

Mémoire

Auteur : Colin, Basile

Promoteur(s) : Abrahams, Pauline; 2770

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18324>

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.

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UNI.LU – Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Communication

ANALYSE DES ASPECTS DE RÉSILIENCE ET SIMULATIONS DYNAMIQUES DE LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE D'UN BÂTIMENT RÉSIDENTIEL WALLON FACE À L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES INDUITE PAR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

BASILE COLIN

MEMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DES DIPLÔMES DE

**MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT – FINALITE ENERGIES RENOUVELABLES ET
BATIMENTS DURABLES (ULIEGE)**

MASTER EN DEVELOPPEMENT DURABLE – FINALITE ENERGIE-ENVIRONNEMENT (UNI.LU)

ANNÉE ACADÉMIQUE 2022-2023

RÉDIGÉ SOUS LA DIRECTION DE PAULINE ABRAHAMS (ULIEGE) ET FRANK SCHOLZEN (UNI.LU)

COMITÉ DE LECTURE :

PHILIPPE ANDRÉ

ANNE WOUTERS

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège et de l'Université de Luxembourg

*L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège et de l'Université de Luxembourg

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : COLIN Basile basilecolin23@gmail.com

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma promotrice principale Madame Pauline Abrahams sans qui ce mémoire ne serait pas aussi complet. Sa disponibilité, sa confiance et ses bons conseils, sans jamais m'imposer un point de vue ou une direction à prendre, ont été inestimables.

Merci à mon co-promoteur, Monsieur Frank Scholzen d'avoir accepté de me suivre et de m'accorder de son temps dès la première année de ce Master.

Merci aux membres du comité de lecture, Monsieur P. André et Madame A. Wouters pour leur présence et leur relecture de ce présent travail.

Merci à l'équipe BEMS pour le prêt du matériel informatique ainsi qu'à leur disponibilité pour répondre aux questions que je me posais.

Merci également à tous les enseignants et professeurs passionnés qui, tout au long de mon parcours scolaire, ont su me transmettre l'envie et la motivation d'apprendre.

Je remercie le cabinet d'architecture Pierre Legnière pour la fourniture des plans de la maison qui sont à la base de ce travail. Merci également aux demandeurs de projet Madame et Monsieur Velghe-Dubois pour leur accord d'utilisation des plans de leur future maison.

Merci à ma famille et à mes amis pour leur soutien inconditionnel durant mes études, merci à Lola et Florence. En ce jour j'ai une pensée toute particulière pour mon papy qui connaissait la valeur d'un diplôme et qui ne manquait jamais une occasion pour me demander comment se passaient mes cours. Il aurait été, j'en suis sûr, le plus fier des grands-pères en apprenant le dépôt de mon mémoire.

Enfin merci à mes parents pour leur soutien sans faille durant ces nombreuses années d'études. Merci à eux d'avoir continué à croire en moi et à me soutenir, même lors des moins bons moments. Je suis conscient que tout le monde n'a pas cette chance et leur serai éternellement reconnaissant d'avoir tout fait pour que j'obtienne le diplôme dont je rêvais à ma sortie de secondaire.

Rising temperatures have an impact on many aspects of everyday life. Among these aspects is the reaction of buildings. This study examines the evolution of energy demand and thermal comfort in a residential building in the face of likely future increases in air temperatures in Wallonia. The resilience and impact on energy demand and comfort of several solutions for mitigating indoor overheating are analysed. This is achieved by means of just over 250 dynamic simulations carried out using TRNSYS software. The simulations are based on eight overheating mitigation methods over periods ranging from 1981 to 2100, according to typical annual climate averages and various possible climate trajectories taken from the IPCC's sixth report. The eight solutions analysed are designed to be independent of third-party energy use. Two of them employ automation that requires low electricity consumption but can be easily replaced by a manual alternative. The main aim is to visualize, in relation to an initial situation, what proportions of overheating mitigation and cooling energy demand are achieved by implementing totally passive solutions with simple technology. The second aim is to compare the eight solutions against each other, in order to highlight the most efficient and resilient ones. The results show that heat demand decreases slightly over the decades, while cooling demand increases dramatically compared to the 1981-2000 period. The solutions put in place mitigate this cooling demand but are unable to fully compensate for it. In fact, simulations show that the solutions considered still experience overheating during one third of occupancy time when active cooling systems are switched off.

L'augmentation des températures impacte de nombreux aspects de la vie quotidienne. Parmi ces aspects se trouve la réaction des bâtiments. Ce travail se penche sur la question de l'évolution de la demande énergétique et du confort thermique d'un bâtiment résidentiel face aux probables futures élévations des températures de l'air en Wallonie. Les aspects de résilience et d'impact sur la demande énergétique et le confort de plusieurs solutions d'atténuation de la surchauffe intérieure sont analysés. Cet examen se fait au moyen d'un peu plus de 250 simulations dynamiques réalisées grâce au logiciel TRNSYS. Ces dernières mettent en œuvre huit méthodes d'atténuation de la surchauffe sur des périodes s'étalant de 1981 à 2100, selon des moyennes climatiques annuelles typiques et selon différentes trajectoires climatiques possibles issues du sixième rapport du GIEC. Les huit solutions analysées se veulent indépendantes de l'utilisation d'une énergie tierce. Deux d'entre elles emploient une automatisation nécessitant le recours à une faible consommation d'électricité mais pouvant être facilement remplaçable par une alternative manuelle. Le but principal est de visualiser, par rapport à une situation initiale, quelles proportions d'atténuation de la surchauffe et de la demande énergétique en refroidissement sont atteintes par la mise en place de solutions totalement passives et à la technologie simple. Le second but est de comparer les huit solutions les unes par rapport aux autres afin de mettre en évidence les solutions les plus efficaces et résilientes. Les résultats montrent que la demande en chaleur diminue légèrement au fil des décennies et que la demande en refroidissement augmente drastiquement par rapport à la période 1981-2000. Les solutions mises en place permettent d'atténuer cette demande en refroidissement mais ne parviennent pas à la compenser totalement. En effet, les simulations montrent que les solutions envisagées subissent encore de la surchauffe durant un tiers du temps d'occupation lorsque les systèmes de refroidissement actifs sont à l'arrêt.

I. Table des matières

II.	Table des abréviations	4
III.	Table des unités	4
IV.	Liste des figures	5
V.	Liste des tableaux.....	6
VI.	Introduction.....	7
1.	Changements climatiques globaux.....	8
a.	Évolution historique de la température globale.....	8
b.	État des lieux du réchauffement planétaire en 2023	9
c.	Projections climatiques mondiales futures.....	9
2.	Contexte wallon	12
a.	Réglementation PEB.....	13
VII.	Problématique	14
VIII.	État de l’art.....	15
1.	Données météorologiques.....	15
a.	Données climatiques mondiales	15
b.	Données régionales.....	16
2.	Evolution de la demande énergétique des bâtiments.....	18
3.	Résilience.....	19
a.	Définition du concept.....	19
b.	La résilience des bâtiments face à la problématique de l’augmentation des températures ...	20
IX.	Méthodologie.....	23
1.	Présentation du bâtiment sélectionné.....	23
a.	Plans.....	24
b.	Enveloppe.....	26
c.	Systèmes	26
d.	Rapport PEB.....	27
e.	Étude de faisabilité	27
2.	Modélisation SketchUp	27
a.	Simplifications et hypothèses.....	28
3.	Encodage TRNBuild.....	28
a.	Éléments constructifs.....	28
b.	Horaires d’occupation.....	31
c.	Régimes.....	31
d.	Zones.....	33
4.	Simulation TRNSYS	33

a.	Structure et types utilisés	33
b.	Simulation initiale.....	35
c.	Simulation de base.....	36
d.	Simulation protections solaires automatisées extérieures	36
e.	Simulation positionnement des vitrages.....	36
f.	Simulation composition des vitrages	38
g.	Simulation inertie	38
h.	Simulation ombrage fixe.....	38
i.	Simulation ombrage via des arbres.....	40
j.	Simulation aération nocturne.....	41
k.	Simulation isolation élevée	41
X.	Présentation des résultats.....	42
1.	Résultats globaux	43
2.	Résultats par rapport à la simulation initiale.....	47
3.	Rapport des demandes en chauffage et en refroidissement.....	51
XI.	Analyse des résultats	52
1.	Analyse par type de simulation	53
a.	Simulation 0 : Base_NoGrnd	53
b.	Simulations 1 et 1' : Base et Base_NC	54
c.	Simulations 2 et 3 : Prot_Ext et Prot_Ext_NC	54
d.	Simulations 4 et 5 : Posit_Vitr et Posit_Vitr_NC	55
e.	Simulations 6 et 7 : g_Vitr et g_Vitr_NC.....	56
f.	Simulations 8 et 9 : Inertie et Inertie_NC	57
g.	Simulations 10 et 11 : Ombr_Fixe et Ombr_Fixe_NC	57
h.	Simulations 12 et 13 : Arbres et Arbres_NC	57
i.	Simulations 14 et 15 : Aer_Noct et Aer_Noct_NC.....	58
j.	Simulations 16 et 17 : Isol_Plus et Isol_Plus_NC.....	59
2.	Tableau d'indicateurs pour chaque méthode.....	59
3.	Couplage de solutions.....	60
4.	Critique des résultats	61
XII.	Discussion.....	63
1.	Évolution de la demande énergétique.....	63
2.	Efficacité des solutions testées.....	64
3.	Résiliances des solutions analysées.....	65
XIII.	Conclusion	67
XIV.	Bibliographie.....	68
XV.	Glossaire	73

XVI.	Annexes.....	74
1.	Annexe 1 : Plans de la maison d'habitation.....	74
2.	Annexe 2 : Rapport PEB.....	74
3.	Annexe 3 : Etude de Faisabilité technique, environnementale et économique.....	74

II. Table des abréviations

CO2	Dioxyde de carbone
CMIP6	Sixth Coupled Model Intercomparison Project
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ESM	Earth System Model
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
ODD	Objectifs de développement durable
PAC	Pompe à chaleur
PEB	Performance Énergétique du Bâtiment
RCP	Representative Concentration Pathways
SSP	Shared Socio-economic Pathways
TMY	Typical Meteorological Year
UE	Union Européenne

III. Table des unités

h	heure
K	Kelvin
J	Joule
kWh	kilowattheure
kW	kilowatt
kWc	kilowatts crêtes
m	mètres
Pa	Pascal
W	Watt

IV. Liste des figures

Figure 1 : Évolution historique des températures globales et cause du réchauffement récent	8
Figure 2 : Température moyenne mondiale de l'air en surface illustrée par des bandes de réchauffement allant du bleu (froid) au rouge (chaud) sur trois périodes différentes	11
Figure 3 : IPCC AR6 SYR, Cross-Section Box 2 Figure 1	12
Figure 4 : Evolution à mi-terme et à long-terme de la température moyenne de surface.....	16
Figure 5 : Température estivale annuelle (en °C, lignes supérieures) et température annuelle moyenne (en °C, lignes inférieures) de MAR forcé par la réanalyse de ERA5 (1980 à 2020) et des trois ESM suivant le scénario SSP5-8.5 (1980-2100)	17
Figure 6 : Phases du cycle de la résilience d'un bâtiment.....	21
Figure 7 : Méthodologie.....	23
Figure 8 : Plans rez-de-chaussée.....	24
Figure 9 : Plans premier étage	25
Figure 10 : Coupe numéro 1	25
Figure 11 : Coupe numéro 2	26
Figure 12 : Zonage thermique Rez-de-chaussée.....	27
Figure 13 : Zonage thermique premier étage.....	28
Figure 14 : Configurations des macros de la simulation TRNSYS.....	33
Figure 15 : Évolution des températures annuelles moyennes de l'air selon les différents scénarii	35
Figure 16 : Évolution des amplitudes de températures moyennes mensuelles selon les différents scénarii	35
Figure 17 : Modifications du vitrage.....	37
Figure 18 : Diagramme solaire pour la localisation de Arlon.....	39
Figure 19 : Projection ombrage	39
Figure 20 : Aperçu ombrage fixe	40
Figure 21 : Positionnement des arbres servant d'ombrage.....	41
Figure 22 : Evolution de la demande en chaleur pour la simulation de base.....	43
Figure 23 : Evolution de la demande en froid pour la simulation de base	44
Figure 24 : Évolution des heures de surchauffe annuelles pour la simulation de base	44
Figure 25 : Évolution des températures de l'air et opérative suite à l'activation du refroidissement	53
Figure 26 : Evolution de la part de baisse de la demande énergétique de refroidissement pour la simulation baisse du facteur solaire	56
Figure 27 : Evolution des températures moyennes mensuelles de l'air entre la période 2001-2020 et 2081-2100.....	58
Figure 28 : Evolution annuelle des heures de surchauffe pour la simulation SSP2-4.5 de la période 2041-2060.....	58
Figure 29 : Evolution des résultats de la simulation de base par scénario	63
Figure 30 : Evolution de la surchauffe pour chaque type de solution avec refroidissement actif suivant le scénario SSP2-4.5	64
Figure 31 : Evolution de la surchauffe pour chaque type de solution sans refroidissement actif suivant le scénario SSP2-4.5	65

V. Liste des tableaux

Tableau 1 : Les SSP et leur narratif.....	10
Tableau 2 : Résultats de la comparaison des modèles ESMs avec le modèle MAR.....	17
Tableau 3 : Types de données météorologiques fournies par les différents modèles climatiques.....	18
Tableau 4 : Liste et données physiques des composants des différentes parois.....	29
Tableau 5 : Composition, épaisseurs et coefficient thermique des parois	30
Tableau 6 : Débit de ventilation et de transfert de l'air.....	32
Tableau 7 : Évolution des paramètres du sol	34
Tableau 8 : Distances protections solaires.....	40
Tableau 9 : Identifiants des simulations	42
Tableau 10 : Résultats bruts de la demande en chauffage des simulations avec refroidissement actif.	45
Tableau 11 : Résultats bruts de la demande en chauffage des simulations sans refroidissement actif..	45
Tableau 12 : Résultats bruts de la demande en refroidissement	46
Tableau 13 : Nombre d'heures de surchauffe des simulations avec refroidissement actif.....	46
Tableau 14 : Nombre d'heures de surchauffe des simulations sans refroidissement actif.....	47
Tableau 15 : Comparaison de la demande en chaleur des simulations avec cooling par rapport à la simulation de base.....	48
Tableau 16 : Comparaison de la demande en chaleur des simulations sans cooling par rapport à la simulation de base.....	48
Tableau 17 : Comparaison de la demande en froid des simulations avec cooling par rapport à la simulation initiale	49
Tableau 18 : Comparaison des heures de surchauffe des simulations avec cooling par rapport à la simulation de base.....	49
Tableau 19 : Comparaison des heures de surchauffe des simulations sans cooling par rapport à la simulation de base sans cooling.....	50
Tableau 20 : Part de surchauffe par rapport aux horaires d'occupation pour les simulations avec cooling	50
Tableau 21 : Part de surchauffe par rapport aux horaires d'occupation pour les simulations sans cooling	51
Tableau 22 : Rapport de la demande en chauffage et en refroidissement.....	51
Tableau 23 : Evolution des résultats avec ou sans paramétrisation des températures du sol.....	54
Tableau 24 : Balance énergétique annuelle entre la simulation de base et la simulation protections solaires automatisées.....	55
Tableau 25 : Indices de résiliences attribués à chaque solution.....	60
Tableau 26 : Résultats couplage simulations réduction du facteur solaire et Ombrage fixe	61

VI. Introduction

Les bâtiments sont construits dans le but de créer un microclimat par rapport aux conditions extérieures. Ce microclimat, bien que variable, doit idéalement se situer continuellement dans une zone de confort pour les occupants. Cette zone dépend notamment de la température intérieure du bâtiment qui est l'un des paramètres cruciaux du confort. Cependant, aujourd'hui encore en Europe, une majeure partie des bâtiments résidentiels dépendent des énergies fossiles pour conditionner les températures intérieures (1).

Il existe de nombreuses techniques constructives adaptées à l'environnement dans lequel le bâtiment est construit. En effet, depuis la nuit des temps, l'Homme a adapté son logis aux conditions auxquelles il devait faire face. Cette adaptation passe au travers du choix des matériaux les plus adéquats parmi ceux disponibles à proximité. L'adobe du désert, le bois des grandes forêts, la pierre ou encore la glace des Inuits en sont de bons exemples. Ces matériaux sont alors couplés à des techniques constructives spécifiques à l'environnement auquel le bâtiment est soumis. Parmi elles se retrouvent les toits inclinés dans les régions pluviales et neigeuses, les systèmes de ventilation naturelle dans les régions chaudes, les murs de pierre épais dans les régions à grandes amplitudes thermiques, les maisons sur pilotis dans les régions inondables, etc.

La durée de vie d'un bâtiment construit aujourd'hui en Wallonie pouvant aller certainement jusqu'à 80 ans (2), il est inévitable que celui-ci verra les conditions climatiques de son environnement changer au cours des prochaines décennies. De nombreuses questions se posent alors. Quels sont les nouveaux risques naturels ? Les risques antérieurs aux changements climatiques sont-ils amplifiés ? Les matériaux de construction seront-ils toujours fiables au regard des nouvelles conditions météorologiques ? Les fonctions du bâtiment pourront-elles être maintenues ? Le confort thermique serait-il toujours assuré ? Répondre à l'entièreté de ces questions dépasse largement le périmètre d'étude raisonnable dans le cadre d'un mémoire. Pour cette raison, ce travail se focalisera sur la question de l'évolution du confort thermique du bâtiment et plus particulièrement, sur l'évolution de la demande énergétique nécessaire pour maintenir un confort acceptable au sein du bâtiment.

La crise énergétique apparue suite à la déclaration de guerre de la Russie à l'Ukraine a démontré une fragilité de l'Europe quant à sa dépendance aux importations énergétiques (3). En effet, l'année 2022 s'est vue fortement marquée par des augmentations extraordinaires des prix du gaz et de l'électricité. Ces brusques emballements des prix ont mis en péril la sécurité financière de nombreux citoyens belges et européens. Ces risques énergétiques ont mis en lumière un terme de plus en plus récurrent ces dernières années dans la littérature spécifique : la résilience (4). Cette « capacité d'un système, d'une communauté ou d'une société exposés à des aléas à résister, absorber, s'accommoder, s'adapter, se transformer et se remettre d'un aléa de manière opportune et efficace, y compris en préservant et restaurant ses structures et fonctions essentielles grâce à la gestion de risque » (5). La résilience intéresse à plusieurs niveaux : européen, belge, wallon, territorial, ... (6) (7) Il est donc intéressant de développer une résilience des bâtiments pour prémunir les populations des futurs chocs qui arriveront très probablement dans les prochaines années.

Pour ce faire, un bâtiment résidentiel classique conceptualisé selon les normes de la performance énergétique du bâtiment (PEB) actuelles sera modélisé et simulé sous conditions climatiques projetées. Le but étant de vérifier si un bâtiment répondant à toutes les caractéristiques requises pour la construction en Wallonie depuis 2021 sera toujours aussi performant dans plusieurs décennies et d'envisager quelles sont les mesures passives et résilientes à mettre en place.

1. Changements climatiques globaux

a. Évolution historique de la température globale

Le dernier rapport de synthèse du GIEC annonce clairement les activités humaines comme responsables du dérèglement climatique. Les températures globales de la surface de la Terre sont passées à +1,1°C entre 2011 et 2020 par rapport à la température correspondante aux années références de 1850 à 1900 (8). La figure 1 ci-dessous illustre l'évolution historique des températures globales de surfaces de la Terre. Le graphique (a) représente les changements de températures apparus entre l'an 1 et l'année 2020 (9). Deux types de données forment ce graphe. D'une part les archives paléoclimatiques représentées par la ligne grise entre les années 1 à 2000. Et d'autre-part, la ligne noire qui représente les observations directes depuis 1850 jusqu'à 2020. Une augmentation brutale des températures apparaît durant cette période.

