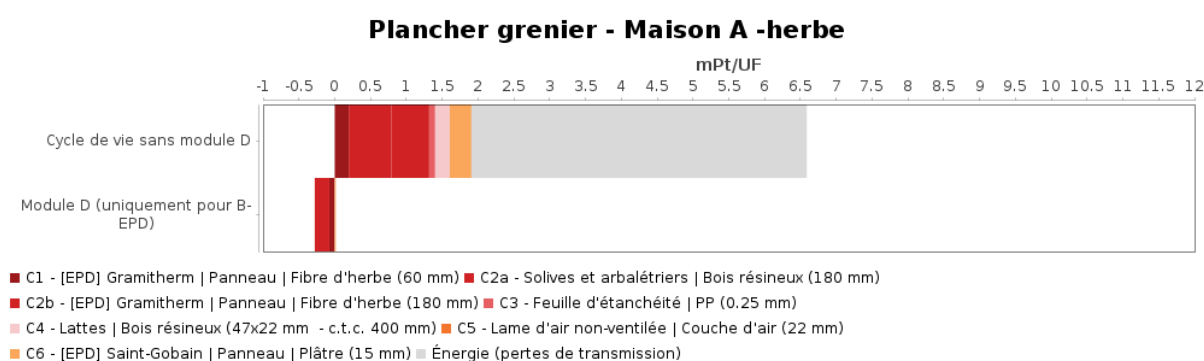


Figure 94 : Impact plancher des combles - Composition massive - Herbe

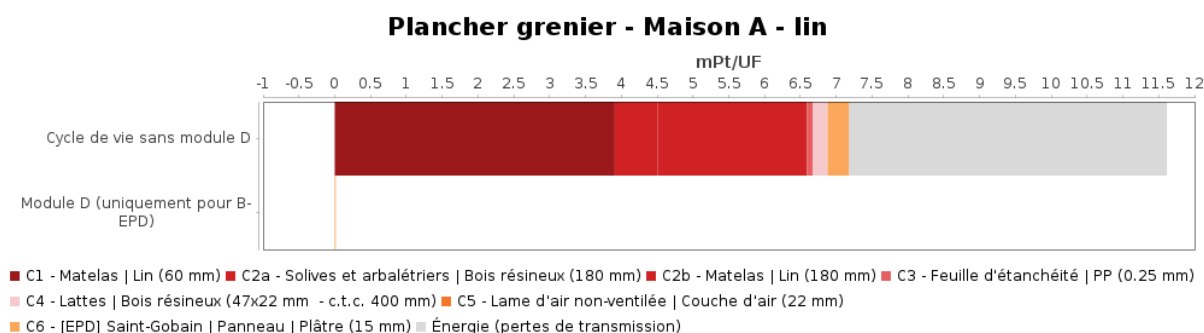


Figure 95 : Impact plancher des combles - Composition massive - Lin

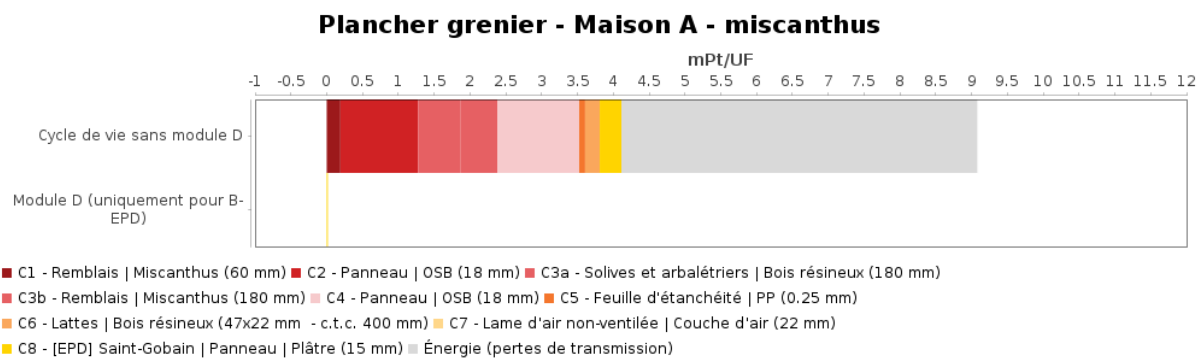