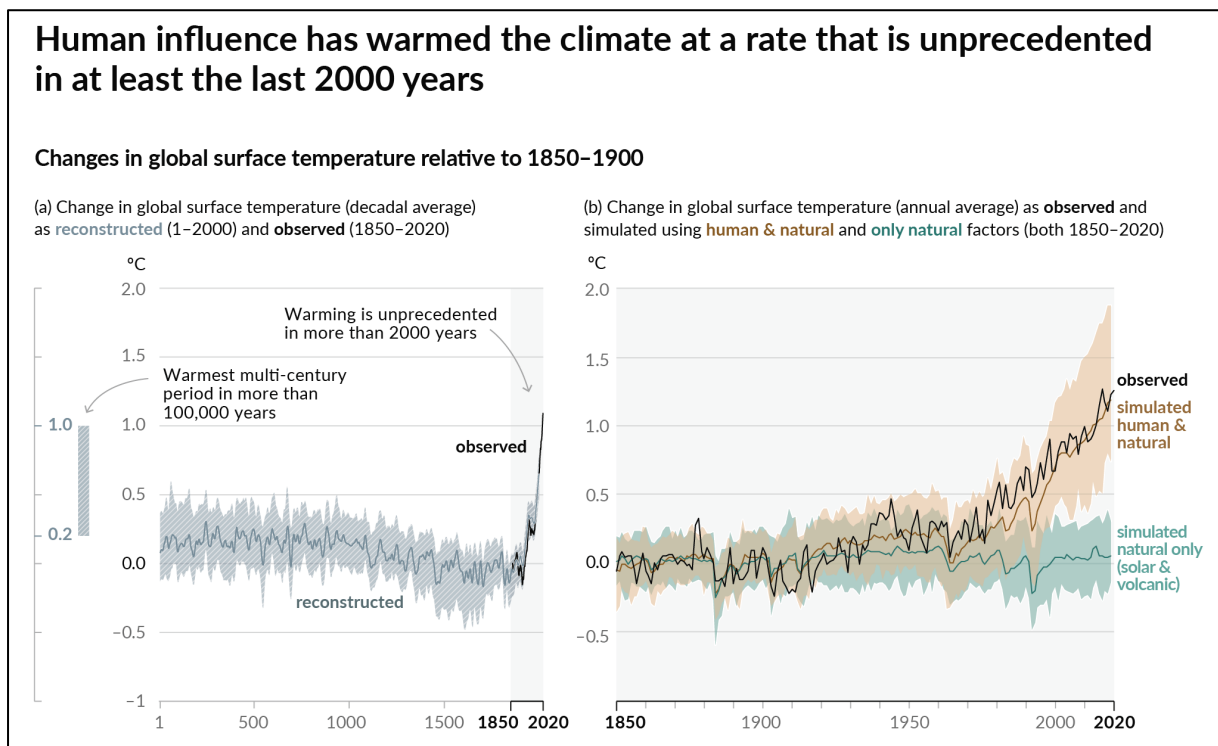


Figure 1 : Évolution historique des températures globales et cause du réchauffement récent

Le graphique de droite (b) fait un zoom sur cette période charnière de 1850 à 2020. Dans cette représentation de l'évolution des températures globales, trois jeux de données sont représentés. Tout d'abord, s'y retrouve, avec la ligne noire continue, les données observées comme dans le graphique (a). Ensuite sont comparées les simulations issues de la sixième phase du « Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 » (CMIP6)¹. En bleu sont représentées les moyennes multi-modèles (lignes continues) estimant l'évolution des températures dues uniquement aux phénomènes naturels (activité solaire et volcanique). Et en marron, apparaissent les moyennes multi-modèles de l'évolution des températures en combinant causes naturelles et anthropiques. Les zones colorées autour des lignes continues sont les fourchettes probables des simulations. Il est facilement remarquable en comparant ces deux courbes, que l'augmentation des températures est principalement imputable à l'Homme et non aux phénomènes planétaires naturels.

¹ CMIP6 est un projet visant à coordonner un grand nombre d'équipes de chercheurs en climatologie afin de comparer de multiples simulations climatiques mondiales (66)

b. État des lieux du réchauffement planétaire en 2023

Comme vu dans la section précédente, la température globale a augmenté de +1,1°C par rapport aux températures de la période de référence 1850-1900. Mais cette augmentation n'est pas identique selon que ce soit la surface des océans ou des continents qui est analysée. En effet, les terres ont tendance à se réchauffer bien davantage que les océans. Pour la même période de 2011 à 2020, les températures des terres ont augmenté en moyenne de +1,59°C par rapport à la période de référence contre une élévation de 0,88°C pour les océans (10). Cette différence est due à l'effet tampon provoqué par l'eau des océans qui permet d'absorber davantage de chaleur. Des changements du climat globaux et majeurs ont déjà lieu en ce moment. Aucune région ou partie du globe n'est épargnée mais toutes ne sont pas affectées de la même manière. De nombreux peuples, ayant paradoxalement le moins contribué aux émissions de gaz à effet de serre (GES), subissent déjà les impacts induits par les changements climatiques qui accentuent l'intensité et la fréquence des événements extrêmes.

c. Projections climatiques mondiales futures

Le rôle du GIEC n'est pas uniquement de décrire les modifications climatiques passées et présentes. Une grande partie des travaux des trois groupes se base sur des scénarii d'évolution climatiques futurs. Ces scénarii ont pour but d'explorer une série d'horizons possibles en l'an 2100. Ceux-ci dépendent des futures émissions de GES qui seront rejetées par l'humanité durant ce siècle : elles-mêmes dépendantes des choix politico-économiques de l'Humanité. Dans le sixième rapport du GIEC, ces scénarii sont repris sous la dénomination SSP pour « Shared Socio-economic Pathways » (Trajectoires socio-économiques partagées). Ces dernières sont catégorisées selon cinq familles de SSP1 à SSP5 qui « décrivent une gamme de tendances plausibles dans l'évolution de la société au cours du 21^e siècle » (11). Le tableau 1 reprend une description brève de chacun des types de SSP (12) (13) (14). Dans le cadre de ce travail, seules seront traitées les SSP2 correspondant à la poursuite des efforts actuels pour promouvoir le développement durable, le SSP3 correspondant à un scénario où les états se concentrent sur les problèmes nationaux voire de plus petite échelle et délaissant la coopération internationale, et enfin au SSP5 décrivant un monde où les sociétés ont continué à se baser sur les énergies fossiles pour développer leur économie. Ces scénarii sont associés à un chiffre exprimant le forçage radiatif approximatif estimé en 2100. Ces forçages radiatifs ont une échelle allant de 1,9 (le plus faible) à 8,5 (le plus haut). Ainsi, le scénario le plus défavorable à l'Humanité et aux écosystèmes de la planète sera noté SSP5-8.5, exprimant un scénario où les Hommes ont continué à user massivement des énergies fossiles et où par conséquent, le forçage radiatif a atteint la valeur de 8,5.

Tableau 1 : Les SSP et leur narratif²

Scénario	Narratif	Défi pour l'atténuation	Défi pour l'adaptation
SSP1 Développement durable	Fort coopération internationale, priorité donnée au développement durable, amélioration des conditions de vie et préférences des consommateurs pour des biens et services respectueux de l'environnement, peu intensifs en ressources et en énergie.	Faible	Faible
SSP2 Poursuite des tendances	Les tendances sociales, économiques et technologiques actuelles se poursuivent, le développement et la croissance progressent de manière inégale selon les pays et les régions. Les institutions nationales et internationales œuvrent à la réalisation des objectifs de développement durable qui progresse lentement. L'environnement se dégrade malgré un développement moins intensif en ressources et en énergie.	Moyen	Moyen
SSP3 Rivalités régionales	Résurgence des nationalismes, développement économique lent, persistance des inégalités et des conflits régionaux. Les pays sont guidés par des préoccupations en matière de sécurité et de compétitivité. Ils se concentrent sur les problèmes nationaux voire régionaux et sur les enjeux de sécurité alimentaire et énergétique. Faible priorité internationale pour la protection de l'environnement, qui se dégrade fortement dans certaines régions.	Elevé	Elevé
SSP4 Inégalités	Développement marqué par de fortes inégalités entre et à l'intérieur des pays. Dégradation de la cohésion sociale et multiplication des conflits. Fossé croissant entre une élite connectée et mondialisée, responsable de la majorité des émissions de GES, et un ensemble fragmenté de populations à faible revenu, peu éduqué et vulnérable au changement climatique. Le secteur énergétique se diversifie entre sources d'énergie fortement carbonées et décarbonées. Les politiques environnementales se concentrent sur les enjeux locaux.	Faible	Elevé
SSP5 Développement conventionnel	Développement adossé à l'exploitation forte des énergies fossiles et marqué par des investissements élevés dans la santé, l'éducation et les nouvelles technologies. Adoption de modes de vie intensifs en ressources et en énergie à travers le monde. La croissance économique et le progrès technologique sont élevés. Les problèmes de pollution locale sont bien gérés et l'adaptation est facilitée notamment grâce au recul de la pauvreté.	Elevé	Faible

Sources : Riahi et al. (2017), O'Neill et al. (2015), Bauer et al. (2017)

Ainsi donc, chaque scénario engendre des effets sur des variables physiques telle que la concentration en CO₂ ou en CH₄ atmosphérique. L'ensemble de ces variables engendre des modifications du climat qui provoquent une évolution des températures moyennes mondiales. Comme pour la figure 1, la figure 2 ci-dessous illustre l'évolution des températures moyennes mondiales de l'air en surface. Le graphique est divisé en trois périodes. La première période, de 1750 à 1850, voit l'évolution des températures osciller autour du 0°C d'augmentation. La seconde section, reprenant l'évolution des températures entre 1850 et 2020, est fidèle aux données commentées précédemment. Vient ensuite la troisième section, absente du graphique de la Figure 2, qui illustre cinq voies d'évolution possibles des températures entre l'heure actuelle et l'an 2100. Les scénarii sont repris du moins optimiste en termes de réduction des GES, représenté par la flèche la plus en hauteur, au plus optimiste représenté par la flèche tout en bas. Les lignes pointillées, munies du chiffre ½ ou 0, marquent respectivement les réductions de moitié ou totale des émissions carbone. Les lignes pointillées traversées par une flèche marquent le moment de décroissance de ces émissions carbone. Il est intéressant de noter que même dans le scénario SSP2-4.5, qui représente une continuité des efforts mis en place à l'heure actuelle, la neutralité carbone n'est pas atteinte à l'horizon 2100. Le pire des scénarii (SSP5-8.5) annonce une augmentation des températures moyennes de +6°C en 2100 par rapport à la période 1850-1900 alors que le scénario considérant une diminution des émissions carbone dans les prochaines années atteint seulement les +1,5°C en 2100.

² Source : I4CE, 2019, d'après Riahi et al. (2017), O'Neill et al. (2015), Bauer et al. (2017)

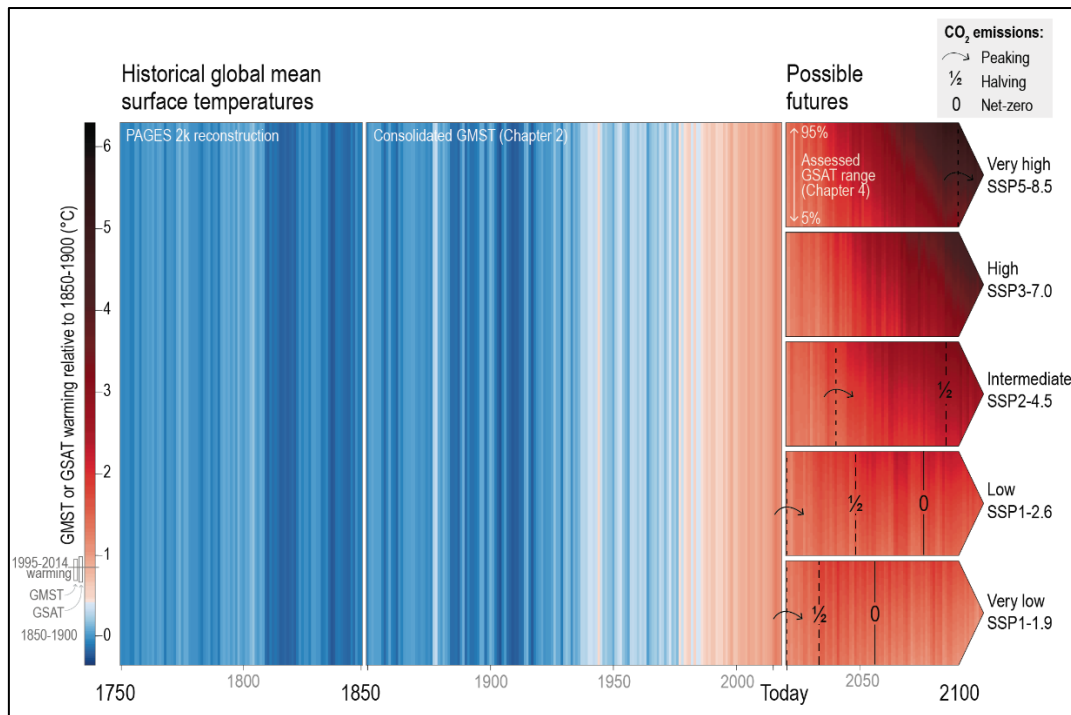


Figure 2 : Température moyenne mondiale de l'air en surface illustrée par des bandes de réchauffement allant du bleu (froid) au rouge (chaud) sur trois périodes différentes

La figure 3 ci-dessous résume les éléments présentés dans cette introduction. La première section intitulée « *a) AR6 integrated assessment framework on future climate, impacts and mitigation* », illustre les relations dynamiques intervenant entre les activités humaines, les impacts sur le climat et l'intensité des risques que courent les sociétés humaines face aux changements climatiques. Les choix socio-économiques que prendront les sociétés humaines conduiront à émettre de façon plus ou moins importante des GES. L'importance de ces GES dans l'atmosphère contribuera à augmenter ou stabiliser les températures moyennes mondiales. Au plus les augmentations de température seront importantes, au plus les risques et les impacts que subiront les sociétés humaines seront importants. Celles-ci seront alors amenées à réagir en s'adaptant aux nouvelles conditions de vie sur Terre et en agissant sur leurs émissions afin de tenter de réduire les augmentations de températures mondiales. On remarque sur le graphique de gauche que les émissions de CO₂ varient très fortement entre les scénarii SSP5-85, SSP3-70 et SSP2-45. Pourtant les températures continuent de grimper comme illustré au graphique du milieu. Seules les réductions d'émissions drastiques des SSP1-2.6 et SSP1-1.9 permettent de limiter l'augmentation des températures mondiales sous la barre de +2°C. La barre ombragée reprise à droite des températures montre que déjà au-delà de +2°C, les sociétés humaines encourent des risques sérieux face aux éléments naturels.

Le tableau b) nommé « *Scenarios and pathways across AR6 Working Group reports* » reprend les scénarii utilisés par les groupes de travail un à trois du sixième rapport et les compare à ceux utilisés dans le rapport précédent (les RCP pour Representative Concentration Pathways). Les trois évolutions analysées dans ce rapport sont reprises comme scénario d'émission intermédiaire, haut et très haut. Enfin, la dernière iconographie illustre les composantes d'un risque que sont l'exposition, la vulnérabilité, la réponse et le hasard influencés par les facteurs climatiques.

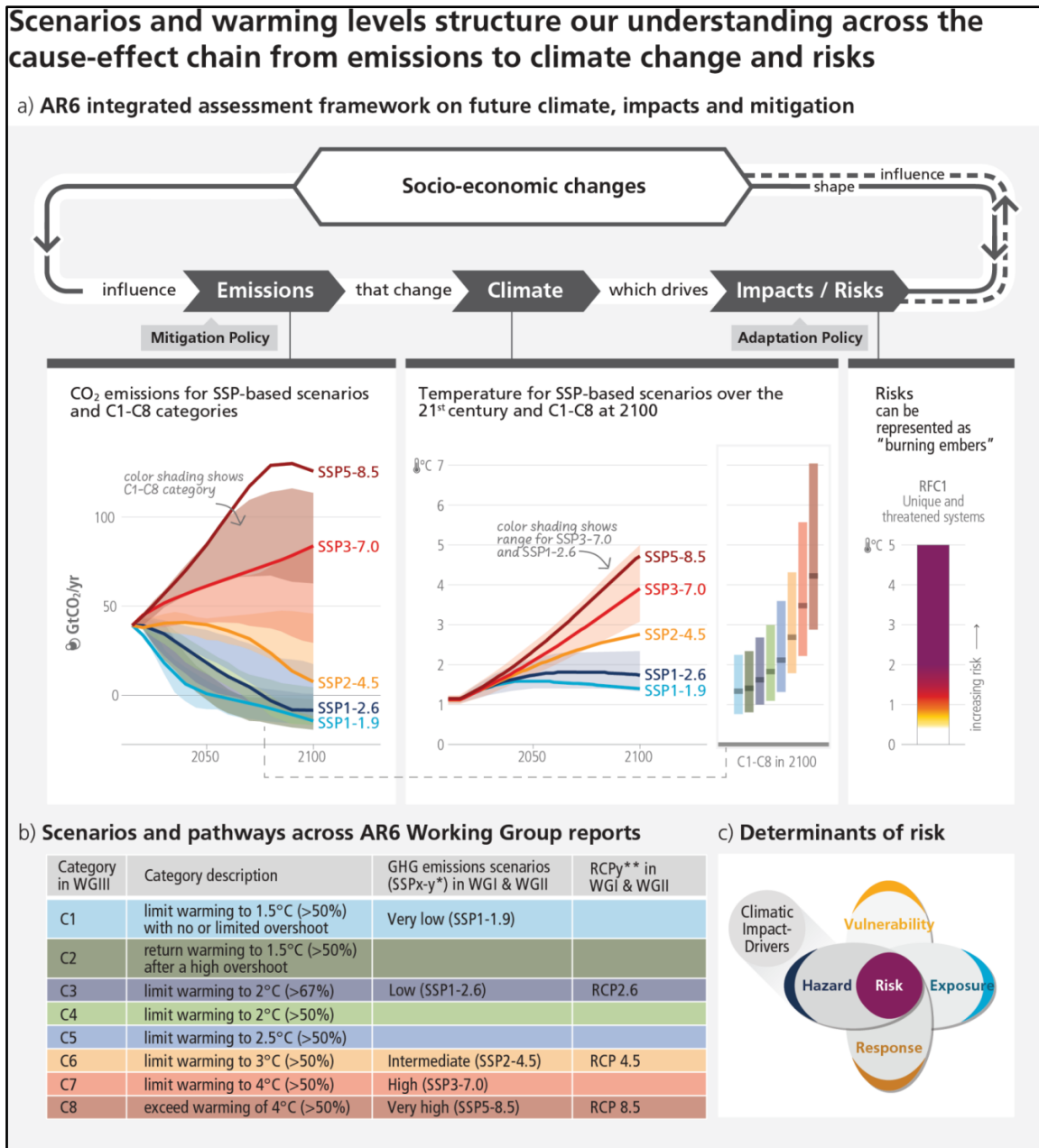


Figure 3 : IPCC AR6 SYR, Cross-Section Box 2 Figure 1

2. Contexte wallon

A l'échelle de la Wallonie aussi les effets du changement climatique se font déjà ressentir. En effet, ces dernières années la Belgique a vu ses normales de saison être modifiées. Les hivers se font plus doux et persistants alors que des sécheresses et des vagues de chaleur s'accumulent d'années en années durant des étés chauds (15). La Wallonie est également sujette à d'importants aléas d'inondations et d'îlots de chaleur urbains dû à son urbanisation dense et à fleur de cours d'eau pour la plupart de ses grandes villes. Ces facteurs aggravent la vulnérabilité de ces zones où ce sont généralement les plus démunis qui paient le plus lourd tribut des dégâts occasionnés par des événements naturels. Par ailleurs, l'agriculture de la région est également menacée par les stress hydriques, coulées de boue, ravageurs et autres maladies (16). Ces augmentations de température et vagues de chaleur impactent également les bâtiments, qu'ils soient résidentiels ou tertiaires. En effet, l'augmentation des températures extérieures induit des

changements sur le microclimat intérieur des bâtiments. Les températures grimpent en raison d'un excédent de gains énergétique que le bâtiment n'est plus en mesure d'évacuer vers son environnement. S'en suit une augmentation des températures intérieures et une sensation d'inconfort pour les occupants. Cette sensation est accrue si l'édifice se situe dans un îlot de chaleur urbain. Les maisons et immeubles équipés de climatiseurs actionnent alors le conditionnement de l'air, ce qui permet de résoudre le problème d'inconfort le temps de fonctionnement. Mais cette solution augmente drastiquement les consommations énergétiques des bâtiments en plus de créer des pics de demande électrique importants et simultanés. Ces hausses drastiques de la demande d'électricité durant les fortes chaleurs risquent d'entraîner une coupure du réseau électrique, laissant les températures augmenter dangereusement au sein des bâtiments (5). Or le logement est déjà un secteur extrêmement énergivore en Wallonie. En 2020, le secteur du logement représentait, à lui tout seul, 27% de la consommation d'énergie finale de la Wallonie (17). Le logement est donc le deuxième secteur consommateur d'énergie de Wallonie, derrière le secteur de l'industrie (35%) qui est en baisse depuis plusieurs années (-44% d'énergie finale utilisée depuis 1990) et juste devant le secteur du transport (26%) qui, à l'inverse, a vu sa part grandir depuis 1990 (+18%). Le secteur du logement augmente, quant à lui, légèrement sa demande énergétique (+4%). Une grande partie de l'énergie consommée par les logements est destinée au chauffage des locaux. Une étude (18) réalisée en 2016 annonce qu'en moyenne, en 2010, 66% de l'énergie finale utilisée par les ménages européens étaient destinés au chauffage des locaux. Ce chiffre grimpe à plus de 80% si l'on considère également l'énergie destinée à fournir de l'eau chaude sanitaire. Évidemment ces données à l'échelle européenne varient de pays en pays. Les pays du Sud ayant besoin de bien moins d'énergie de chauffage que les pays situés plus au Nord. Malgré tout, une enquête menée par l'AQUAWAL et le CEHD (19) sur plus de 2000 ménages représentatifs et datant de 2015 annonce une part de consommation élevée à 87% pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (20).

a. Réglementation PEB

Face à la part importante de la consommation énergétique des bâtiments, la Wallonie met en place, dès 1985, une première réglementation thermique. Celle-ci porte uniquement sur l'isolation thermique des logements (21). L'année suivante, la réglementation est élargie aux immeubles de bureaux et bâtiments scolaires et concerne cette fois l'isolation et la ventilation des bâtiments. Cette réglementation est appliquée jusqu'en 2008 qui voit l'apparition de la véritable PEB, acronyme pour Performance Énergétique des Bâtiments, qui évoluera de nombreuses fois au fil des années. Cette réglementation intervient en réponse à la Directive européenne 2002/91/CE qui se verra remanier à plusieurs reprises afin d'améliorer les performances énergétiques de l'ensemble des pays de l'Union Européenne (22). Depuis le 1^{er} janvier 2021, toutes les nouvelles constructions doivent répondre aux exigences PEB de la norme Q-Zen (Quasi Zéro Energie). Cela signifie notamment que la consommation spécifique du logement doit être de maximum 85 kWh/m².an. Cette valeur correspond à la valeur A sur l'échelle de la PEB. La norme Q-Zen contient de nombreux autres standards à atteindre pour les nouveaux bâtiments comme entre autres, un certain niveau d'isolation, de ventilation, d'électromobilité, ... (23) L'objectif attendu par le parlement européen est d'atteindre la neutralité climatique d'ici 2050 (24).