Figure 96 : Impact plancher des combles - Composition massive - Miscanthus

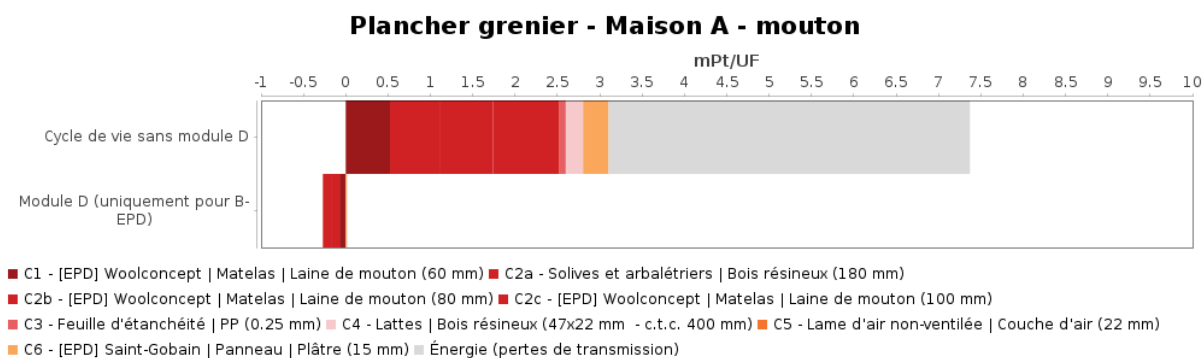


Figure 97 : Impact plancher des combles - Composition massive - Laine de mouton

Annexe XIX : Impact par étape du cycle de vie