VII. Problématique

La Wallonie possède un parc immobilier énergivore qui représente environ 37% de la consommation d'énergie finale de la région. De plus, le vecteur énergétique phare reste les produits pétroliers qui couvraient encore 44,3% de la demande en 2019 (25). Des exigences de performances énergétiques sont mises en place afin de diminuer progressivement cette demande excessive ainsi que les émissions de carbone qui y sont liées. Cependant, les bâtiments construits aujourd'hui verront certainement le climat dans lequel ils évoluent varier considérablement dans les prochaines décennies. La première conséquence est l'augmentation des températures moyennes annuelles. Ces variations de température risquent de modifier l'équilibre actuel de la demande énergétique des bâtiments. La demande de chauffage en hiver risque de diminuer et celle de refroidissement en été risque d'augmenter. Mais dans quelle proportion ? Ce transfert de la demande énergétique touche plusieurs enjeux sociétaux : un enjeu écologique avec le risque d'augmentation des rejets de GES dû à l'utilisation massive de climatiseurs. Un enjeu énergétique car un recours aussi massif aux climatiseurs risque de créer des pénuries d'électricité. Et enfin, un enjeu social puisque les personnes âgées ou la jeune enfance souffriront bien plus des vagues de chaleur que les individus en bonne santé. Sans oublier les ménages les plus précarisés qui sont également ceux qui auront le plus de difficulté à se protéger contre les fortes chaleurs.

Dès lors, il semble utile d'analyser l'évolution de la demande énergétique des bâtiments dans des conditions climatiques correspondant aux trajectoires possibles du climat de la Wallonie. En plus de cela, il serait intéressant d'envisager quelles sont les solutions pouvant être mises en place pour se prémunir de l'augmentation des températures de manière passive.

La question de recherche de ce mémoire est la suivante :

« Quelle est l'évolution de la demande énergétique en chauffage et en refroidissement d'un bâtiment résidentiel répondant aux normes PEB applicables en 2023 face aux variations des projections de températures estimées en Wallonie ? Analyse via une simulation dynamique TRNSYS selon différents scénarii et identification des aspects de résilience du bâtiment face à cette problématique ».

L'apport de ce travail à la communauté scientifique est l'utilisation de projections climatiques très récentes (2022) et spécifiques à la ville d'Arlon pour un bâtiment résidentiel pour lequel une panoplie de mesures passives de protection de la surchauffe sont simulées.

VIII. État de l'art

1. Données météorologiques

a. Données climatiques mondiales

Les données climatiques globales générées par les experts du monde entier et compilées par le GIEC permettent d'analyser les évolutions climatiques de notre planète. Comme mentionné dans l'introduction, plusieurs scénarii sont possibles selon les diverses réactions politiques et socio-économiques qui prendront place durant les prochaines années et décennies. Ces choix purement anthropiques joueront un rôle déterminant sur l'avenir de l'évolution climatique du monde et de ce fait, sur les conséquences que vivront l'entièreté des organismes peuplant la Terre.

A partir de ces données récoltées, des modèles climatiques globaux sont générés comme par exemple le modèle ERA5 qui représente la cinquième génération de données issues de l'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (26) et servant à alimenter le développement du programme européen Copernicus. Ce programme fournit à chaque citoyen européen l'accès à une base de données historiques et quasi instantanées issues de l'observation de la Terre (27). Cependant, les modifications climatiques n'agissent pas uniformément autour du globe. Et tout comme certaines régions sont davantage soumises aux cyclones ou tempêtes par rapport au reste du monde, l'augmentation des températures ne se fera pas uniformément d'une région à l'autre et dépendra de nombreux paramètres. Par exemple, les océans jouent un rôle tampon important en absorbant une grande quantité de chaleur grâce à leur forte inertie. Ce qui engendre un réchauffement beaucoup plus marqué sur les terres que dans les océans (11).

La Figure 4 ci-dessous illustre très bien ce phénomène. Les quatre cartes représentent l'évolution spatiale de la température annuelle moyenne de l'air près de la surface selon des projections multi-modèles (28). Les planisphères du haut représentent le réchauffement global pour la période 2041-2060 (à gauche) et pour la période 2081-2100 (à droite) suivant le scénario SSP1-2.6. Les cartes du bas représentent l'évolution des températures pour les mêmes dates selon le scénario SSP3-7.0. Une disparité est clairement identifiée grâce à l'échelle de couleurs utilisée. La quasi-totalité des cartes sont colorées en rouge, cette couleur servant à identifier les zones où un réchauffement opère (à l'inverse du bleu qui illustre les zones de refroidissement). Les zones en rouge plus foncé montrent une augmentation plus marquée des températures que les zones colorées en rouge plus clair. De nettes disparités sont visibles entre les océans et les surfaces continentales ainsi qu'entre l'hémisphère Nord et celui du Sud. Cette hétérogénéité de changement des températures met en valeur l'intérêt de construire des modèles pour des échelles plus réduites afin de considérer l'évolution des différents paramètres climatiques au sein de régions de plus en plus précises. Affiner les prédictions météorologiques donne la possibilité de se préparer au mieux aux changements futurs quels qu'ils soient.

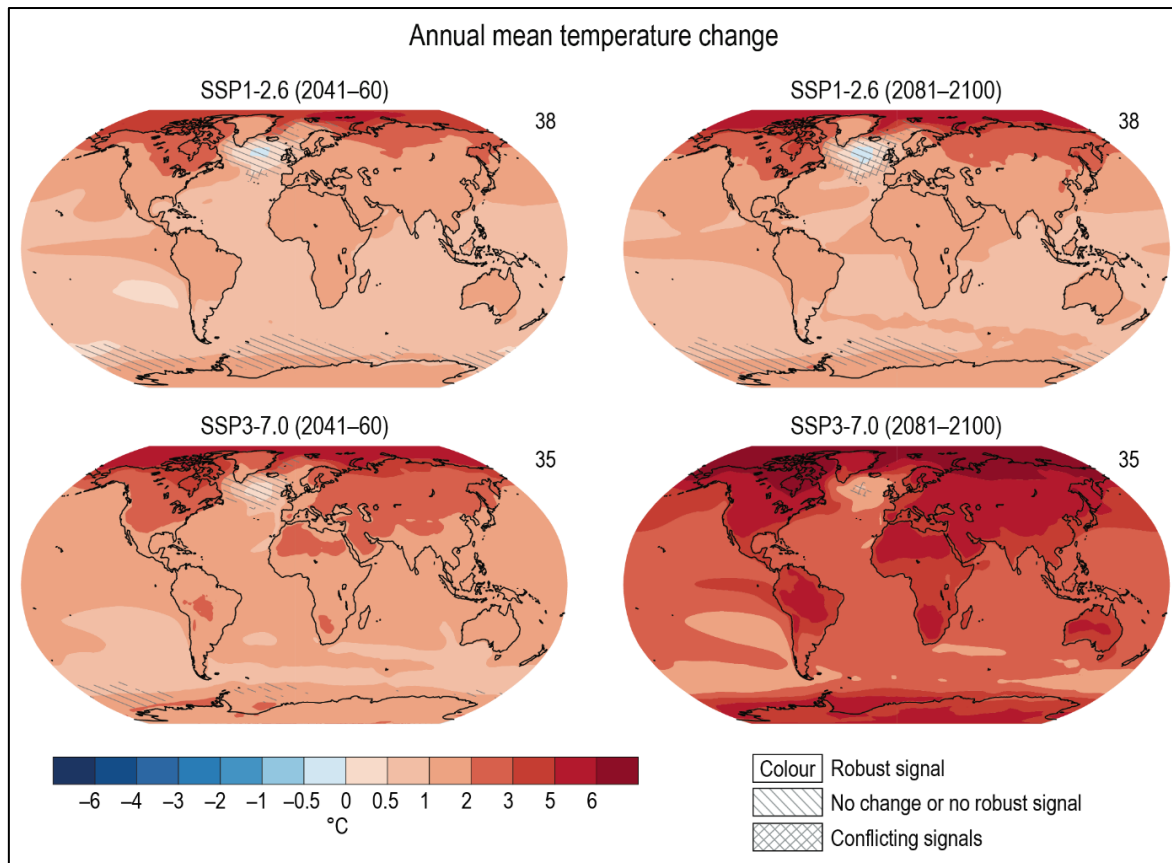


Figure 4 : Evolution à mi-terme et à long-terme de la température moyenne de surface

b. Données régionales

Pratiquer une descente d'échelle à partir de données météorologiques globales n'est pas une chose aisée et nécessite des outils spécifiques complexes. Le Modèle Atmosphérique Régional (MAR) est l'un de ces outils. Ce modèle a l'énorme avantage de fournir des données météorologiques à haute résolution, temporellement et spatialement homogènes (données horaires et 5 kilomètres de résolution) grâce à une réanalyse des modèles existants. Bien connu de la communauté scientifique, le modèle MAR était utilisé initialement dans les zones polaires avant d'être adapté aux zones tempérées et au climat tropical (29). Concernant la Belgique, cette méthode a été utilisée par l'Université de Liège dans son programme OCCuPANT pour caractériser la météo des douze villes les plus importantes du royaume. La méthode MAR réanalyse le modèle climatique ERA5 ainsi que 3 modèles système Terre (ESM pour « Earth System Model »). Ces trois ESM sont issus de la base de données « Sixth Coupled Model Intercomparison Project » (CMIP6). L'utilisation de ces modèles est nécessaire pour produire des données futures. En effet, le modèle ERA5 ne produit des résultats que pour les périodes existantes. Une comparaison de la réanalyse MAR des ESMs avec la réanalyse MAR du modèle ERA5 a permis de valider la fiabilité des trois modèles. Concrètement, le modèle ERA5 et les 3 modèles ESM sont réanalysés sur une même période (1980 à 2014) et une comparaison permet de dire si les résultats sont assez similaires pour se fier aux projections climatiques futures pour les trois modèles ESM. (30) Le résultat de cette comparaison est visible à la figure 5 (30) qui montre la température estivale annuelle (en °C, lignes supérieures) et température annuelle moyenne (en °C, lignes inférieures) de MAR forcé par la réanalyse de ERA5 (1980 à 2020) et des trois ESM suivant le scénario SSP5-8.5 (1980-2100). La ligne noire représente le modèle ERA5 et se termine en 2020. Superposées à cette valeur, les résultats pour les trois autres modèles : le modèle BCC (Beijing Climate Centre) en rouge ; le modèle MIR en vert et réalisé par le Japanese modelling community ; le modèle MPI (Max Planck Institute) en bleu.

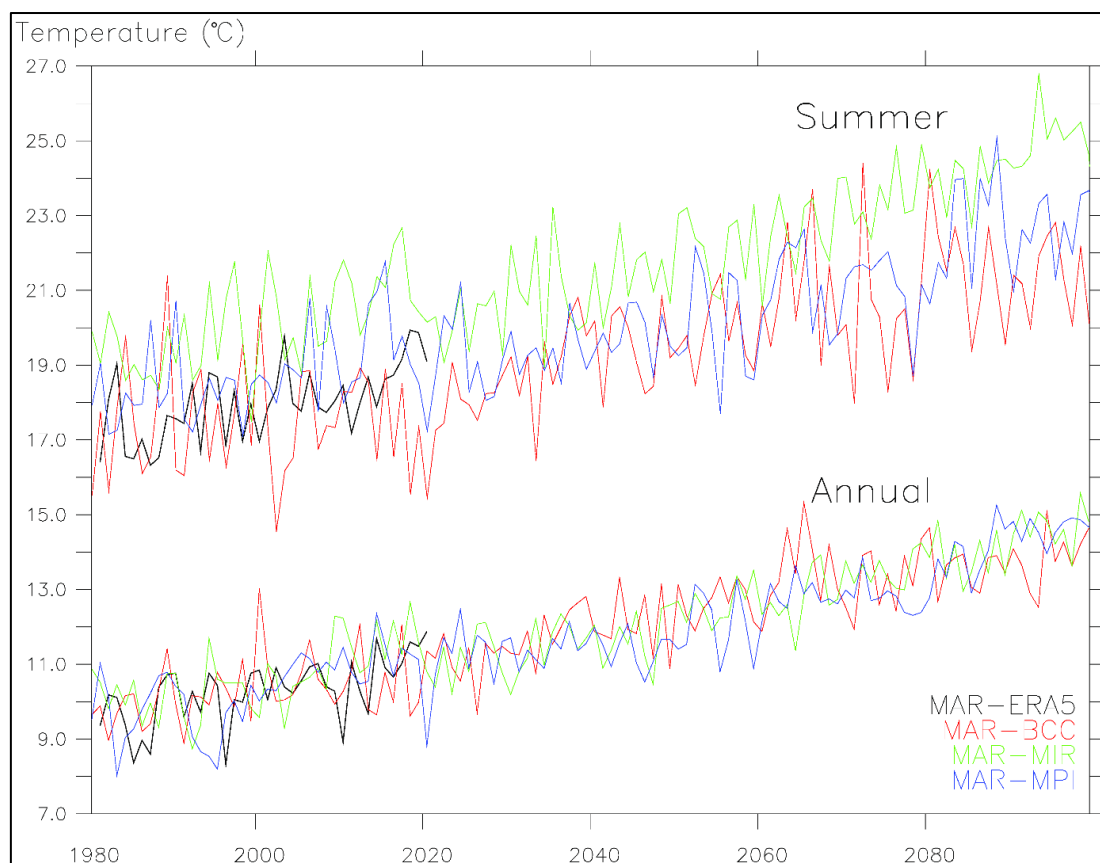


Figure 5 : Température estivale annuelle (en °C, lignes supérieures) et température annuelle moyenne (en °C, lignes inférieures) de MAR forcé par la réanalyse de ERA5 (1980 à 2020) et des trois ESM suivant le scénario SSP5-8.5 (1980-2100)

Le tableau 2 (30) offre les résultats de la comparaison des trois modèles ESMs avec le modèle ERA5. Les trois résultats sont similaires mais le modèle MPI semble être celui se rapprochant le plus du modèle ERA5.

Tableau 2 : Résultats de la comparaison des modèles ESMs avec le modèle MAR

1980–2014 over Belgian territory	Timescale	MAR-ERA5	MAR-BCC	MAR-MPI	MAR-MIR
Mean temperature at 2 m a.g.l. (in °C)	annual	10.1 ± 6.2	10.3 ± 6.0	10.1 ± 6.4	10.4 ± 7.2
	summer	17.7 ± 1.3	17.6 ± 1.7	18.6 ± 1.2	19.9 ± 1.1
Mean incoming solar radiation (in W m ⁻²)	annual	119 ± 78	122 ± 79	116 ± 83	134 ± 85
	summer	213 ± 20	221 ± 20	224 ± 22	239 ± 25

Les modèles fournissent des données météorologiques horaires pour chacun des scénarii repris pour chaque période et selon des années météorologiques moyennes, extrêmes ou subissant des vagues de chaleur importantes. Ces données météorologiques sont au nombre de treize et sont reprises dans le tableau 3 ci-dessous. A chaque type de données correspond la hauteur par rapport au niveau du sol (m a.g.l. pour meters above ground level) ainsi que l'unité avec laquelle elle est exprimée.

Tableau 3 : Types de données météorologiques fournies par les différents modèles climatiques

Weather variable name	Level	Units
Dry bulb temperature	2 m a.g.l.	°C
Relative humidity	2 m a.g.l.	%
Global horizontal radiation	Ground (horizontal surface)	$W m^{-2}$
Diffuse solar radiation	Ground (horizontal surface)	$W m^{-2}$
Direct normal radiation	Ground (horizontal surface)	$W m^{-2}$
Wind speed	10 m a.g.l.	$m s^{-1}$
Wind direction	10 m a.g.l.	north degrees
Dew point temperature	2 m a.g.l.	°C
Atmospheric pressure	ground	Pa
Cloudiness	All troposphere	tenths
Sky temperature	All troposphere	K (according to Duffie and Beckman, 2013)
Specific humidity	2 m a.g.l.	$kg kg^{-1}$
Precipitation	Ground	mm

2. Evolution de la demande énergétique des bâtiments

La demande énergétique résidentielle n'a cessé d'augmenter ces dernières décennies au point que le secteur domestique est devenu le principal poste de dépense énergétique mondial. Ce dernier a grimpé jusqu'à atteindre 40% de la consommation d'énergie primaire aux Etats-Unis et en Europe (18). Ces augmentations sont dues à des croissances démographiques majeures durant cette période dans ces deux régions. La consommation énergétique des bâtiments devrait donc se stabiliser dans l'UE et aux USA qui possèdent un large parc immobilier et une démographie constante. En revanche, la création de logements va prendre une importance considérable sur le continent africain dont l'augmentation de la démographie est la plus importante de la planète (31). Ajouté à cela que la plupart des pays africains vont certainement subir des températures extrêmement élevées durant les prochaines décennies, l'Afrique risque de voir la part de sa consommation énergétique dédiée au secteur résidentiel exploser. Dès lors, il est important de penser dès aujourd'hui, et ce pour toutes les régions du monde, à la façon dont la demande énergétique risque d'évoluer.

De nombreux chercheurs se sont penchés sur les conséquences que pourraient avoir les changements climatiques sur les bâtiments et plus particulièrement sur l'évolution de la demande en chauffage et en refroidissement des bâtiments résidentiels (18), (32), (33) ou non-résidentiels, sous différents climats (18), (34), en examinant les différents postes d'utilisation de l'énergie finale utilisée dans le bâtiment (18) ou encore avec différents niveaux de performance énergétique (32). Certaines études se basent sur des années météorologiques typiques (32) alors que d'autres utilisent des années météorologiques extrêmes (35). De manière générale, dans le cas d'un climat tempéré où la demande est principalement tournée vers du chauffage, les études montrent une baisse de la demande en chauffage mais une augmentation de la demande en refroidissement (18), (32). Une étude annonce une diminution de la demande énergétique en chauffage de 34% et une augmentation de 72% de la demande en énergie de climatisation à l'horizon 2100 (36).