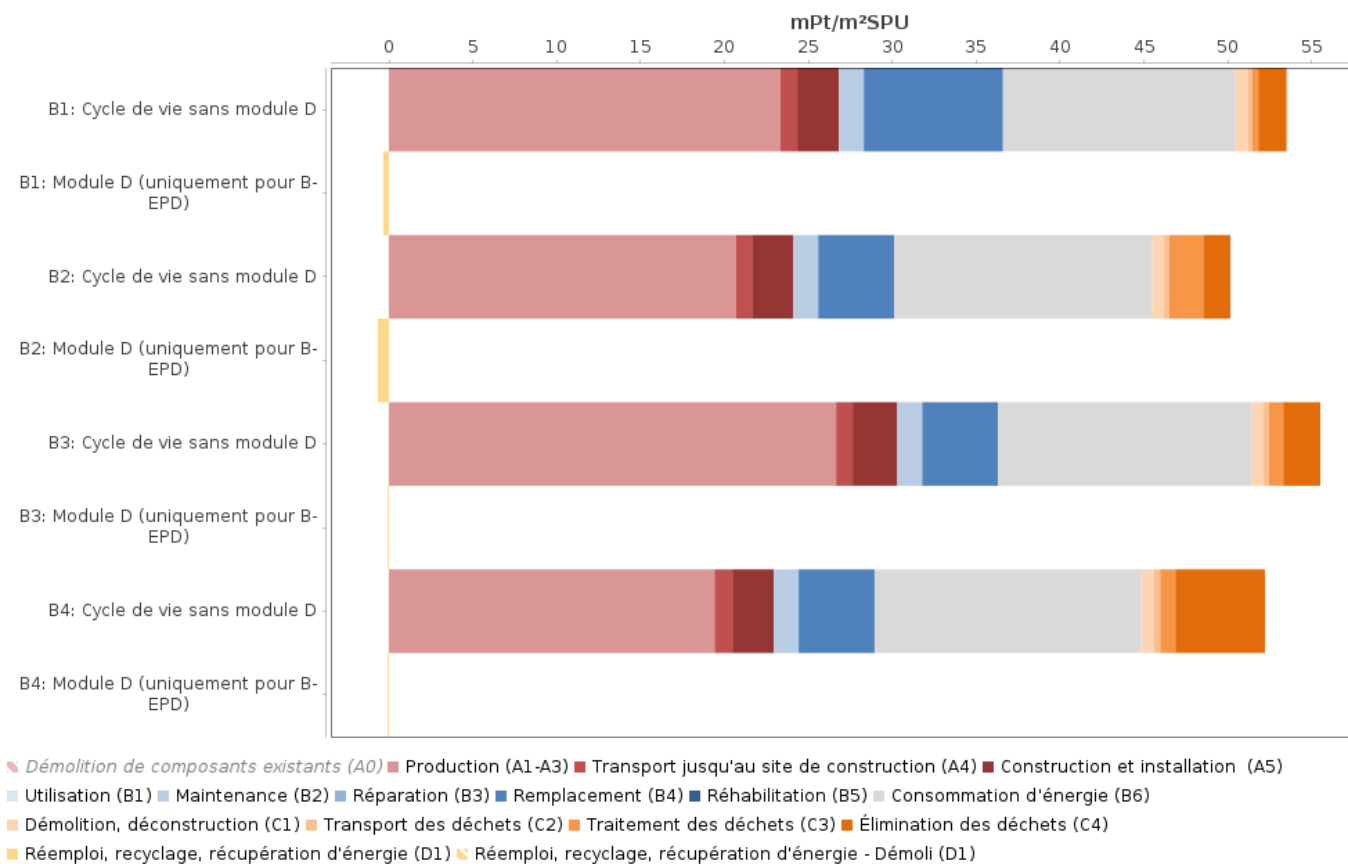


Figure 98 : Impact global du bâtiment réparti selon les étapes du cycle de vie - Composition massive initiale / herbe / lin / miscanthus

*B1: Composition massive - EPS graphité et PIR (initiale) ; B2 : Composition massive - herbe ;