En effet, l'augmentation des températures moyennes permettra très probablement de réduire le nombre d'heures de chauffage des locaux. Cependant, le maintien du confort thermique intérieur durant les périodes de fortes chaleurs astreindra à l'utilisation massive des climatiseurs comme c'est déjà le cas dans de nombreux pays au climat chaud (37). Le refroidissement des locaux est d'ailleurs la consommation finale d'énergie des bâtiments qui connaît la croissance la plus rapide avec une demande ayant presque triplé depuis 1990 (38). Etant donné cette importance croissante de la demande en

refroidissement et les enjeux que celle-ci génère, de nombreuses études se penchent sur une évaluation des performances des systèmes de refroidissement existants. Dans une étude réalisée par Elnagar et al en 2023, l'équipe se penche sur une évaluation qualitative des systèmes de refroidissement actifs via un examen axé sur la flexibilité du système et de sa résilience climatique (38). Mais il existe également des méthodes de refroidissement passif qui peuvent être comparées avec des refroidissement actifs comme c'est le cas de l'étude menée par Oropeza-Perez et Alberg Østergaard en 2018 (33). Lors de cette recherche, trois méthodes de refroidissement actif ont été comparées avec dix méthodes passives via des simulations dynamiques générées grâce au logiciel EnergyPlus. Les tests ont été réalisés selon plusieurs conditions extérieures en faisant varier les conditions d'extrêmes à normales. Les conclusions montrent que dépendant des conditions extérieures, certaines méthodes passives pouvaient être aussi efficaces que les méthodes de refroidissement actif. D'autres études ont utilisé des simulations dynamiques afin de mesurer les performances énergétiques ou le confort des bâtiments. C'est notamment le cas d'un projet Interreg (39) mené en 2018 qui analyse le confort et l'aspect énergétique de deux bâtiments qui subissent une panne d'électricité engendrant l'arrêt du chauffage de la pompe à chaleur. L'évaluation des réactions selon différents paramètres de conception des bâtiments a été réalisée à l'aide du logiciel de simulations dynamiques TRNSYS.

3. Résilience

a. Définition du concept

Le terme de résilience est complexe et nécessite la prise en compte de nombreux aspects afin de définir convenablement ce concept utilisé dans de nombreux domaines. Historiquement, le mot latin *resilire*, alliant le verbe *salire* signifiant « sauter » et le préfixe « re » indiquant un retour en arrière, est à l'origine des mots « résiliation » et « résilience ». (40) Le premier terme est apparu dans la langue française au Moyen-Âge avec la signification que l'on connaît encore aujourd'hui. Le second terme a été introduit dans la langue anglaise avec une concentration sur l'aspect du rebond, sur le fait de réagir à un choc de manière positive et non pas comme un recul en arrière comme entendu dans le terme résiliation. Le mot résilience est ensuite réintroduit dans la langue française avec la connotation commune actuelle de réaction rapide et d'adaptation à un choc. Rapidement popularisé, le terme est employé aujourd'hui pour caractériser un grand panel de sujets : objets, territoires, politiques, gouvernances, personnes, bâtiments, réseaux, environnement, etc... Cet aspect « lisière » du concept de résilience, à savoir son appropriation par de nombreux domaines de recherches, le rend polysémique ce qui complexifie incontestablement la mise en place d'une définition générale. Malgré tout, le fait que ce mot ne soit pas cantonné à une seule niche scientifique permet de créer du lien entre les différents domaines de recherche voire au sein même du domaine étudié ou du cas d'étude en lui-même. Cette notion de lien est intrinsèque au concept de résilience qui nécessite une approche systémique dynamique afin de prendre en compte la nature holistique du sujet d'étude (41).

Le terme de résilience est donc utilisé dans de nombreux domaines. Les principaux étant ceux détaillés ci-après. La psychologie comportementale, où ce terme est défini de la manière suivante : « La résilience est la capacité d'une personne ou d'un groupe à se développer bien, à continuer à se projeter dans l'avenir, en présence d'événements déstabilisants, de conditions de vie difficiles, de traumatismes parfois sévères » (42). Le concept apparaît dans le domaine de l'écologie grâce à un article de Holling qui définit la résilience écologique comme suit : « capacité d'un système à absorber un choc sans changer sa structure, son identité et sa fonction d'avant le choc » (43). Le domaine de l'ingénierie et de l'économie s'est plus récemment réapproprié le terme en proposant une définition qui correspond davantage à la thématique du bâtiment. Cette définition est la suivante : « Capacité d'un système à résister aux perturbations en dehors de son état d'équilibre et sa rapidité à y revenir » (5) (44) (45). Le concept s'est alors plus largement répandu jusqu'à atteindre le stade d'objectif phare des ODD ou des rapports de l'IPCC. Ces derniers en donnent d'ailleurs la définition suivante :

« La résilience [...] est définie comme la capacité des systèmes sociaux, économiques et environnementaux à faire face à un évènement dangereux, à une tendance ou à une perturbation, en réagissant ou en se réorganisant de manière à préserver leur fonction, leur identité et leur structure essentielle tout en conservant leur capacité d'adaptation, d'apprentissage et de transformation. La résilience est un point d'entrée couramment utilisé, même s'il recouvre un large éventail de significations. La résilience en tant que caractéristique d'un système recoupe les concepts de vulnérabilité, de capacité d'adaptation et, donc, de risque, et la résilience en tant que stratégie recoupe la gestion des risques, l'adaptation et la transformation. L'adaptation mise en œuvre est souvent organisée autour de la résilience en tant que rebond et retour à un état antérieur après une perturbation » (46)

Cette définition très complète est cependant très générale et ne permet pas de prendre en considération tous les aspects de la résilience pour le système du bâti.

b. La résilience des bâtiments face à la problématique de l'augmentation des températures

Le domaine de la construction a donc tenté lui aussi de se réappropriier le concept de résilience, non sans difficulté. En effet, la pluralité des définitions et les utilisations parfois abusives de ce mot tendent à lui en faire perdre son essence. Plusieurs chercheurs ont tenté de rendre une définition claire du concept grâce à une recherche bibliographique poussée. C'est le cas notamment pour la résilience urbaine (47) qui est assez largement documentée. Cependant l'échelle très large d'une zone urbaine ne fait pas intervenir les mêmes solutions que celles utilisables à l'échelle d'un bâtiment bien que celles-ci puissent être liées. Il est donc nécessaire de concentrer encore davantage la recherche bibliographique propre à la résilience au niveau du bâtiment en lui-même. Les recherches nous mènent alors vers des articles discutant de résilience climatique des bâtiments (38), de résilience thermique des bâtiments (48) et plus précisément encore, du refroidissement résilient des bâtiments (5) (49) (50).

Lorsque la thématique de la résilience est abordée, il faut donc être capable de la définir selon trois axes (5) :

- La résilience face à quoi ?
- La résilience à quelle échelle spatiale ?
- La résilience à quelle échelle temporelle ?

Dans le contexte de ce mémoire, le danger vient des périodes de fortes chaleurs qui provoqueront la surchauffe des bâtiments mal équipés. Ce risque se joue sur l'entièreté d'un bâtiment résidentiel et s'applique sur une période s'étalant de 1981 à 2100 par tranche de 20 ans de données météorologiques. Les résultats attendus sont cependant sur une période annuelle représentative d'une double décennie. Répondre à ces trois questions est essentiel pour correctement définir le cadre d'étude du système résilient. Cette approche peut s'apparenter à la méthode des cinq « W » définie pour la résilience urbaine (47). Les cinq « W » en question sont : « Who ? » qui décide des priorités et des choix de résilience et qui est-ce que ça concerne ? ; « What ? » face à quoi faut-il être résilient ? Quels éléments doivent être résilients ? ; « When ? » est-ce un choc qui arrive soudainement ou un changement à long terme ? ; « Where ? » Quelle est la limite spatiale où la résilience est attendue ? ; « Why ? » quel est le but de cette résilience et quelles sont les motivations ? Est-ce un processus ou un résultat qui est attendu ?

Une fois que le sujet à analyser est bien établi, le cycle de la résilience peut être analysé. Le mot cycle est utilisé car la résilience, notamment dans le domaine de la construction, est assimilée à une succession de phases illustrées à la figure 6 (5) Celles-ci sont au nombre de quatre :

1. Vulnérabilité
2. Résistance
3. Robustesse
4. Recouvrement

La première phase est la vulnérabilité qui indique un certain niveau de sensibilité du bâtiment face à un aléa climatique. Il s'agit de la même vulnérabilité qui se trouvait dans la composante du risque à la figure 3. L'élément de vulnérabilité serait, par exemple, une large surface vitrée orientée plein sud. Vient ensuite la phase de résistance où le bâtiment a la capacité de maintenir les conditions de conception initiales. Dans l'exemple du vitrage cité précédemment, cette étape pourrait correspondre à une assimilation dans la masse du bâtiment de la chaleur excédante, au fonctionnement de la climatisation, etc. afin de maintenir au maximum une température acceptable. La troisième phase est appelée phase de robustesse. A cette phase, le bâtiment et les occupants tentent de s'adapter aux nouvelles conditions perturbatrices extrêmes et ce jusqu'à l'échec. Une fois cette épreuve terminée vient le temps du recouvrement où le système revient à ses performances initiales en s'adaptant. Cette dernière phase est parfois scindée en deux : la phase de recouvrement et la phase d'apprentissage (51).

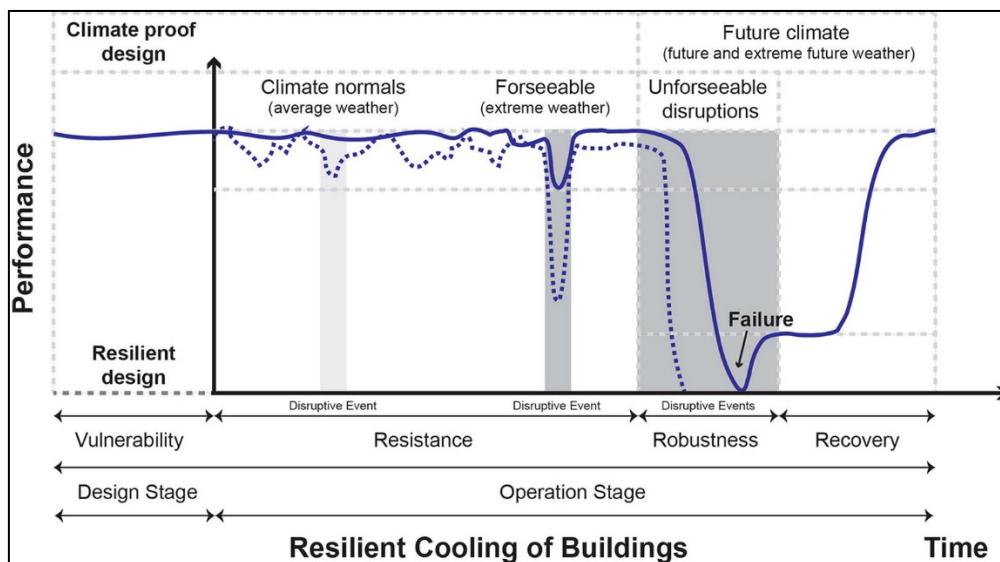


Figure 6 : Phases du cycle de la résilience d'un bâtiment

À l'heure actuelle les principaux risques sont plutôt tournés autour de problématiques touchant une échelle plus large que le bâtiment comme c'est le cas pour les inondations touchant l'échelle urbaine plutôt que celle du bâtiment en tant qu'entité propre. L'évolution des températures augmentera considérablement les risques de surchauffe dans les bâtiments de quelques jours en été par an à plusieurs semaines selon l'évolution des rejets de GES dans l'atmosphère. Ces surchauffes entraîneront des problèmes qui vont au-delà du simple confort des occupants. En effet, les vagues de chaleur mettent en danger les personnes les plus vulnérables telles que les personnes âgées ou la petite enfance mais risquent également de créer des coupures d'électricité dues à la multiplication des installations de climatisation active consommant pléthores de kilowattheures au même instant. L'augmentation des températures ira également de pair avec une baisse de la production photovoltaïque ce qui diminuera la possibilité de produire sa propre énergie et accentuera, par conséquent, la pression sur la demande électrique du réseau. Cependant, l'enjeu de la protection des habitations contre la chaleur ne date pas

d'hier et nombre de solutions existent déjà dans de nombreux pays. Parmi elles certaines sont bien connues comme les ombrages fixes ou mobiles, l'augmentation de l'inertie, la végétalisation des parois du bâtiment ainsi que ses abords, l'orientation du bâtiment, la climatisation, l'évaporation de l'eau ou encore l'utilisation de matériaux à changement de phase.

IX. Méthodologie

La méthodologie employée permet de quantifier l'évolution de la demande énergétique nécessaire au confort thermique d'une habitation neuve wallonne en fonction des augmentations de températures probables durant les prochaines décennies. Plusieurs mesures résilientes de refroidissement du bâtiment sont testées et comparées les unes aux autres. Pour ce faire, à partir des plans de construction d'une maison, un modèle SketchUp a été réalisé (étape 1 de la Figure 7 ci-dessous). Ce modèle a ensuite été importé dans le programme TRNBuild qui a permis de paramétrer le modèle selon les caractéristiques propres à ce bâtiment (étape 2). Une simulation TRNSYS a ensuite été lancée donnant les résultats du modèle de base pour les données météorologiques annuelles actuelles. Ensuite, ce modèle a été soumis à différentes conditions météorologiques ainsi qu'à une étude paramétrique selon différents critères de refroidissement résilient (étapes 3, étape 4 et retour à l'étape 2). Une fois l'ensemble des plus de 250 simulations accomplies, une comparaison et une analyse des données récoltées ont été réalisées (Etape 5).

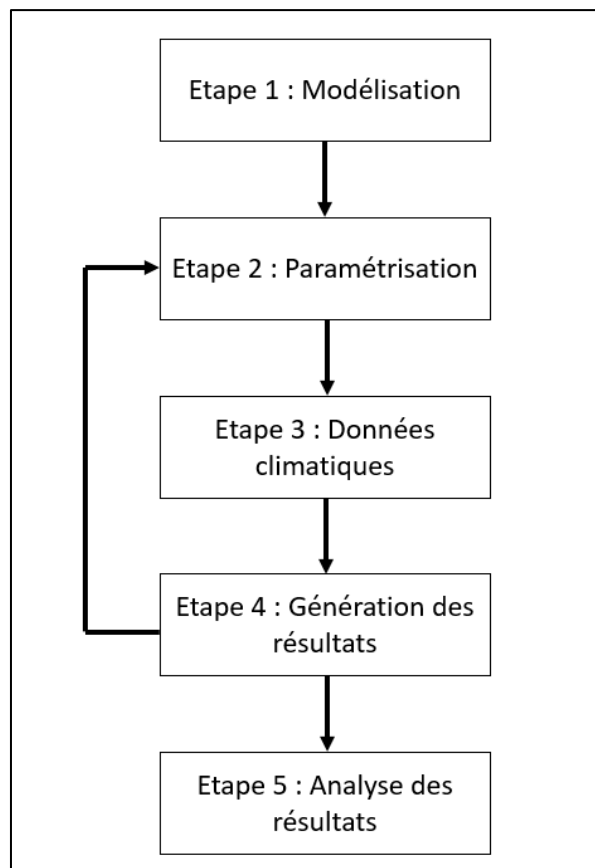


Figure 7 : Méthodologie

1. Présentation du bâtiment sélectionné

Le bâtiment sélectionné pour cette étude est une maison d'habitation unifamiliale quatre façades orienté ouest/est répondant aux normes constructives wallonnes applicables en 2023 et est localisé à Arlon.

Le volume du bâtiment est constitué d'un hall d'entrée, de toilettes, d'une buanderie ainsi que d'un large espace ouvert comprenant le salon, la cuisine et la salle à manger au rez-de-chaussée. Un garage faisant

partie du volume protégé est accolé à la buanderie et aux toilettes côté nord du bâtiment. Une partie des murs orientés est du salon et du garage sont en contact direct avec le sol et la face nord du garage l'est pratiquement totalement. Les illustrations « Elévation est » et « Elévation nord » de l'annexe 1 permettent de rendre compte de la hauteur d'ensevelissement des murs. Le premier étage est constitué de trois chambres, d'un bureau, de deux salles de bain ainsi que d'une mezzanine offrant un vide sur le salon d'environ 4 m². L'entièreté du premier étage, excepté la mezzanine, comporte un plafond à 2,5 mètres de hauteur. Les combles présentent dans le toit font partie des 944,52 m³ du volume protégé total. La surface de plancher chauffé est de 276,50 m² et l'emprise au sol est d'environ 164 m².

a. Plans

Les plans en vue aérienne et à l'échelle 1/100 du rez-de-chaussée et du premier étage sont repris respectivement aux figures 8 et figures 9 ci-dessous.

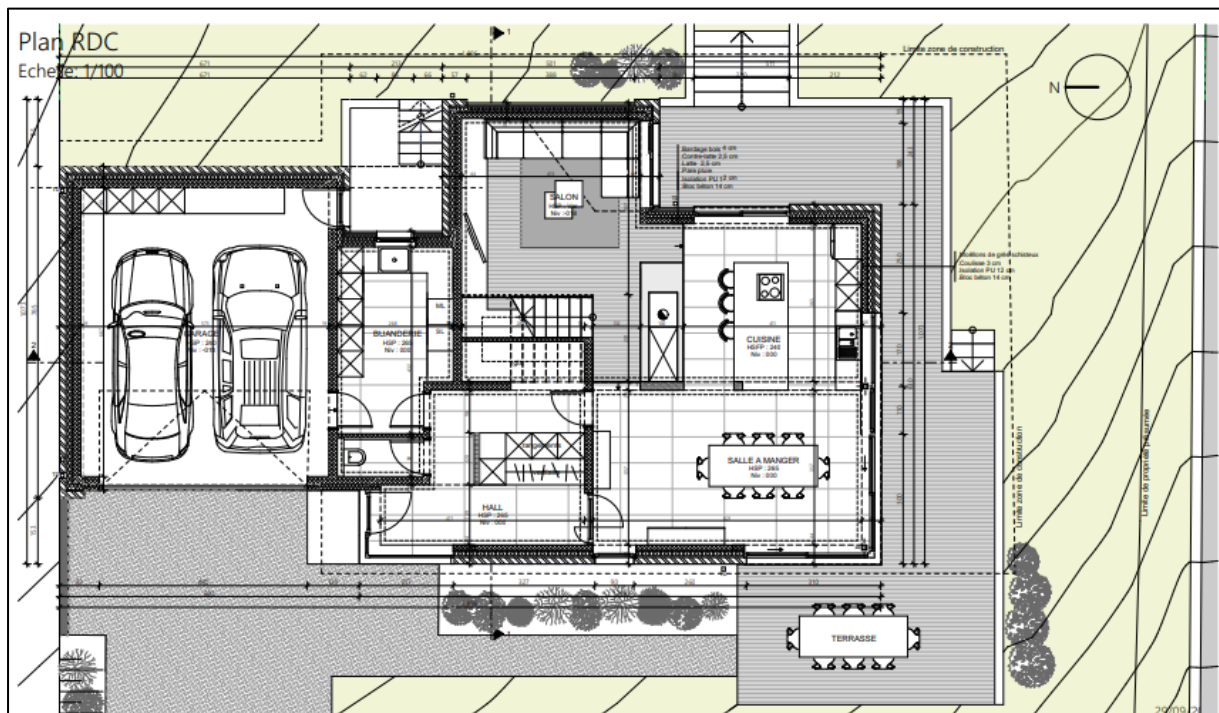


Figure 8 : Plans rez-de-chaussée

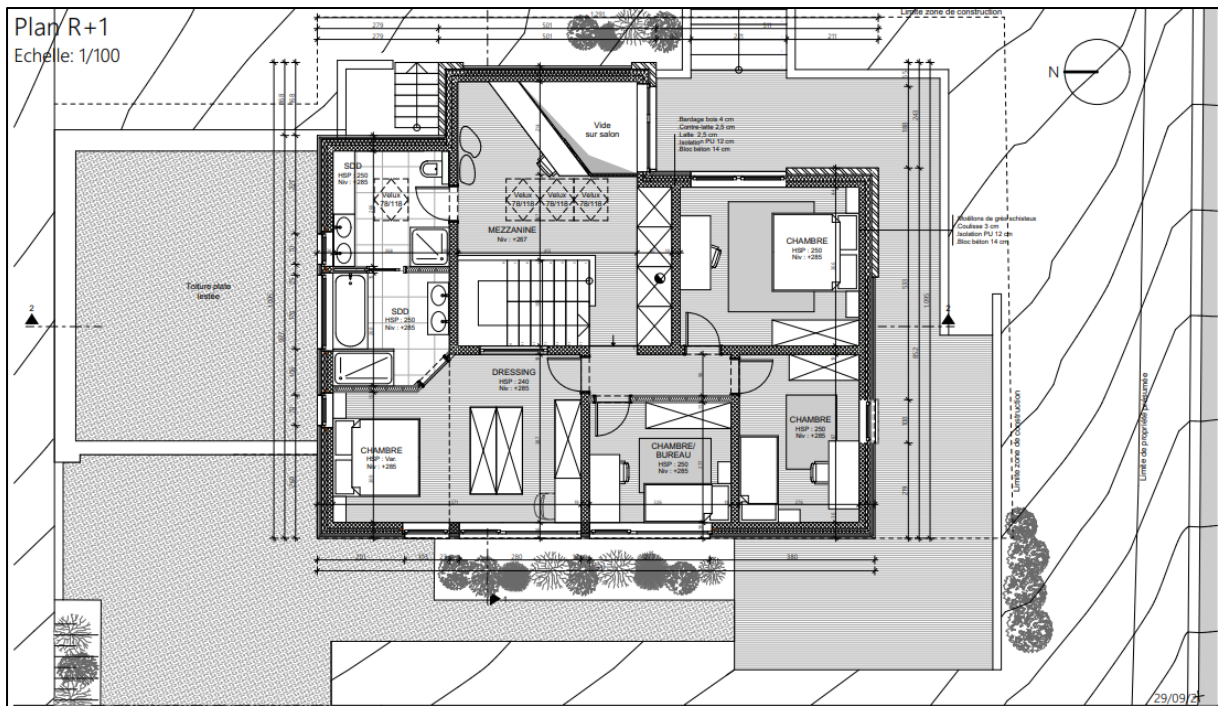


Figure 9 : Plans premier étage

La coupe représentée à la figure 10 correspond aux points 1 de la coupe verticale des plans des figures 8 et 9, toujours selon l'échelle de 1/100.