B3 : Composition massive - lin ;B4 : Composition massive - miscanthus

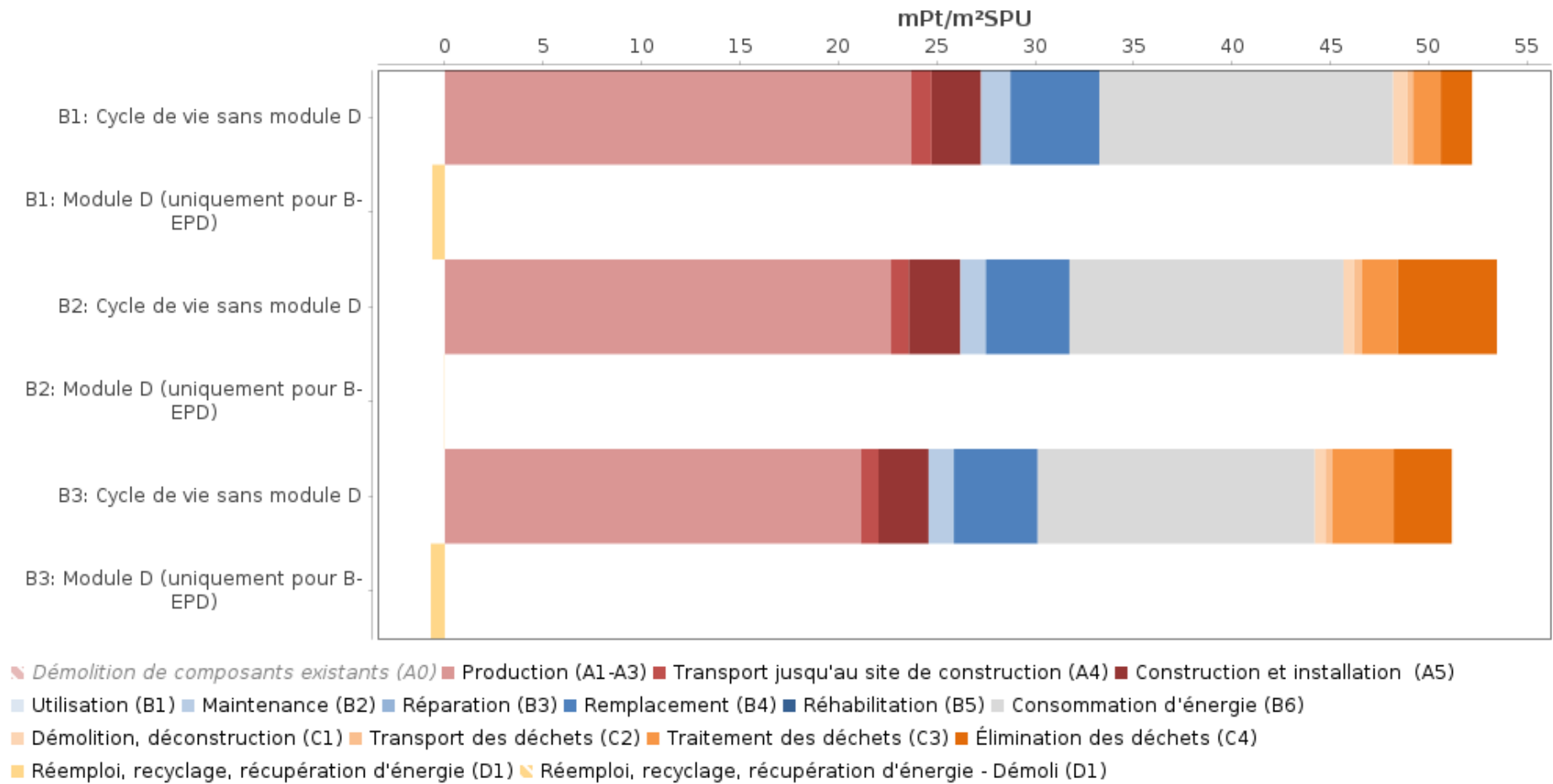


Figure 99 : Impact global du bâtiment réparti selon les étapes du cycle de vie - Composition massive en mouton et Composition légère initiale / herbe

B1 : Composition massive - mouton ; B2 : Composition légère - cellulose (initiale) ; B3 : Composition légère - herbe

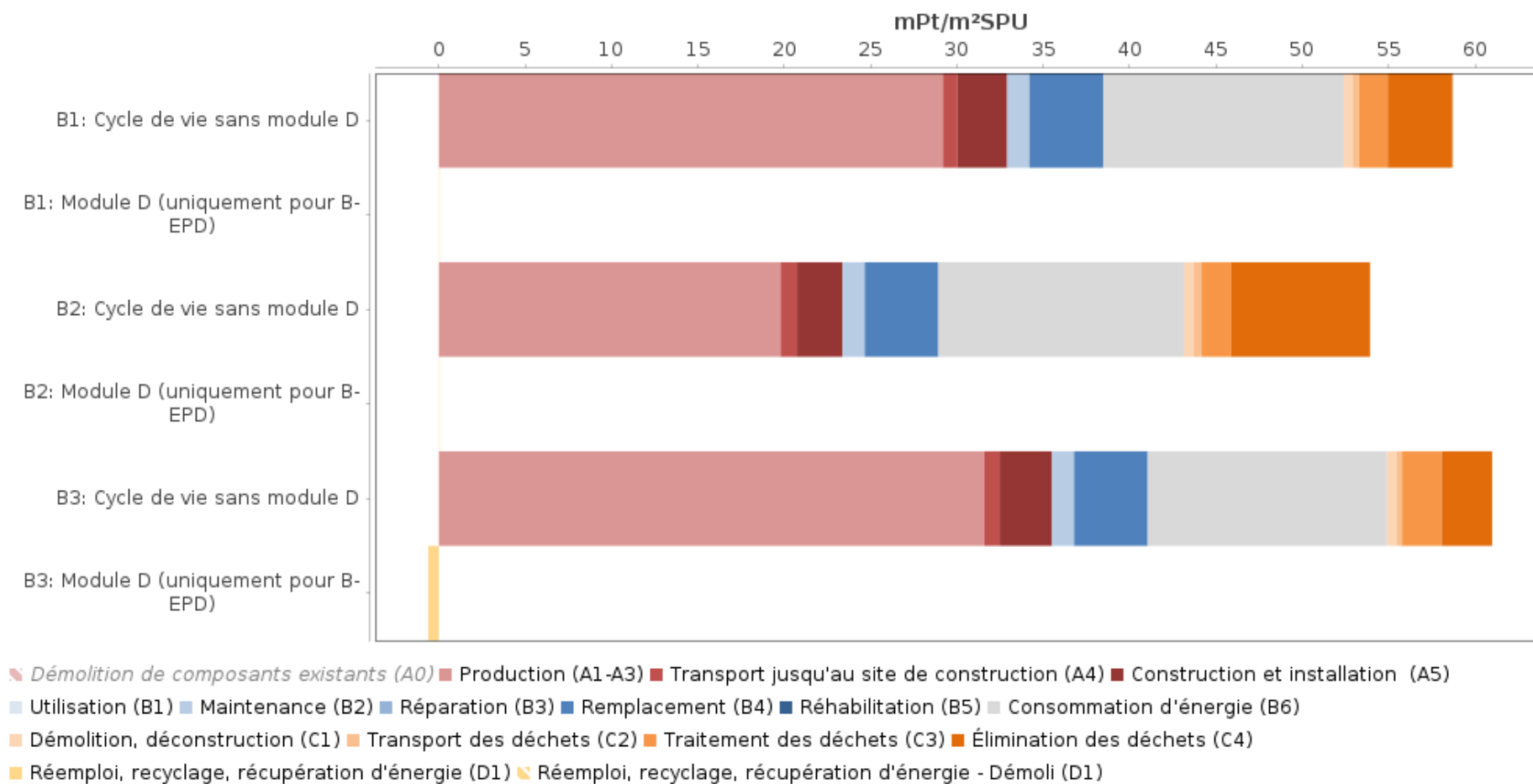


Figure 100 : Impact global du bâtiment réparti selon les étapes du cycle de vie - Composition légère en lin / miscanthus / mouton

B1 : Composition légère - lin ; B2 : Composition légère - miscanthus ; B3 : Composition légère - mouton

Annexe XX : Phase « production » de l'analyse de cycle de vie

Tableau 39 : Total par étape de cycle de vie “production” - Composition massive EPS et PIR (Initial) / herbe / lin / miscanthus