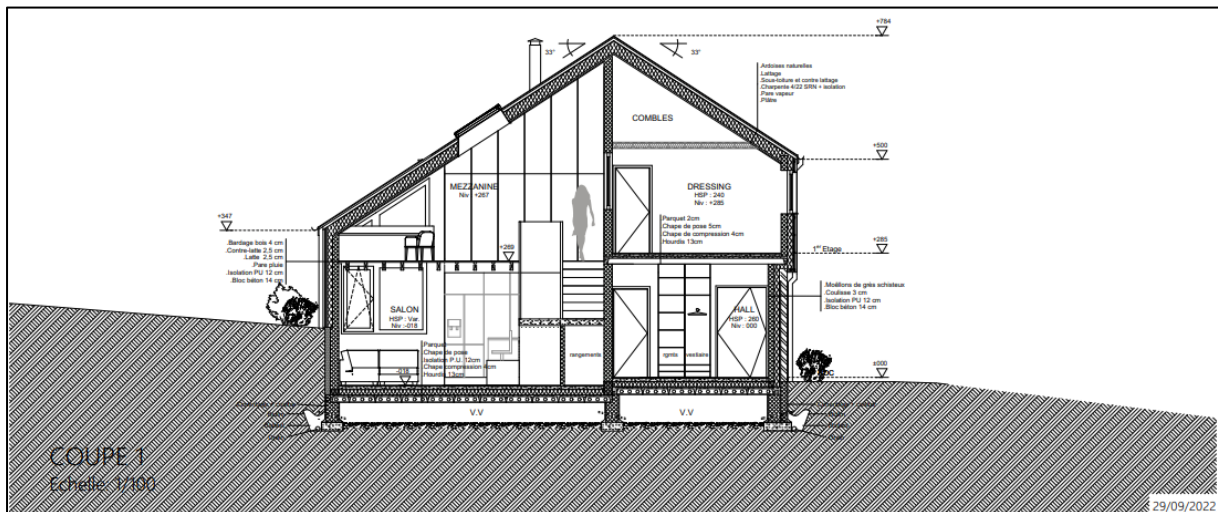


Figure 10 : Coupe numéro 1

La coupe représentée à la figure 11 correspond aux points 2 de la coupe horizontale des plans des figures 8 et 9, toujours selon l'échelle de 1/100.

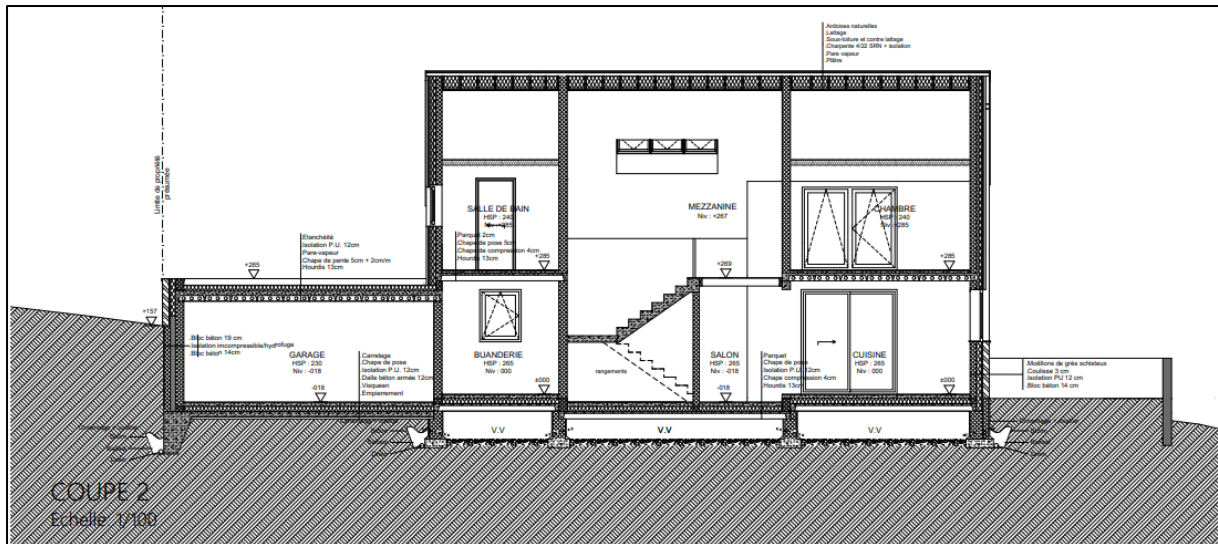


Figure 11 : Coupe numéro 2

b. Enveloppe

La structure du bâtiment est faite de béton. La totalité des murs est érigée à partir de blocs creux en béton lourd. Les murs extérieurs sont isolés à partir de panneaux de polyuréthane offrant une très bonne performance thermique à l'enveloppe et les murs semi enterrés sont isolés au polystyrène extrudé pour sa bonne résistance à l'humidité. La finition est essentiellement constituée de pierre de schiste au rez-de-chaussée et d'un bardage en bois pour le premier étage avec certaines exceptions comme, par exemple, au niveau de la façade sud qui possède une colonne en pierre du sol au toit. Deux vitrages sont notables, d'une part au coin sud-ouest de la salle à manger avec deux baies vitrées, l'une de 6,69 m² du côté méridional et l'autre de 7,20 m² côté Soleil couchant. Le second vitrage notable est celui partant de la mi-hauteur du mur sud du salon et montant à hauteur de la mezzanine jusqu'à épouser l'arrête de la toiture pour une surface totale de 5,32 m².

c. Systèmes

Chauffage : la production de chaleur est assurée par une pompe à chaleur (PAC) électrique de type air/eau d'une puissance de 14 kW. La chaleur ainsi produite est distribuée par un chauffage central et émis par un chauffage au sol situé au rez-de-chaussée. Le besoin en chaleur de l'étage est comblé par des chauffages d'appoints type porte serviettes pour les salles de bain et de type radiateur électrique pour les chambres.

Ventilation : la ventilation est assurée un système de type C, c'est-à-dire que des extractions mécaniques situées dans les pièces d'air vicié (cuisine, buanderie, toilette et salles de bain) assurent le renouvellement de l'air au sein du bâtiment. L'air neuf quant à lui est introduit via des grilles d'aération placées à certains châssis des pièces suivantes : salon, salle à manger, mezzanine, chambre 1, 2 et 3 et bureau. Chacune avec son propre débit d'entrée.

Eau chaude sanitaire : la production d'eau chaude sanitaire est assurée par la PAC ainsi que par une résistance électrique d'une puissance de 2 kW.

Système photovoltaïque : Des panneaux sont installés avec une puissance crête de 5 kWc.

d. Rapport PEB

Un rapport PEB a été réalisé et est disponible en annexe 2. Ce rapport indique que toutes les exigences PEB sont respectées mais pointe déjà un risque de surchauffe. Le niveau d'isolation thermique (K) est de 31, ce qui correspond à l'exigence inférieure ou égale à 35 pour un logement neuf. Le niveau de consommation d'énergie primaire (E_w) est également respecté puisqu'il est de 37 alors que l'exigence instaure une valeur inférieure ou égale à 80. Pour finir, la consommation spécifique (E_{spec}) du logement de 61 kWh/m².an est également inférieure au 130 kWh/m².an exigés. Cette consommation spécifique permettrait de donner la valeur PEB A au bâtiment³.

e. Étude de faisabilité

Une étude de faisabilité technique, environnementale et économique a également été menée. Les conclusions de l'auteur ayant étudié l'intégration de différentes technologies sont que le couplage entre une PAC et une installation photovoltaïque semble intéressant. Cette étude est disponible en annexe 3.

2. Modélisation SketchUp

Le bâtiment précédemment décrit a été modélisé via le logiciel SketchUp via le plugin Trnsys3D. La première étape fut de scinder le bâtiment résidentiel en différentes zones ayant des régimes et horaires d'utilisations similaires. Dès lors, le rez-de-chaussée a été divisé en quatre zones thermique comme illustré à la figure 12. Le premier étage et le grenier ont, quant à eux, été partagés en cinq zones thermiques. Le grenier comprend l'ensemble des combles des pièces du premier étage excepté pour la mezzanine dont la hauteur atteint le toit. Les dimensions utilisées pour réaliser le zonage thermique sont celles des murs extérieurs. Chaque zone a été pensée de manière à éviter les concavités afin que l'ensemble soit compatible avec les exigences du logiciel TRNSYS.

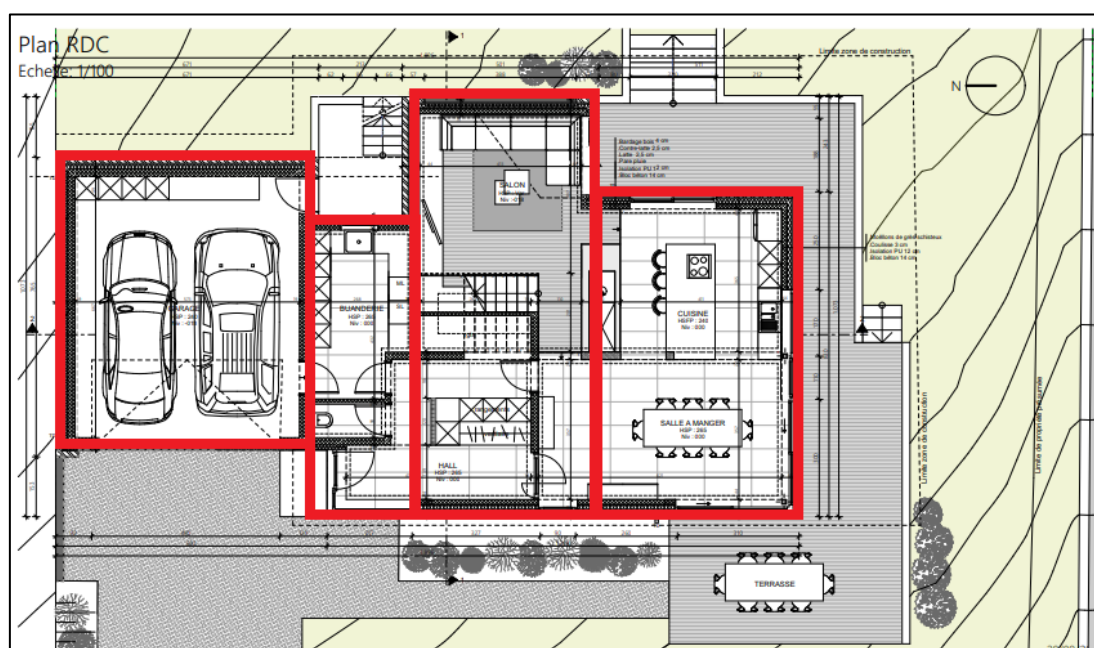


Figure 12 : Zonage thermique Rez-de-chaussée

³ La valeur PEB A est donnée à un bâtiment lorsque celui-ci possède une énergie spécifique comprise entre 45 et 85 kWh/m².an.

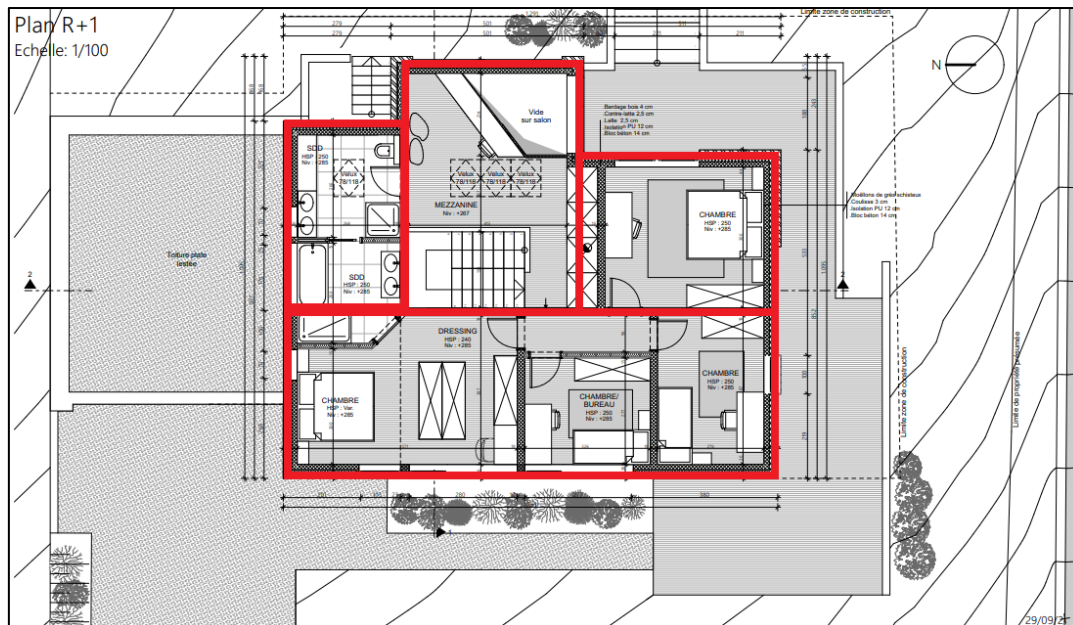


Figure 13 : Zonage thermique premier étage

a. Simplifications et hypothèses

Plusieurs simplifications ont été réalisées lors de la modélisation des plans de l'habitation. Ces légères modifications n'impactent que de façon minimale les résultats de la simulation mais permettent un gain de temps précieux. Une liste non-exhaustive des principales hypothèses et simplifications est reprise ci-dessous :

- L'ensemble des planchers du rez-de-chaussée ont été nivelés (le garage et le salon étaient initialement 18 cm plus bas sur les plans).
- Certaines pièces compatibles ont été rassemblées en une seule zone (les deux salles de bains, les chambres une et deux ainsi que le bureau et le hall de nuit, ...).
- Le hall a été scindé en deux et légèrement agrandi du côté de la porte.
- Le vide de l'escalier et le vide sur séjour entre le salon et la mezzanine ont été rassemblés en un seul vide d'une surface de 13,54 m².
- Une cloison de résistance quasiment nulle sépare le salon de la cuisine et salle à manger ce qui influe sur les mouvements d'air.
- ...

3. Encodage TRNBuild

Les paragraphes suivants détaillent la paramétrisation du modèle initial. La plupart de ces paramètres sont communs à l'ensemble des simulations (consigne de températures, horaires d'occupation des différentes pièces, ventilation, échange d'air entre les pièces, ...). Les paramètres évoluant au fil des simulations sont explicités dans la partie « XI.4. Simulation TRNSYS » plus bas dans ce travail.

a. Éléments constructifs

Une fois le modèle créé et correctement importé dans le logiciel TRNBuild, une caractérisation de chacune des parois existantes est accomplie. Les caractéristiques physiques des matériaux composant les parois sont répertoriées dans le Tableau 4. A noter qu'en plus de ces couches massives, une « Massless Layer » (ou couche sans masse en français) a été ajoutée. Celle-ci consiste en une couche d'air peu ventilé d'une résistance thermique de 0,048 hm²K/kJ. L'identification des composants des

parois s'est faite à partir des données issues du rapport PEB disponible en annexe 2. Les deux premières colonnes donnent le numéro et le nom de la couche, les colonnes suivantes donnent respectivement la conductivité, la capacité et la densité de ces couches. Les unités utilisées pour chaque colonne sont encadrées par des crochets.

Tableau 4 : Liste et données physiques des composants des différentes parois

N°	Layers	Conductivité [kJ/hmK]	Capacité [kJ/kgK]	Densité [kg/m ³]
1	Platre	1,872	1	1100
2	Blocs Creux Lourds	4,464	0,84	2000
3	Panneaux PU	0,0828	1,4	34
4	Schiste	9,648	1	2850
5	Mortier-Ciment Platre	3,348	1	1100
6	Carreaux Gres	4,32	1	2000
7	Chape	4,68	0,84	1200
8	Beton Arme	7,92	1	2100
9	PU Projete	0,0972	1,4	34
10	Parquet Bois	0,468	1,88	600
11	Plancher Beton	3,924	1	2000
12	CARTON PLA	1,01	1	900
13	Chape Etage		1	1200
14	Hourdis Etage	3,924	1	500
15	Compo 89Air 11Bois	0,468	1,07	67
16	Compo 11Bois 89Laine	0,162	1,44	144
17	PVC	0,576	0,004	550

Notons que les chiffres, inscrits dans le nom des composants aux lignes 15 et 16 du tableau, sont des pourcentages de composition du matériau dans cette couche. Ainsi, la couche de matériaux numéro 15 est composée à 89% d'air et à 11% de bois.

Les différentes parois, listées dans le Tableau 5, ont ensuite été composées à partir des couches précédemment décrites. Le nom de la paroi est repris dans la première colonne, celle-ci est suivie de la colonne décrivant les différentes couches composant la paroi. Les couches sont inscrites de la plus intérieure en haut à la plus extérieure en bas. Les différentes épaisseurs en mètres et la somme de celles-ci sont reprises dans la colonne 3 et pour finir, la valeur du coefficient thermique en W/m²K de la paroi est reprise dans la dernière colonne.