Indicateur de l'impact		Valeur de l'impact (par m²SPU)				Unité de calcul	Facteur d'aggrégation	Indicateurs d'impact environnemental								
		Maison A - EPS et PIR (Initiale)	Maison A - herbe	Maison A - lin	Maison A - Miscanthus			Score environnemental								
								mPt/m²SPU				%				
								Maison A - EPS et PIR (Initiale)	Maison A - herbe	Maison A - lin	Maison A - Miscanthus	Maison A - EPS et PIR (Initiale)	Maison A - herbe	Maison A - lin	Maison A - Miscanthus	
	Changement climatique - total	177	81	130	-12	kg de CO2 équiv.	0.026	mPt/kg de CO2 équiv.	4.6	2.1	3.4	-0.32	20%	10%	13%	-1.7%
	Changement climatique - combustibles fossiles	196	178	206	178	kg de CO2 équiv.	0.026	mPt/kg de CO2 équiv.	5.1	4.6	5.4	4.6	22%	22%	20%	24%
	Changement climatique - biogénique	-19	-97	-77	-191	kg de CO2 équiv.	0.026	mPt/kg de CO2 équiv.	-0.5	-2.5	-2	-5	-2.2%	-12%	-7.5%	-26%
	Changement climatique - occupation des sols et transformation de l'occupation des sols	0.22	0.27	0.34	0.29	kg de CO2 équiv.	0.026	mPt/kg de CO2 équiv.	0.0058	0.007	0.0087	0.0076	0.025%	0.034%	0.033%	0.039%
	Appauvrissement de la couche d'ozone	0.000014	0.000038	0.000018	0.000016	kg de CFC 11 équiv.	1176	mPt/kg de CFC 11 équiv.	0.017	0.044	0.021	0.019	0.072%	0.21%	0.08%	0.097%
	Acidification	0.96	0.93	1.4	0.99	mPt/mole de H+ équiv.	1.1	mPt/mole de H+ équiv.	1.1	1	1.6	1.1	4.6%	5%	6.1%	5.7%
	Eutrophisation								0.91	0.93	1.7	1.1	3.9%	4.5%	6.4%	5.4%
	Eutrophisation aquatique, eaux douces	0.0055	0.0057	0.0082	0.0083	kg de P équiv.	17	mPt/kg de P équiv.	0.096	0.1	0.14	0.14	0.41%	0.48%	0.54%	0.75%
	Eutrophisation aquatique marine	0.22	0.22	0.45	0.25	kg de N équiv.	1.5	mPt/kg de N équiv.	0.33	0.34	0.69	0.38	1.4%	1.6%	2.6%	1.9%
	Eutrophisation terrestre	2.3	2.4	4.2	2.5	mPt/mole de N équiv.	0.21	mPt/mole de N équiv.	0.49	0.5	0.87	0.53	2.1%	2.4%	3.3%	2.7%
	Formation d'ozone photochimique	1	0.76	0.9	0.81	kg de COVNM équiv.	1.2	mPt/kg de COVNM équiv.	1.2	0.9	1.1	0.96	5.1%	4.3%	4%	4.9%
	Épuisement des ressources abiotiques								4.4	3.6	4.1	3.5	19%	18%	15%	18%
	Épuisement des ressources abiotiques - minéraux et métaux	0.00063	0.00052	0.00057	0.0005	kg de SB équiv.	1186	mPt/kg de SB équiv.	0.75	0.61	0.67	0.59	3.2%	3%	2.5%	3%
	Épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles	2825	2359	2653	2269	MJ, pouvoir calorifique inférieur	0.0013	mPt/MJ, pouvoir calorifique inférieur	3.6	3	3.4	2.9	16%	15%	13%	15%
	Besoin en eau	72	55	257	56	m3 de privation équiv. dans le monde	0.0074	mPt/m3 de privation équiv. dans le monde	0.53	0.41	1.9	0.42	2.3%	2%	7.2%	2.1%
	Émissions de particules fines	0.00005	0.00005	0.000054	0.000051	Incidence de maladies	150528	mPt/Incidence de maladies	7.5	7.6	8.1	7.6	32%	37%	30%	39%
	Rayonnements ionisants, santé humaine	11	8.8	9.9	8.4	kBq de U235 équiv.	0.012	mPt/kBq de U235 équiv.	0.13	0.1	0.12	0.1	0.54%	0.5%	0.44%	0.52%
	Écotoxicité (eaux douces)	3813	4142	5317	5269	CTUe	0.00045	mPt/CTUe	1.7	1.9	2.4	2.4	7.4%	9%	9%	12%
	Toxicité humaine								0.88	1	1.2	1.1	3.8%	4.8%	4.5%	5.7%
	Toxicité humaine, effets cancérogènes	0.00000042	0.00000049	0.00000069	0.00000056	CTUh	1260385	mPt/CTUh	0.53	0.62	0.87	0.71	2.3%	3%	3.3%	3.7%
	Toxicité humaine, effets non cancérogènes	0.0000043	0.0000048	0.0000039	0.000005	CTUh	80114	mPt/CTUh	0.34	0.38	0.31	0.4	1.5%	1.9%	1.2%	2.1%
	Impacts liés à l'occupation des sols/Qualité du sol	4462	11129	11304	15481	sans dimension	0.000097	mPt/Pt	0.43	1.1	1.1	1.5	1.9%	5.2%	4.1%	7.7%
	Total								75	21	27	19	100%	100%	100%	100%

Tableau 40 : Total par étape de cycle de vie “production” - Composition massive mouton et composition légère initiale / herbe

























Indicateurs d'impact environnemental													
Indicateur de l'impact		Valeur de l'impact (par m²SPU)			Unité de calcul	Facteur d'aggrégation	Score environnemental						
							mPt/m²SPU			%			
		Maison A - mouton	Maison B - légère	Maison B - herbe			Maison A - mouton	Maison B - légère	Maison B - herbe	Maison A - mouton	Maison B - légère	Maison B - herbe	
	Changement climatique - total	149	-12	5.2	kg de CO2 équiv.	0.026	mPt/kg de CO2 équiv.	3.9	-0.31	0.14	16%	-1.4%	0.64%
	Changement climatique - combustibles fossiles	209	185	175	kg de CO2 équiv.	0.026	mPt/kg de CO2 équiv.	5.4	4.8	4.6	23%	21%	22%
	Changement climatique - biogénique	-61	-197	-171	kg de CO2 équiv.	0.026	mPt/kg de CO2 équiv.	-1.6	-5.1	-4.4	-6.7%	-23%	-21%
	Changement climatique - occupation des sols et transformation de l'occupation des sols	0.45	0.53	0.75	kg de CO2 équiv.	0.026	mPt/kg de CO2 équiv.	0.012	0.014	0.019	0.049%	0.061%	0.092%
	Appauvrissement de la couche d'ozone	0.00005	0.000017	0.000044	kg de CFC 11 équiv.	1176	mPt/kg de CFC 11 équiv.	0.059	0.021	0.052	0.25%	0.09%	0.25%
	Acidification	1	1.2	1	mPt/mole de H+ équiv.	1.1	mPt/mole de H+ équiv.	1.1	1.3	1.2	4.8%	5.8%	5.5%
	Eutrophisation							1.1	1.1	1	4.5%	5%	4.7%
	Eutrophisation aquatique, eaux douces	0.0069	0.0088	0.0076	kg de P équiv.	17	mPt/kg de P équiv.	0.12	0.15	0.13	0.5%	0.67%	0.62%
	Eutrophisation aquatique marine	0.25	0.26	0.23	kg de N équiv.	15	mPt/kg de N équiv.	0.38	0.4	0.35	1.6%	1.8%	1.7%
	Eutrophisation terrestre	2.7	2.8	2.5	mPt/mole de N équiv.	0.21	mPt/mole de N équiv.	0.56	0.59	0.52	2.4%	2.6%	2.5%
	Formation d'ozone photochimique	0.81	0.9	0.79	kg de COVNM équiv.	1.2	mPt/kg de COVNM équiv.	0.96	1.1	0.93	4%	4.7%	4.4%
	Épuisement des ressources abiotiques							4.1	4.1	3.9	17%	18%	19%
	Épuisement des ressources abiotiques - minéraux et métaux	0.00058	0.00061	0.00058	kg de SB équiv.	1186	mPt/kg de SB équiv.	0.69	0.72	0.68	2.9%	3.2%	3.2%
	Épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles	2652	2622	2547	MJ, pouvoir calorifique inférieur	0.0013	mPt/MJ, pouvoir calorifique inférieur	3.4	3.4	3.3	14%	15%	15%
	Besoin en eau	41	72	65	m³ de privation équiv. dans le monde	0.0074	mPt/m³ de privation équiv. dans le monde	0.3	0.53	0.48	1.3%	2.4%	2.3%
	Émissions de particules fines	0.000051	0.000054	0.000053	Incidence de maladies	150528	mPt/Incidence de maladies	7.7	8.1	7.9	32%	36%	38%
	Rayonnements ionisants, santé humaine	9.1	9	8.9	kBq de U235 équiv.	0.012	mPt/kBq de U235 équiv.	0.11	0.11	0.11	0.46%	0.47%	0.5%
	Écotoxicité (eaux douces)	4549	6680	5564	CTUe	0.00045	mPt/CTUe	2	3	2.5	8.6%	13%	12%
	Toxicité humaine							1.3	1.3	1.1	5.5%	5.9%	5.1%
	Toxicité humaine, effets cancérigènes	0.00000073	0.00000065	0.00000053	CTUh	1260385	mPt/CTUh	0.92	0.83	0.66	3.9%	3.6%	3.1%
	Toxicité humaine, effets non cancérigènes	0.0000047	0.0000063	0.0000051	CTUh	80114	mPt/CTUh	0.38	0.5	0.41	1.6%	2.2%	1.9%
	Impacts liés à l'occupation des sols/Qualité du sol	11143	23230	18647	sans dimension	0.000097	mPt/Pt	1.1	2.3	1.8	4.6%	9.9%	8.5%
Total								24	23	21	100%	100%	100%

Tableau 41 : Total par étape de cycle de vie “production” - Composition massive mouton et composition légère lin / miscanthus / mouton