Tableau 5 : Composition, épaisseurs et coefficient thermique des parois

Walls			
Nom	Layers	Epaisseur [m]	U-Value [W/m²K]
ADJ_WALL	Platre Bloc_Creux_Lourds Platre	0.01 0.14 0.01 0.16	3.112
ADJ_CEILING	Parquet_Bois Chape_Etage Beton_Arme Hourdis_Etage	0.02 0.05 0.04 0.13 0.24	1.836
Mur_Ext_Pierres	Platre Bloc_Creux_Lourds Panneaux_PU Air_peu_Ventile Schiste	0.01 0.14 0.12 0.15 0.42	0.174
Mur_Ext_Bardage_Bois	Platre Bloc_Creux_Lourds Panneaux_PU	0.01 0.14 0.12 0.27	0.181
Mur_Ext_Terre	Bloc_Creux_Lourds Mortier-Ciment_Platre Panneaux_PU Bloc_Creux_Lourds	0.19 0.01 0.11 0.14 0.45	0.191
Porte_Garage	PVC	0.7	1.282
Toiture_Plate	Hourdis_Etage Beton_Arme Chape_Etage Panneaux_PU	0.12 0.04 0.04 0.12 0.32	0.179
Toiture_Ardoises	CARTON_PLA Compo_89Aire_11Bois Compo_11Bois_89Laine	0.14 0.02 0.22 0.38	0.175
Dalle_Sol	Carreaux_Gres Chape PU_Projete Beton_Arme	0.01 0.07 0.12 0.12 0.32	0.211
Dalle_V_V	Parquet_Bois Chape Pipe Chape PU_Projete Beton_Arme Plancher_Beton Air_peu_Ventile	0.01 0.06 0.01 0.12 0.04 0.12 0.36	0.198
Dalle_Ext	Parquet_Bois Chape_Etage Beton_Arme Hourdis_Etage Panneaux_PU	0.02 0.05 0.04 0.12 0.12 0.35	0.174

L'entièreté des fenêtres quant à elles sont caractérisées par un coefficient thermique de 1,1 W/m²K et d'un facteur solaire (g) de 62%.

b. Horaires d'occupation

D'un point de vue global, le bâtiment est occupé de 16h jusqu'à 8h le lendemain pendant les jours de semaine et de manière constante les week-ends. Les horaires d'occupation des pièces varient pour chacune des pièces de la façon suivante :

- Chambre 1 et 2 : occupées de 21h à 8h le lendemain tous les jours de l'année
- Salle de bain : occupée de 7h à 8h le lendemain tous les jours de l'année
- Rez-de-chaussée et salon : occupés de 5h à 8h et de 16h à 23h la semaine et de 7h à 23h le week-end

Les autres pièces sont considérées comme inoccupées.

c. Régimes

1) Infiltration

La mesure du débit de fuite par unité de surface de l'enveloppe (52) annoncée dans le rapport PEB donne une étanchéité à l'air à 50 Pascal [Pa], de 6 m³/(h.m²). Ce débit de fuite est repris sous la forme suivante : \dot{v}_{50} . A partir de ce débit de fuite et connaissant la surface de déperdition totale du bâtiment ($A_{test} = 682.96 \text{ m}^2$), le débit de fuite sur l'ensemble du bâtiment peut être calculé.

$$\dot{V}_{50} = \dot{v}_{50} \times A_{test} = 6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \right] \times 682,96 [\text{m}^2] = 4097,76 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

Le quotient de cette valeur par le volume total du bâtiment ($V_{int} = 944,52 \text{ m}^3$) donne le taux de renouvellement d'air (\dot{n}_{50}) par heure sous 50 Pa.

$$\dot{n}_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V_{int}} = \frac{4097,76 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]}{944,52 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right]} = 4,34 \text{ h}^{-1}$$

Enfin, cette valeur peut être divisée par un facteur d'exposition au vent ($a = 25$) (53) pour une exposition moyenne (identique à la valeur utilisée dans la méthode PEB) afin d'obtenir le taux de renouvellement d'air du bâtiment sous une pression de 4 Pa (\dot{n}_4).

$$\dot{n}_{50} = \frac{\dot{n}_{50}}{a} = \frac{4,34}{25} = 0,174 \text{ h}^{-1}$$

Ce taux de renouvellement de 4 Pa se rapproche de conditions réelles éprouvées par le bâtiment.

2) Ventilation

Les ventilations encodées sont valables 24h/24 et la valeur selon les différentes pièces provient des données issues du rapport PEB. Seules les entrées d'air sont reprises dans TRNBuild. Un équilibre se forme en fonction des transferts d'air entre chaque pièces. Le tableau ci-dessous reprend les différentes entrées d'air et couplages entre les pièces du bâtiment. Pour chacune des zones thermiques, un débit d'entrée d'air en [m³/h] est donné. Dans le cas où aucun chiffre n'est donné, c'est que cette zone ne comprend pas d'entrée d'air faisant partie du système de ventilation. La colonne 4 donne les débits d'air transférés par la zone thermique de la colonne 1 vers la (ou les) zones thermiques de la colonne 3.

Tableau 6 : Débit de ventilation et de transfert de l'air

Pièces	Débit d'entrée d'air [m ³ /h]	Pièce de transfert	Débit vers pièce de transfert [m ³ /h]	Débit vers pièce de transfert [kg/h]
Chambre_1	147	SDB	202	243.2
Garage	/	/	/	/
Mezzanine	65	Salon	65	78.26
SDB	/	/	/	/
Grenier	/	/	/	/
Chambre_2	55	Chambre_1	55	66.22
Cuisine	80	Salon	80	96.32
Buanderie	/	/	/	/
Salon	95	Cuisine	190	228.76
		Mezzanine	65	78.26
		Buanderie	95	114.38

3) Chauffage

Seules cinq zones thermiques possèdent des consignes de chauffage. Ce sont les zones possédant des systèmes d'émission de chaleur. Il existe trois types d'émission de chaleur, avec pour chacune une part radiative différente. Le chauffage par le sol alimente les pièces chauffées du rez-de-chaussée que sont le salon, la cuisine et la salle à manger. La fraction radiative pour ce système d'émission est de 0,7 (54). Pour la salle de bains, le chauffage type porte serviette possède une part radiative de 0,5 et pour finir, les appoints électriques des chambres ont une part radiative de 0,3. Les intensités de chauffage des pièces diffèrent selon les horaires d'occupation de celles-ci. Lorsque le rez-de-chaussée et la salle de bain sont inoccupés, une température de 15°C y est maintenue. Une consigne de 20°C est demandée pour le rez-de-chaussée lorsque celui-ci est occupé et une consigne de 22°C pour la salle de bain. Les chambres ne sont chauffées que lorsque celles-ci sont occupées. La température y est alors menée à 18°C. Afin d'obtenir la valeur réelle du besoin en chaleur, la puissance du système de chauffage de chaque pièce est considérée comme illimitée.

4) Confort

Les résultats des simulations nécessitent de définir un point de confort pour chaque pièce. Ce point de confort correspond à une personne habillée d'un pantalon et d'un t-shirt à manche longue (1 clo) (55). Son activité physique est celle d'une personne assise à un bureau (1 met) (55) et ressentant un très léger mouvement d'air (0,1 m/s).

5) Gains internes

Des gains internes ont été ajoutés dans chaque zone selon les occupations qui s'y réfèrent. Trois types de gains ont été ajoutés :

- Gains apportés par les personnes : ces gains offrent à leur environnement 216 kJ/h de part radiative et 144 kJ/h de part convective pour chaque individu présent dans la pièce.
- Gains des équipements électriques : ces gains sont relatifs à la superficie du sol de la zone thermique. Ils offrent 5,76 kJ/h.m² de gains radiatifs et 23,04 kJ/h.m² convectifs.
- Gains dû à l'éclairage : ces gains sont également relatifs à la superficie du sol de la pièce et offrent 6,804 kJ/h.m² radiatifs et 2,916 kJ/h.m² convectifs après une certaine heure lorsque la pièce est occupée.

d. Zones

Chacune des huit zones thermiques possède un volume intérieur recalculé sur base des plans d'architecte et une capacitance en kilojoules par Kelvin équivalente à cinq fois le volume intérieur.

4. Simulation TRNSYS

Le logiciel TRNSYS (TRaNsient System Simulation tool) est un environnement de simulation qui permet de réaliser des simulations dynamiques de divers systèmes énergétiques dont des bâtiments multizones. Son extrême flexibilité et sa possibilité de travail à l'aide de SketchUp en font l'outil idéal pour une étude paramétrique de variations de la demande énergétique d'un bâtiment.

a. Structure et types utilisés

La structure TRNSYS employée pour obtenir les données est similaire pour l'ensemble des simulations. Seuls changeront certains paramètres propres aux « Types ». Ces « Types » sont les composants du programme qui sont, en réalité, des boîtes noires dont les entrées sont alimentées par le cerveau TRNSYS. Les sorties offertes par les boîtes noires sont récupérées par ce cerveau qui peut alors résoudre le système des boîtes noires (56). Les macros sont créées en regroupant plusieurs composants en un seul afin d'épurer la fenêtre de travail de Simulation Studio. La Figure 9 ci-dessous reprend les 6 grands regroupements de composants pouvant être établis. Le premier groupe encadré en bleu reprend tous les types permettant de simuler l'environnement extérieur au bâtiment. Le « Type9e » sert à lire le fichier contenant les données climatiques représentant les projections climatiques futures. Ces données sont transmises à un ploter ainsi qu'au « Type56 » pour l'informer des différentes températures extérieures ainsi que de l'humidité au fil des heures. Ces données climatiques sont également transmises au « Type16c » afin de calculer le zénith et azimuth pour chaque pas de temps. Le « Type77 » calcule la température verticale du sol, les paramètres de ce composant ont été calculés pour chaque jeu de données climatiques. Enfin, le composant « Wizard Settings » donne au « Type 56 » les derniers inputs nécessaires à son bon fonctionnement. Ce « Type56 » est le composant central de la simulation car c'est lui qui contient la modélisation du bâtiment et qui calcule l'ensemble des données qui sont récoltées pour l'analyse des résultats tels que la demande énergétique en chauffage par exemple. Toutes ces données calculées sont reprises en output et acheminées vers différents composants qui vont les interpréter.

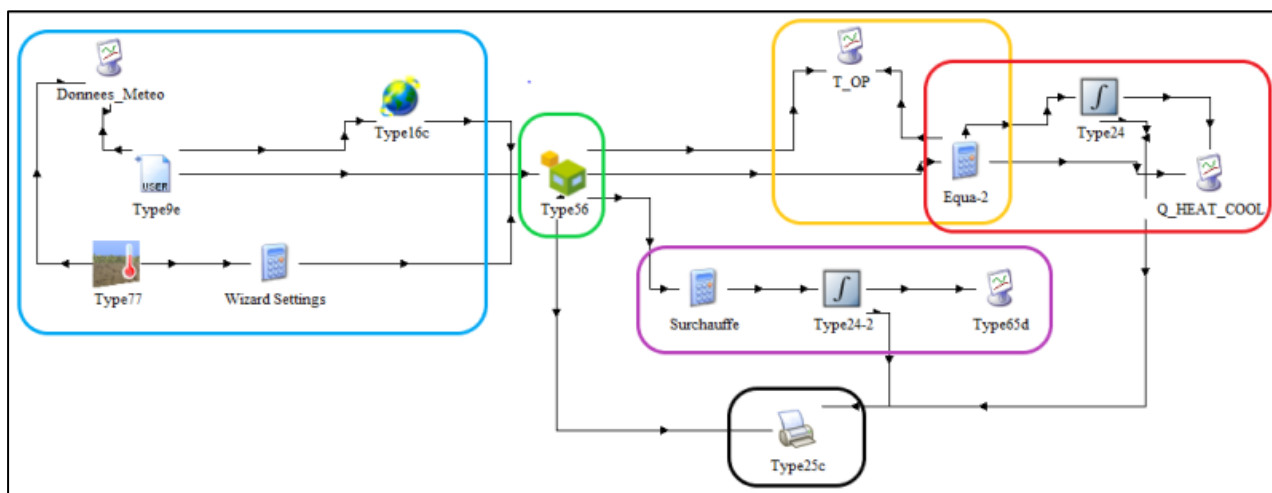


Figure 14 : Configurations des macros de la simulation TRNSYS

Le groupe encadré en jaune permet simplement d'afficher les températures opératives de pièces d'intérêts. Le groupe en haut à droite encadré en rouge transforme les outputs en des demandes énergétiques en kilowattheures [kWh] et les cumule. Les composants encadrés en mauve permettent de calculer les heures de surchauffe de certaines pièces en fonction des heures d'occupation de celles-ci et de les cumuler. Enfin, le « Type25c » permet d'exporter l'ensemble des outputs vers un nouveau fichier texte. Cette configuration est celle de la plupart des simulations, cependant, certains ajustements peuvent être insérés lors de la simulation de certaines solutions.

Le tableau 7 repris ci-dessous donne les différents paramètres qui sont utilisés dans le « Type77 » pour caractériser le sol dans chacun des scénarii. Une telle évolution des températures de l'air agit nécessairement sur les températures du sol malgré la grande inertie de ce dernier. Les deux premières colonnes donnent la période et le scénario correspondant aux paramètres de la même ligne. Le premier paramètre est la température annuelle moyenne. Le second, appelé amplitude, vaut la moitié de la différence entre la température moyenne mensuelle la plus élevée et la température moyenne la plus basse. Les deux dernières colonnes sont données à titre informatif, ce sont les températures maximales et minimales mensuelles qui ont servi à calculer les amplitudes. Les figures 15 et 16 reprises sous le tableau servent à donner plus de lisibilité aux colonnes 3 et 4 du tableau. Les températures augmentent peu importe le scénario. Cependant l'augmentation de la température annuelle moyenne d'ici 2100 n'est que de +1°C si le scénario SSP2-4.5 l'emporte, elle est d'environ +2,5°C si c'est le chemin SSP3-7.0 qui est emprunté et elle est de pratiquement +4°C dans le pire scénario. Les amplitudes quant à elles augmentent et diminuent au fil du temps mais seulement de 1 à 2°C. Malgré cela, ces augmentations d'amplitudes démontrent des différences de plus en plus marquées entre des étés pouvant devenir très chauds et des hivers doux ou normaux par rapport à la période 1981-2000.

Tableau 7 : Évolution des paramètres du sol

Paramètres Type 77					
Période	Scénario	T° moyenne	Amplitude	T° Max	T° Min
1981-2000	ERA5	9.47	7.86	18.65	2.93
2001-2020	ERA5	9.49	8.41	18	1.19
2021-2040	ssp245	9.87	8.72	19.11	1.68
2021-2040	ssp370	9.98	8.48	19.18	2.23
2021-2040	ssp585	10.15	8.5	19.48	2.48
2041-2060	ssp245	10.03	8.62	19.48	2.23
2041-2060	ssp370	10.38	8.99	20.44	2.46
2041-2060	ssp585	10.46	9.21	20.73	2.31
2061-2080	ssp245	10.11	8.75	19.73	2.23
2061-2080	ssp370	11.6	8.63	21.03	3.77
2061-2080	ssp585	11.85	8.92	21.75	3.9
2081-2100	ssp245	10.47	9.21	20.73	2.31
2081-2100	ssp370	12.07	8.92	21.97	4.13
2081-2100	ssp585	13.37	9.19	23.2	4.81

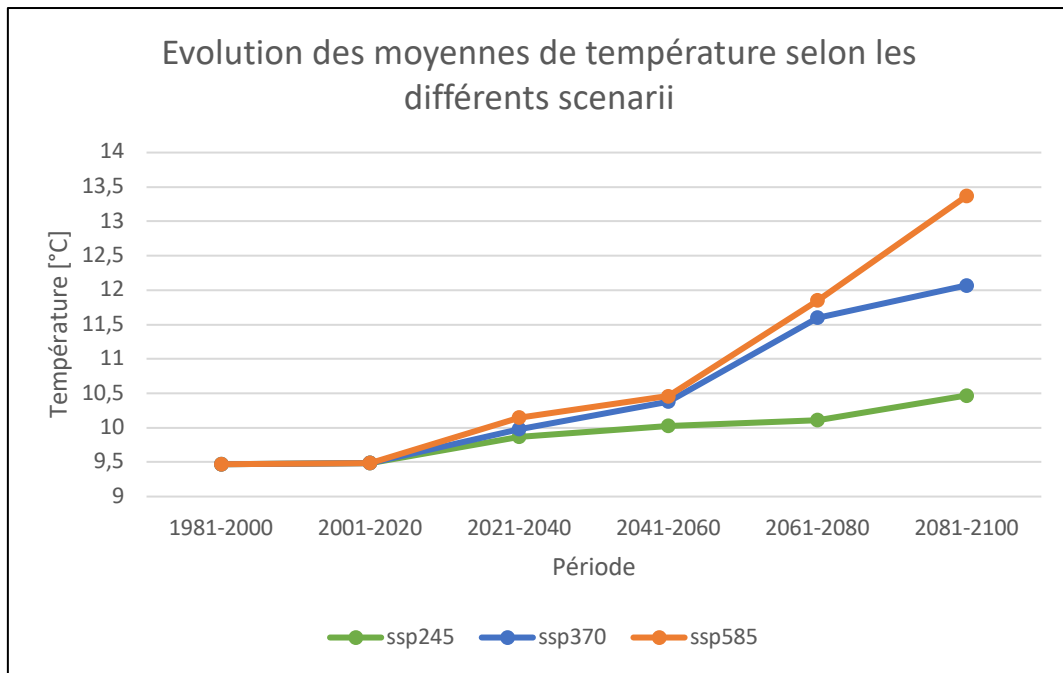


Figure 15 : Évolution des températures annuelles moyennes de l'air selon les différents scénarii

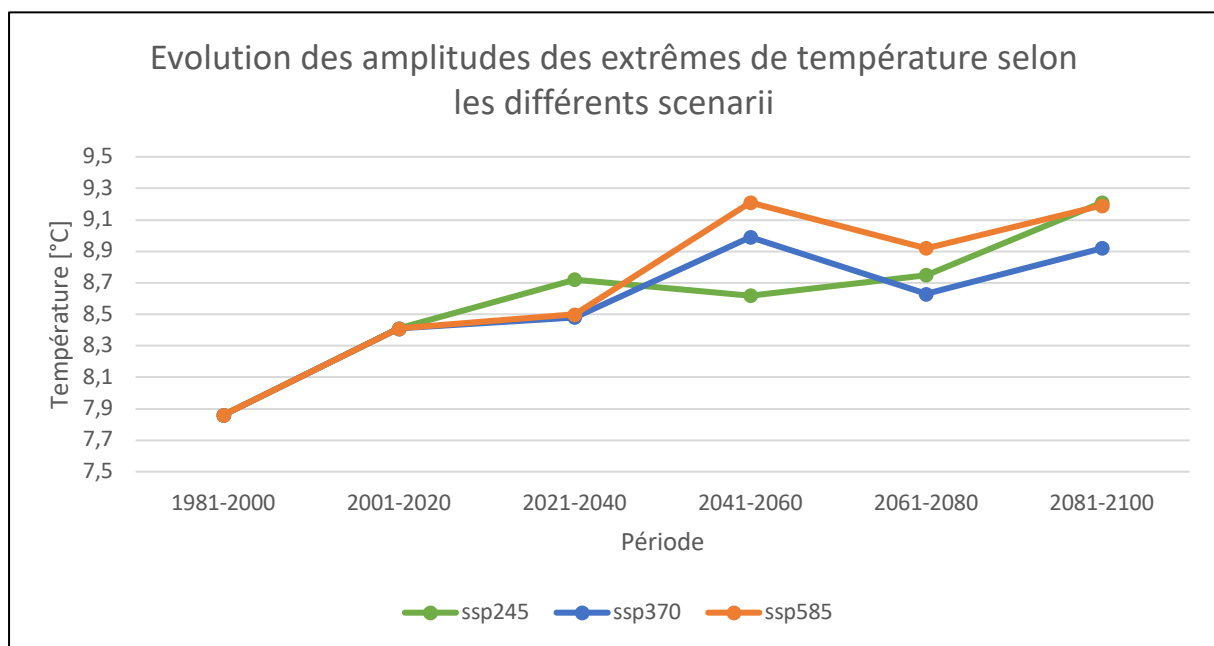


Figure 16 : Évolution des amplitudes de températures moyennes mensuelles selon les différents scénarii

b. Simulation initiale

La simulation initiale reprend simplement la maison sans aucune mise en place de mesure de réduction de la surchauffe. Les résultats obtenus donnent les consommations en chaud pour maintenir possible les températures demandées ainsi que les heures de surchauffe mesurées en fonction des températures opératives et des horaires d'occupation. La consommation en froid n'est pas reprise dans cette version initiale afin d'obtenir un aperçu du nombre d'heures de surchauffe que subit le bâtiment en l'absence de climatisation ou de systèmes de réduction des gains solaires.

Les paramètres du composant simulant les températures du sol ont été adaptés pour chaque scénario.

c. Simulation de base

Cette simulation est identique à la précédente, à l'exception faite qu'un refroidissement actif a été ajouté dans différentes pièces afin de mesurer la quantité d'énergie qui serait nécessaire pour maintenir une certaine consigne de température. Ces pièces sont le salon, la cuisine/salle à manger, les chambres et la mezzanine. Malgré cet ajout, des températures opératives supérieures à la limite fixée continuent à être enregistrées.

Cette simulation se décline en deux versions. La première sans prendre en compte les variations de température du sol au fil des années et la deuxième qui prend en compte les modifications de température des sols selon les conditions climatiques extérieures.

d. Simulation protections solaires automatisées extérieures

Le premier dispositif à tester, afin de réduire l'intrusion du rayonnement solaire dans les pièces de vie permettant ainsi de limiter l'augmentation de la température, est un système de protections solaires externes. La simulation réalisée dans ce travail utilise des stores externes automatisés. Ces protections sont placées sur les fenêtres les plus exposées des pièces les plus à risque de surchauffe et possèdent un coefficient d'ombrage de 80%. La fermeture des stores s'actionne lorsque le capteur enregistre une puissance supérieure ou égale à 140 W/m². C'est à partir d'une intensité solaire de 120 W/m² que la protection se rétracte. Les vitres protégées sont les suivantes :

- Cuisine et salle à manger : vitre côté est et ensemble du vitrage sud.
- Salon : fenêtre orientée sud
- Mezzanine : les trois fenêtres de toit orientées est
- Chambre 2 : fenêtre orientée est

Concernant la fenêtre orientée sud de la mezzanine, sa coupe triangulaire épousant la forme du toit rend la pose d'une protection solaire automatisée très compliquée ou beaucoup trop coûteuse.

e. Simulation positionnement des vitrages

Une autre façon de limiter des gains solaires excessifs est de réduire la superficie de vitrage. C'est naturellement le vitrage Sud qui en plus d'apporter le plus d'énergie solaire, est le plus présent. C'est donc sur cette façade que la surface vitrée sera économisée. Les trois pièces principales du rez-de-chaussée, que sont le salon, la cuisine et la salle à manger, possèdent de larges ouvertures entre-elles. Dès lors, celles-ci ont été considérées comme une seule et même pièce lors du calcul de la superficie minimale de vitrage requise afin de correspondre aux normes en vigueur. En effet, le gouvernement wallon, dans ses critères minimaux de salubrité des logements, instaure un minimum d'éclairage naturel pour les logements existants et à créer (57).

« Art 20. 4° l'éclairage naturel requis est respecté si les parties vitrées des ouvertures vers l'extérieur d'une pièce d'habitation atteint au moins 1/12^e de la superficie au sol en cas de vitrage vertical et/ou 1/14^e en cas de vitrage de toiture ; »

Cependant, l'éclairage naturel, en plus de dispenser de l'utilisation d'éclairage artificiel, d'apporter de la chaleur en hiver et donc d'économiser de l'énergie, procure un confort certain à l'occupant. Dans cette optique, il existe des recommandations proposant d'appliquer davantage de surfaces vitrées que ce qui est prévu par le gouvernement wallon. Certaines sources mentionnent une superficie vitrée par rapport au plancher de 1/6^e pour les parois verticales et de 1/8^e pour les parois inclinées. Une étude de l'UCL préconise des proportions de 15% à 20% pour les façades sud et 12% à 20% pour les façades des autres points cardinaux.

Etat initial :

- Rez-de-chaussée : cuisine + salon + salle à manger
La superficie totale de plancher est de 97,54m² pour un vitrage sud de 13,51m², un vitrage est de 5,28m² et ouest de 10,32m².
La superficie totale vitrée pour le rez-de-chaussée est donc de 29,11m² ce qui est largement supérieur aux 8,13m² exigés par l'Arrêté wallon. La superficie de vitrage représente environ 30% de la surface de plancher, ce qui est également supérieur aux recommandations. Dès lors, les superficies et positionnement des vitrages peuvent être réduits dans la mesure du raisonnable afin d'allier performance énergétique et confort des occupants.
- Mezzanine :
Cette pièce de la maison n'est théoriquement qu'une pièce de passage. Dès lors, les règles d'éclairage naturel ne s'appliquent pas à ce type de pièce. Cependant, la présence éventuelle d'un bureau donne l'obligation de maintenir une certaine luminosité naturelle à cette zone. De plus, il est bon de rappeler que le vide sur séjour vers le salon permet d'apporter une certaine clarté venant des fenêtres de l'étage inférieur. A noter également que la fenêtre encastrée dans l'angle du toit rend quasi impossible (ou du moins extrêmement coûteux) l'ajout d'un store automatique à cette fenêtre située en plein sud.

Modifications apportées :

- Rez-de-chaussée :
La baie vitrée orientée sud de la salle à manger a été réduite de moitié, la fenêtre sud du salon a quant à elle été supprimée. Afin de tout de même maintenir un certain confort visuel dans le salon, une large fenêtre a été ajoutée sur la façade est du salon.
- Mezzanine :
La fenêtre en angle de toit orientée sud a été supprimée. Aucun ajout de fenêtre ne vient compenser cette suppression. Cependant, les trois 3 m² de vitrage en toiture qu'offrent les velux permettent un apport lumineux une grande partie de la journée.

La Figure 17 ci-dessous illustre les modifications du vitrage apportées aux façades sud et est. La nouvelle configuration octroie une surface vitrée totale de 25,5m² de vitrage. Ce qui représente 26,14% de la surface de plancher. Ainsi, la nouvelle surface de vitrage est toujours largement au-dessus des 8,13m² obligatoires mais a perdu en surface méridionale.

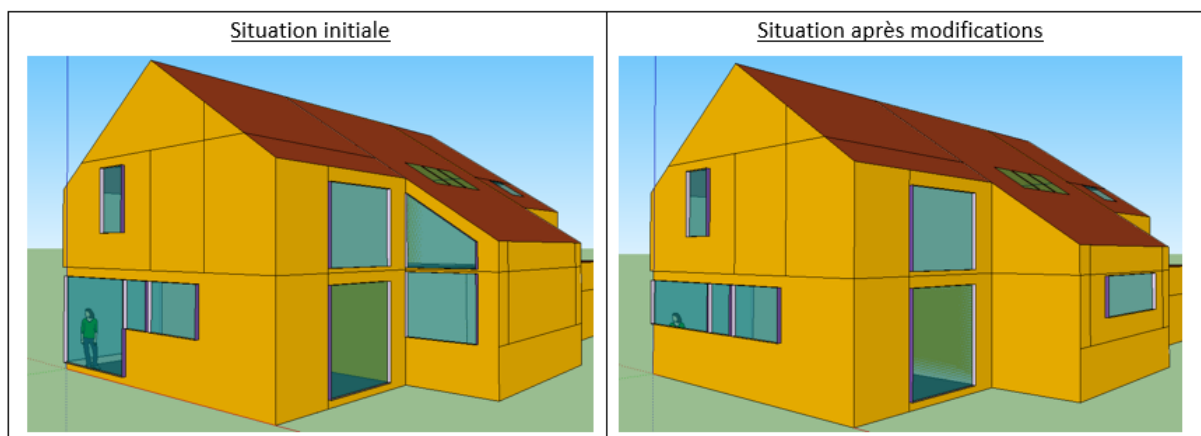


Figure 17 : Modifications du vitrage

f. Simulation composition des vitrages

Dans cette configuration, la position des vitrages est identique à la version initiale mais leur composition a été modifiée. Trois caractéristiques composent un vitrage :

- 1) Le coefficient de transmission thermique noté U_w qui initialement vaut $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 2) Le facteur solaire noté (g ou FS) est la fraction totale d'énergie transmise au travers d'une paroi (58). La valeur initiale vaut $0,62$
- 3) La transmission lumineuse notée T_{vis} est la fraction du rayonnement visible incident transmis par un composant (58). Sa valeur initiale vaut $0,78$.

La modification du vitrage lors de cette simulation ne porte que sur la diminution du facteur solaire sans toutefois le minimiser à l'extrême. En effet, une diminution trop importante du facteur solaire g risquerait d'avoir un effet délétère dans une région au climat comme la Belgique fortement variable où le captage des gains solaires hivernaux est nécessaire pour minimiser l'utilisation d'énergie. Un trait d'attention particulier a dû être porté au facteur de transmission lumineuse afin de maintenir un confort visuel acceptable par l'utilisateur et ne pas sélectionner un vitrage fumé ne laissant passer que très peu de luminosité.

En fin de compte, un double vitrage de coefficient thermique U_w de $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, un facteur solaire g égal à $0,42$ et un facteur de transmission lumineuse égal à $0,72$ ont été choisis.

g. Simulation inertie

Dans cette version, l'entièreté des façades et des étages sont construits à base de pierres afin d'augmenter fortement l'inertie. De plus, le mur est bordant le salon a été totalement mis sous terre.

h. Simulation ombrage fixe

L'ajout d'un auvent aux fenêtres sud permet de limiter grandement les apports solaires estivaux tout en captant les rayons solaires hivernaux grâce aux différences de hauteur saisonnières du Soleil. En effet, l'astre lumineux suit une course différente selon les périodes de l'année, mais également selon la latitude de la Terre depuis laquelle il est observé. Cette course dépend de deux éléments : la hauteur du Soleil (son élévation par rapport au niveau du sol) et l'azimut (l'angle formé par le plan vertical d'un astre et le plan méridien du point d'observation (59)). Grâce à ces deux éléments et à partir d'une localisation, il est aisé de construire un diagramme solaire représentant l'évolution de l'incidence solaire au cours de l'année. La Figure 18 ci-dessous illustre la course de l'astre pour la localisation d'Arlon (60). Dans ce repère orthonormé, l'abscisse représente l'angle azimutal et l'ordonnée, l'angle d'élévation par rapport au sol. La ligne la plus à l'extérieur et colorée en jaune est la ligne représentant le mois de juin. Les chiffres positionnés de part et d'autre de cette ligne sont les heures de la journée. La ligne la plus intérieure (également la plus courte) est la ligne représentant le mois de décembre. Les lignes entre ces deux mois représentent les mois successifs. Ainsi, au plus les mois sont proches du mois de juin, au plus la courbe est longue et haute, ce qui signifie que les journées s'allongent et que le Soleil se situe plus haut dans le ciel. A l'inverse, au plus les mois se rapprochent de décembre, et au plus les journées raccourcissent avec un Soleil plus bas.

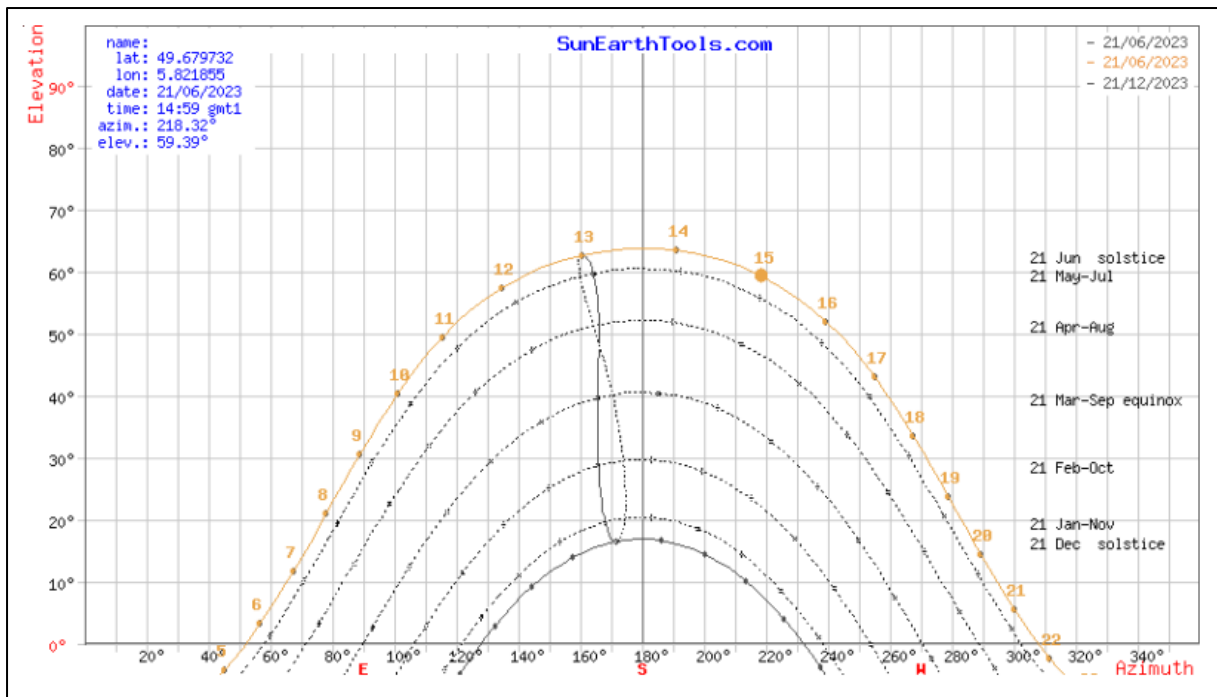


Figure 18 : Diagramme solaire pour la localisation de Arlon

La figure précédente nous indique que le Soleil atteint sa hauteur maximale durant le mois de juin (ligne jaune) à un azimut de 180° (c'est-à-dire plein sud) pour une élévation de 63° par rapport à l'horizontale. Ainsi, l'auvent devra protéger l'entièreté de la fenêtre de cette inclinaison qui correspond au moment où le soleil rayonne avec le plus d'intensité. A l'opposé, le Soleil est au plus bas au mois de décembre avec une élévation de 16°, représenté par la courbe la plus basse.

La protection mise en place doit donc protéger le bas de la fenêtre des rayons chauds d'été jusqu'à une inclinaison de 63° mais sans obstruer les rayons d'hiver arrivant avec une inclinaison de 16°. La figure 19 ci-dessous illustre un moyen simple de dimensionner la longueur de l'auvent.

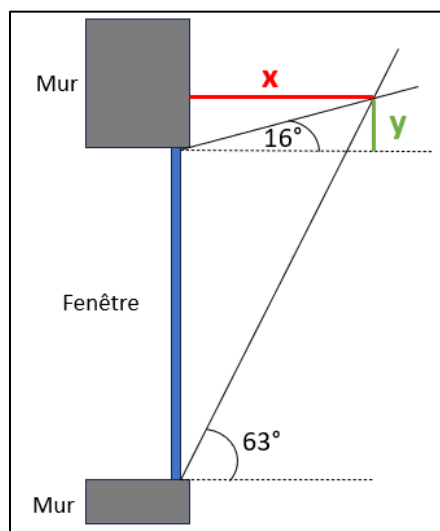


Figure 19 : Projection ombrage

Les dimensions « x » et « y » sont propres à chaque fenêtre et sont reprises dans le tableau 8. Les trois vitrages repris sont ceux orientés plein sud. La baie vitrée présente au coin de la salle à manger, les fenêtres hautes sont celles de la cuisine et de la salle à manger et les fenêtres de la colonne sont celles

du salon et de la mezzanine. Pour ces dernières, la hauteur « y » a été adaptée à la pente du toit. Une légère perte de vue de 58 centimètres se fait ressentir au niveau de la fenêtre orientée est de la chambre numéro 2.

Tableau 8 : Distances protections solaires

Fenêtre	x [m]	y [m]
Baie	1,43	0,41
Fenêtres hautes	0,72	0,21
Colonne	1,38	0,4

La figure 20 offre un rendu des vitrages munis de leur protection solaire fixe.

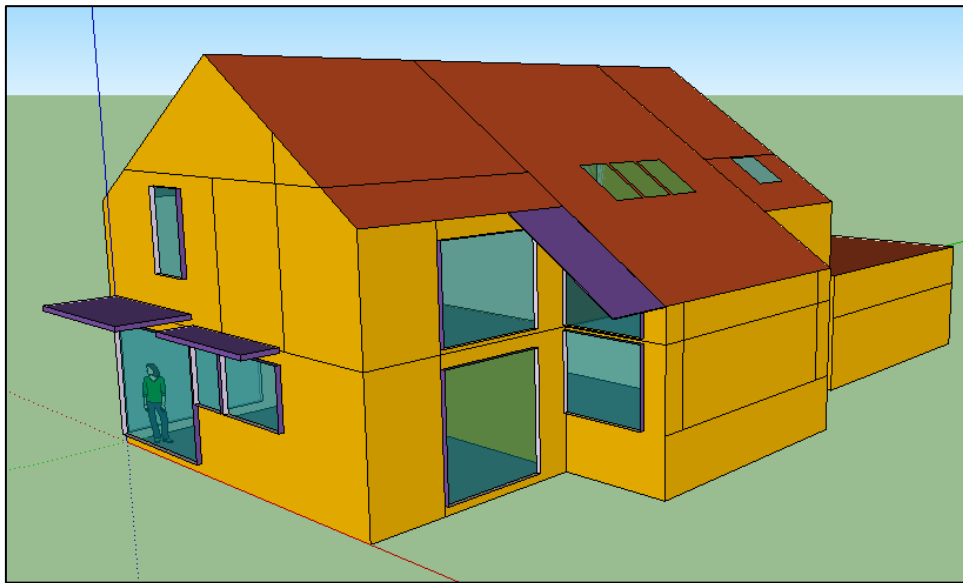


Figure 20 : Aperçu ombrage fixe

i. Simulation ombrage via des arbres

Dans cette configuration, les ombrages fixes accolés aux murs ont été remplacés par des arbres feuillus positionnés à une distance de 3 mètres de la façade sud de la cuisine. Les deux arbres les plus bas servent à protéger les fenêtres de la cuisine et l'arbre le plus haut celles du salon et de la mezzanine. Le même principe d'utilisation des angles que la simulation précédente a été utilisé. Cependant, la simulation a été découpée en deux parties afin de simuler la perte du feuillage en hiver. Ainsi, les arbres sont simulés avec leur feuillage tel que présenté à la figure 21 ci-dessous pour la période allant du 16 mars au 15 septembre. Pour l'autre partie de l'année allant du 16 septembre au 15 mars, seul le tronc a été utilisé. Cet exercice permet de ne pas perdre les gains solaires d'hiver utiles au chauffage. Le choix des essences les plus adaptées au climat local ainsi qu'à la surface d'ombrage recherchée doit idéalement être réalisé avec l'aide d'un architecte paysagiste.

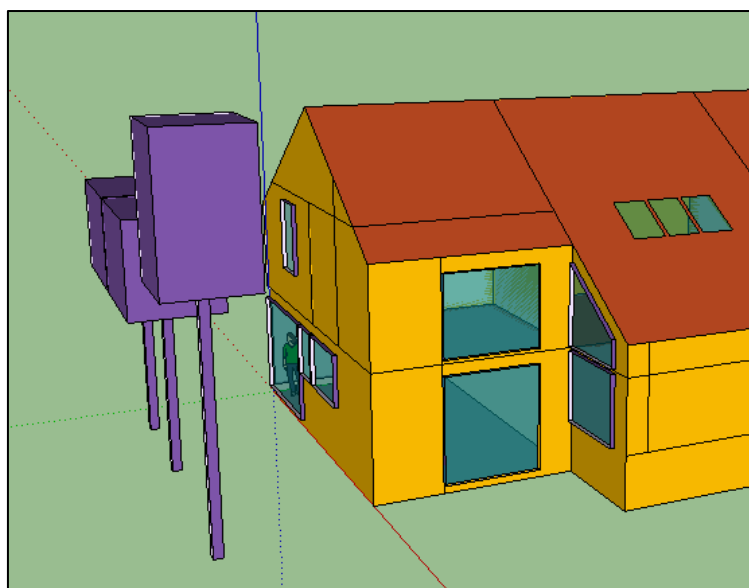


Figure 21 : Positionnement des arbres servant d'ombrage

j. Simulation aération nocturne

Simuler une aération nocturne par ouverture de fenêtre nécessite de prendre en compte toute une série de paramètres tels que la vitesse réelle du vent, la température de l'air et son humidité, la rugosité du paysage environnant, la forme de la maison, etc. La simulation menée ici n'est donc qu'une estimation incomplète des effets d'une aération nocturne basée sur des simplifications des calculs. Maintenant qu'il a été bien explicité que ces simulations ne correspondront pas à une réalité future, la solution peut être décrite. L'aération nocturne se base sur la poussée d'Archimède pour créer un mouvement d'air chaud partant du rez-de-chaussée et montant vers la mezzanine. L'air acheminé jusqu'à la mezzanine est alors évacué par les velux restés ouverts durant la nuit. L'air du rez-de-chaussée est renouvelé grâce à l'ouverture des fenêtres hautes de la façade sud de la cuisine. La simulation triple la ventilation de la cuisine, double celle du salon et prend en compte le transfert de toutes ces masses d'air vers la mezzanine. Mais cette aération supplémentaire se fait sous certaines conditions. Tout d'abord, des conditions temporelles. L'aération ne peut avoir lieu qu'entre 21h et 8h du matin durant la période s'étalant du 1^{er} mai au 30 septembre afin de simuler une aération strictement nocturne et estivale. Le fait d'aérer de la sorte durant la nuit permet d'évacuer la chaleur emmagasinée par les matériaux lourds durant la journée. La seconde condition est physique. L'aération ne prend place que si la température intérieure est supérieure à la température extérieure et si cette dernière est supérieure à 10°C. Cela permet de ne pas faire entrer de l'air trop chaud ou trop frais à l'intérieur du bâtiment.

k. Simulation isolation élevée

Les dernières simulations réalisées concernent l'augmentation de l'isolation de l'enveloppe externe. Pour ce faire, l'entièreté des murs extérieurs, de la toiture et des planchers en contact avec le sol ont vu l'épaisseur de leur isolant augmenter de 50%. Cette solution, en plus de permettre des gains d'énergie en matière de chauffage, permet d'éviter à la chaleur de rentrer trop facilement par conduction à travers les murs en été. Cependant cette solution risque d'être à double tranchant si les gains solaires sont trop importants et que l'air ainsi réchauffé n'est pas évacué efficacement. Des simulations tests d'une isolation réduite de 50% ont été réalisées par curiosité. Cependant celles-ci ont rapidement montré que les consommations en chauffage et en refroidissement étaient augmentées. La prospection de la solution réduction d'épaisseur des isolants s'est donc arrêtée là.