Indicateurs d'impact environnemental												
Indicateur de l'impact	Valeur de l'impact (par m²SPU)			Unité de calcul	Facteur d'agrégation		Score environnemental					
	Maison B - lin	Maison B - miscanthus	Maison B - mouton				mPt/m²SPU			%		
							Maison B - lin	Maison B - miscanthus	Maison B - mouton	Maison B - lin	Maison B - miscanthus	Maison B - mouton
 Changement climatique - total	68	-121	141	kg de CO2 équiv.	0.026	mPt/kg de CO2 équiv.	1.8	-3.2	3.7	6%	-16%	12%
Changement climatique - combustibles fossiles	214	179	226	kg de CO2 équiv.	0.026	mPt/kg de CO2 équiv.	5.6	4.7	5.9	19%	24%	19%
Changement climatique - biogénique	-147	-301	-91	kg de CO2 équiv.	0.026	mPt/kg de CO2 équiv.	-3.8	-7.8	-2.4	-13%	-40%	-7.5%
Changement climatique - occupation des sols et transformation de l'occupation des sols	0.56	0.78	6.2	kg de CO2 équiv.	0.026	mPt/kg de CO2 équiv.	0.015	0.02	0.16	0.05%	0.1%	0.51%
 Appauvrissement de la couche d'ozone	0.00002	0.000017	0.000056	kg de CFC 11 équiv.	1176	mPt/kg de CFC 11 équiv.	0.023	0.02	0.066	0.079%	0.1%	0.21%
 Acidification	1.7	1.1	2.4	mPt/mole de H+ équiv.	1.1	mPt/mole de H+ équiv.	1.9	1.3	2.6	6.7%	6.4%	8.4%
 Eutrophisation							2	1.2	2.8	7%	6%	8.9%
Eutrophisation aquatique, eaux douces	0.011	0.011	0.021	kg de P équiv.	17	mPt/kg de P équiv.	0.19	0.19	0.37	0.65%	0.98%	1.2%
Eutrophisation aquatique marine	0.54	0.27	0.47	kg de N équiv.	1.5	mPt/kg de N équiv.	0.82	0.41	0.72	2.8%	2.1%	2.3%
Eutrophisation terrestre	4.9	2.8	8.2	mPt/mole de N équiv.	0.21	mPt/mole de N équiv.	1	0.58	1.7	3.5%	2.9%	5.5%
 Formation d'ozone photochimique	0.98	0.88	0.9	kg de COVNM équiv.	1.2	mPt/kg de COVNM équiv.	1.2	1	1.1	4%	5.2%	3.3%
 Épuisement des ressources abiotiques							4.6	3.9	4.6	16%	19%	14%
Épuisement des ressources abiotiques - minéraux et métaux	0.00065	0.00057	0.0007	kg de SB équiv.	1186	mPt/kg de SB équiv.	0.77	0.67	0.83	2.7%	3.4%	2.6%
Épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles	2959	2488	2925	MJ, pouvoir calorifique inférieur	0.0013	mPt/MJ, pouvoir calorifique inférieur	3.8	3.2	3.7	13%	16%	12%
 Besoin en eau	337	68	59	m3 de privation équiv. dans le monde	0.0074	mPt/m3 de privation équiv. dans le monde	2.5	0.5	0.44	8.6%	2.5%	1.4%
 Émissions de particules fines	0.000058	0.000053	0.000062	Incidence de maladies	150528	mPt/Incidence de maladies	8.7	8	9.4	30%	41%	30%
 Rayonnements ionisants, santé humaine	10	8.6	9.4	kBq de U235 équiv.	0.012	mPt/kBq de U235 équiv.	0.12	0.1	0.11	0.43%	0.52%	0.35%
 Écotoxicité (eaux douces)	7129	7175	6704	CTUe	0.00045	mPt/CTUe	3.2	3.2	3	11%	16%	9.6%
 Toxicité humaine							1.3	1.3	1.5	4.6%	6.4%	4.6%
Toxicité humaine, effets cancérigènes	0.0000008	0.00000065	0.00000082	CTUh	1260385	mPt/CTUh	1	0.82	1	3.5%	4.1%	3.3%
Toxicité humaine, effets non cancérigènes	0.0000039	0.0000056	0.0000054	CTUh	80114	mPt/CTUh	0.32	0.45	0.44	1.1%	2.3%	1.4%
 Impacts liés à l'occupation des sols/Qualité du sol	19013	25133	24401	sans dimension	0.000097	mPt/Pt	1.8	2.4	2.4	6.3%	12%	7.5%
Total							29	20	32	100%	100%	100%