X. Présentation des résultats

Afin de faciliter la présentation des résultats, un numéro et un identifiant ont été attribués pour chaque simulation. Le tableau ci-dessous les énonce. A noter que l'acronyme « NC », suivant l'identifiant de certaines simulations, signifie que la simulation s'est faite sans présence de refroidissement actif des pièces.

Tableau 9 : Identifiants des simulations

N°	Identifiant	Simulation
0	Base_NoGrnd	Simulation de base avec cooling mais sans modification des paramètres de sol
1'	Base_NC	Simulation de base sans cooling
1	Base	Simulation de base sans mesure de réduction de la surchauffe mais avec cooling
2	Prot_Ext	Protections solaires externes automatisées sur certains vitrages
3	Prot_Ext_NC	Protections solaires externes automatisées sur certains vitrages, sans cooling
4	Posit_Vitr	Modification de la taille et position de certains vitrages
5	Posit_Vitr_NC	Modification de la taille et position de certains vitrages sans cooling
6	g_Vitr	Modification du facteur de transmission global des vitrages
7	g_Vitr_NC	Modification du facteur de transmission global des vitrages sans cooling
8	Inertie	Façades en pierre, mur est du salon enterré et allourdissement de certains murs intérieurs
9	Inertie_NC	Augmentation de l'inertie mais sans cooling
10	Omr_Fixe	Positionnement d'ombrages fixes sur la façade sud
11	Omr_Fixe_NC	Positionnement d'ombrages fixes sur la façade sud sans cooling
12	Arbres	Positionnement d'arbres au Sud de la maison
13	Arbres_NC	Positionnement d'arbres au Sud de la maison sans cooling
14	Aer_Noct	Mise en place d'une aération nocturne en été
15	Aer_Noct_NC	Mise en place d'une aération nocturne en été sans cooling
16	Isol_Plus	Augmentation de l'épaisseur d'isolant de 50%
17	Isol_Plus_NC	Augmentation de l'épaisseur d'isolant de 50% sans cooling

Trois données essentielles ont été récupérées de chaque simulation. Premièrement, la demande en chaleur émise par le bâtiment. Cette donnée correspond à la totalité de l'énergie annuelle sous forme de chaleur qui doit être émise dans le bâtiment afin de chauffer les locaux aux températures voulues. Le deuxième résultat obtenu est le pendant du premier mais concernant la demande en froid. Ces données offrent donc les besoins annuels en froid que devrait fournir un hypothétique système de climatisation de l'air (puissance encodée illimitée) s'il était installé. Enfin, un nombre d'heures annuelles de surchauffe que subit l'entièreté du bâtiment est donné. Ces données offrent une nouvelle dimension aux résultats puisqu'elles ne se basent plus uniquement sur la demande énergétique en fonction de la température de l'air mais sur le confort thermique des occupants selon la température opérative.

La présentation des résultats se déroule comme suit, premièrement, les résultats bruts de l'ensemble des simulations sont donnés sous forme de cinq tableaux. Ces tableaux sont séparés selon le type de données (demande en chaleur, demande en refroidissement et nombre d'heures de surchauffe) ainsi qu'en simulations (avec ou sans refroidissement actif). Ensuite, les résultats de chaque simulations sont comparés aux simulations initiales (avec ou sans refroidissement). Pour finir, l'évolution du rapport entre le chauffage et le refroidissement est présentée pour chacune des simulations.

1. Résultats globaux

Les tableaux de résultats présentés plus bas suivent généralement le même type d'évolution de la demande énergétique et de surchauffe. Les résultats de la simulation de base (avec cooling et modification des paramètres du sol) dont les graphiques sont repris ci-après, sont un bon exemple de l'évolution des résultats.

Ce premier graphique montre l'évolution graduelle de la demande en chaleur. Les données sont présentées en fonction de chaque scénario. La ligne verte correspond au scénario où l'humanité a su limiter les émissions carbone avec succès (SSP2-4.5). La courbe bleu représente le scénario SSP3-7.0 où l'humanité n'a su que partiellement limiter ses émissions de gaz à effet de serre. Et enfin, la courbe orange illustre l'évolution de la demande en chaleur si les émissions continuent comme c'est actuellement le cas. Les trois courbes débutent de la même façon avec les relevés historiques. Ensuite, celles-ci déclinent de manière indépendante pour terminer à horizon 2100 avec une demande plus importante en chauffage pour le SSP2-4.5 et nettement moins importante pour le SSP5-8.5.

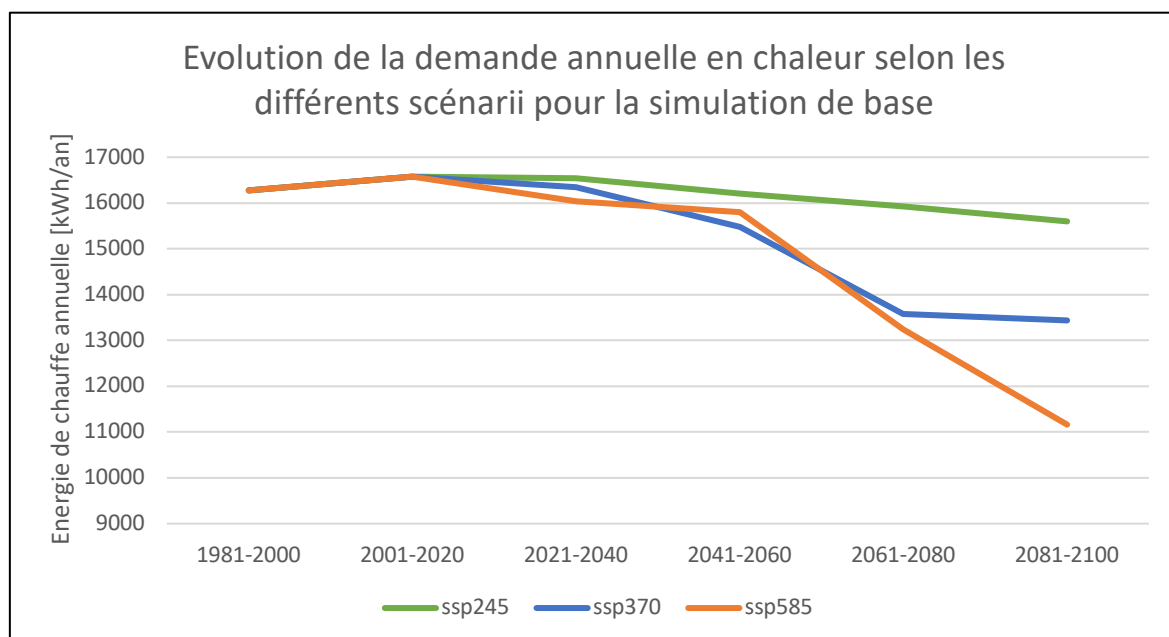


Figure 22 : Evolution de la demande en chaleur pour la simulation de base

La figure 23 montre l'évolution de la demande annuelle en froid au fil des décennies pour chaque scénario. Ce type d'évolution est commun à toutes les simulations. D'abord très faible, avec moins de 2000 kWh/an, la situation augmente très rapidement après la période 2021-2040. La légère baisse de la demande du SSP2-4.5 lors de la troisième période peut s'expliquer par le fait que les données météorologiques passent du modèle ERA5 basé sur les relevés historique, aux projections futures du modèle MPI. Les trois scénarii terminent avec des besoins en refroidissement très divers. Au plus le scénario considère qu'il y a des rejets de GES, au plus la demande en froid est élevée.

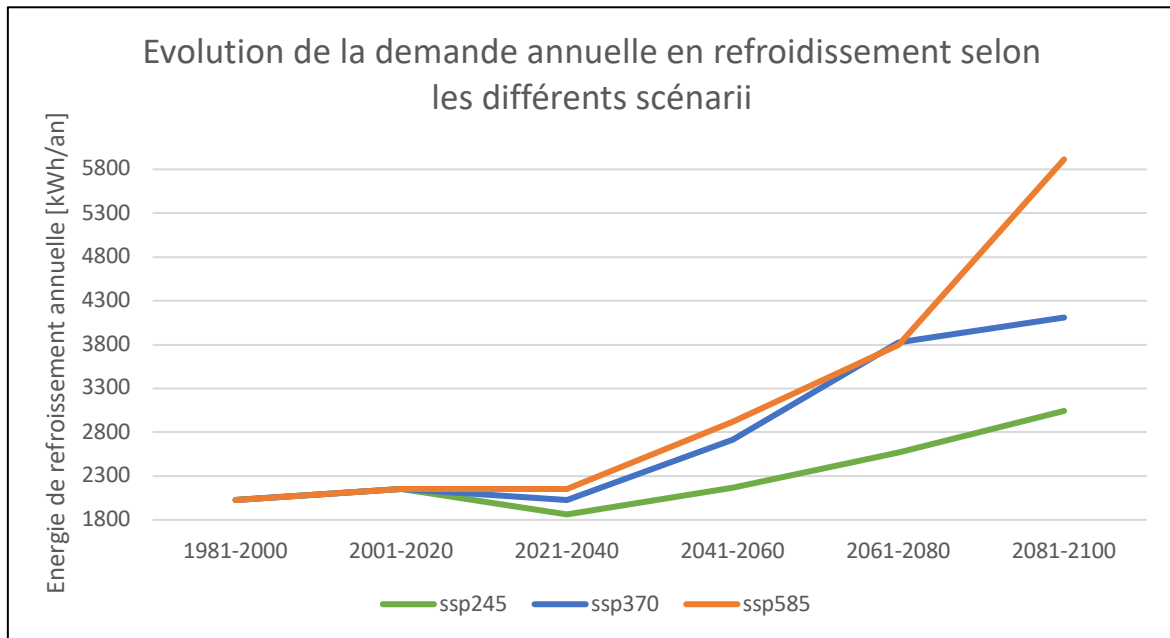


Figure 23 : Evolution de la demande en froid pour la simulation de base

Cette dernière figure ci-dessous caractérise bien l'évolution des heures de surchauffe pour l'ensemble des solutions. Comme précédemment, le nombre d'heures de surchauffe s'accroît selon le scénario.

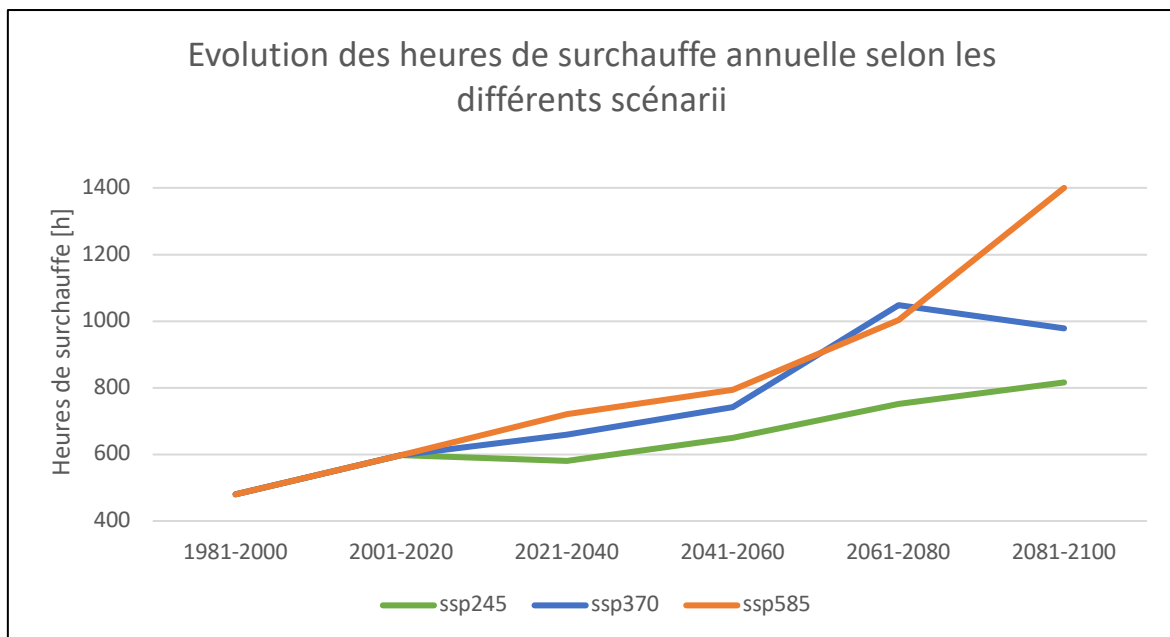


Figure 24 : Evolution des heures de surchauffe annuelles pour la simulation de base

Le tableau numéro 10 (resp. 11) affiche les résultats bruts de la demande en chauffage exprimée en kilowattheures par an pour les simulations avec (resp. sans) refroidissement actif.

Tableau 10 : Résultats bruts de la demande en chauffage des simulations avec refroidissement actif

Demande en chauffage des simulations avec refroidissement actif [kWh/an]											
		0	1	2	4	6	8	10	12	14	16
Période	Scenario	Base_NoGrnd	Base	Prot_Ext	Posit_Vitr	g_Vitr	Inertie	Ombre_Fixe	Arbres	Aer_Noct	IsolPlus
1981-2000	ERA5	14264	14445	16269	14541	15855	14323	14912	14494	14618	13226
2001-2020	ERA5	14510	14707	16576	14778	15961	14590	15138	14801	14797	13556
2021-2040	ssp245	14966	15138	16540	15256	16328	15039	15541	15268	15290	13938
	ssp370	14973	15124	16347	15190	16213	15032	15492	15163	15227	13961
	ssp585	14606	14736	16044	14844	15843	14644	15124	14816	14859	13584
2041-2060	ssp245	14720	14865	16200	14975	16028	14771	15256	14932	15027	13689
	ssp370	13830	13925	15476	14083	15181	13806	14331	13999	14159	12811
	ssp585	14288	14380	15803	14466	15570	14265	14785	14111	14627	13239
2061-2080	ssp245	14107	14241	15927	14468	15595	14139	14699	14407	14406	13051
	ssp370	12528	12471	13578	12537	13441	12374	12796	12479	12737	11496
	ssp585	12321	12190	13247	12346	13181	12167	12534	12199	12570	11285
2081-2100	ssp245	14042	14131	15599	14214	15326	14014	14538	14201	14371	13023
	ssp370	12667	12575	13437	12582	13393	12500	12856	12539	12898	11616
	ssp585	10178	9973	11162	10124	10905	9893	10278	9993	10367	9124

Tableau 11 : Résultats bruts de la demande en chauffage des simulations sans refroidissement actif

Demande en chauffage des simulations sans refroidissement actif [kWh/an]										
		1'	3	5	7	9	11	13	15	17
Période	Scenario	Base_NC	Prot_Ext_N C	Posit_Vitr_ NC	g_Vitr_NC	Inertie_NC	Ombre_Fixe_ NC	Arbres_NC	Aer_Noct_N C	IsolPlus_NC
1981-2000	ERA5	14421	16266	14522	15843	14363	14895	14478	14584	13207
2001-2020	ERA5	14688	16573	14763	15953	14633	15127	14802	14766	13546
2021-2040	ssp245	15117	16537	15241	16319	15080	15526	15257	15267	13923
	ssp370	15108	16345	15180	16208	15078	15482	15153	15203	13951
	ssp585	14724	16040	14837	15837	14694	15078	14807	14839	13579
2041-2060	ssp245	14851	16199	14965	16021	14821	15246	14922	15011	13685
	ssp370	13904	15473	14071	15175	13845	14321	13989	14134	12799
	ssp585	14361	15801	14454	15564	14307	14775	14093	14604	13228
2061-2080	ssp245	14230	15926	14463	15593	14188	14692	14399	14390	13051
	ssp370	12442	13576	12516	13432	12395	12777	12464	12705	11465
	ssp585	12233	13242	12336	13173	12204	12526	12193	12555	11276
2081-2100	ssp245	14111	15596	14201	15320	14054	14527	14192	14346	13010
	ssp370	12562	13433	12574	13389	12539	12850	12535	12876	11609
	ssp585	9950	11159	10111	10899	9913	10265	9980	10338	9109

Le tableau 12 donne la quantité d'énergie de refroidissement (en kilowattheures par an) demandée pour chaque simulation avec refroidissement actif. Afficher le tableau des simulations sans refroidissement actif serait inutile puisque celles-ci afficheraient zéro dans l'ensemble des cellules.

Tableau 12 : Résultats bruts de la demande en refroidissement

Demande en refroidissement des simulations avec refroidissement actif [kWh/an]											
		0	1	2	4	6	8	10	12	14	16
Période	Scenario	Base_NoGrnd	Base	Prot_Ext	Posit_Vitr	g_Vitr	Inertie	Ombr_Fixe	Arbres	Aer_Noct	IsolPlus
1981-2000	ERA5	1289	1324	192	1217	472	1301	849	998	1003	1543
2001-2020	ERA5	1666	1713	356	1632	680	1687	1150	1381	1327	2003
2021-2040	ssp245	1777	1862	524	1729	810	1848	1314	1522	1400	2143
	ssp370	1936	2026	516	1892	823	2016	1419	1653	1510	2347
	ssp585	2050	2154	530	1998	892	2138	1506	1726	1608	2477
2041-2060	ssp245	2075	2169	736	2042	1052	2157	1596	1835	1702	2447
	ssp370	2590	2717	1068	2589	1444	2701	2070	2326	2197	3012
	ssp585	2783	2922	1165	2805	1594	2908	2259	3223	2386	3210
2061-2080	ssp245	2460	2567	910	2441	1280	2556	1919	2169	2026	2872
	ssp370	3602	3822	1566	3611	2077	3816	2978	3246	3080	4186
	ssp585	3552	3798	1643	3603	2118	3795	3004	3215	3036	4139
2081-2100	ssp245	2902	3043	1258	2925	1683	3032	2360	2643	2494	3338
	ssp370	3860	4109	2081	3927	2520	4100	3351	3644	3434	4405
	ssp585	5517	5914	3225	5641	3858	5914	4922	5261	5022	6240

Les deux derniers tableaux (n°13 et n°14) de ces résultats globaux donnent le nombre d'heures de surchauffe subies par le bâtiment pour chacune des simulations réalisées.

Tableau 13 : Nombre d'heures de surchauffe des simulations avec refroidissement actif

Nombres d'heures de surchauffe des simulations avec refroidissement actif [h]											
		0	1	2	4	6	8	10	12	14	16
Période	Scenario	Base_NoGrnd	Base	Prot_Ext	Posit_Vitr	g_Vitr	Inertie	Ombr_Fixe	Arbres	Aer_Noct	IsolPlus
1981-2000	ERA5	476	480	29	404	125	464	293	326	414	564
2001-2020	ERA5	592	597	25	502	62	574	321	425	495	708
2021-2040	ssp245	564	581	71	470	167	563	343	415	455	680
	ssp370	642	659	58	545	178	640	378	482	525	771
	ssp585	694	721	77	584	198	695	410	516	570	829
2041-2060	ssp245	635	650	79	558	225	632	409	485	529	731
	ssp370	722	742	118	655	317	723	484	568	641	828
	ssp585	776	793	124	712	348	777	528	750	710	877
2061-2080	ssp245	730	751	110	671	272	733	466	582	647	838
	ssp370	1013	1048	186	913	434	1019	711	813	911	1158
	ssp585	962	1003	184	884	453	979	703	773	840	1077
2081-2100	ssp245	799	816	134	736	374	799	540	648	722	906
	ssp370	930	979	219	866	478	963	678	800	864	1055
	ssp585	1342	1400	405	1262	795	1370	1041	1193	1262	1468

Tableau 14 : Nombre d'heures de surchauffe des simulations sans refroidissement actif

		Nombre d'heures de surchauffe des simulations sans refroidissement actif [h]								
		1'	3	5	7	9	11	13	15	17
Période	Scenario	Base_NC	Prot_Ext_N C	Posit_Vitr_ NC	g_Vitr_NC	Inertie_NC	Ombre_Fixe_ NC	Arbres_NC	Aer_Noct_N C	IsolPlus_NC
1981-2000	ERA5	1241	273	1167	658	1226	950	1050	1075	1392
2001-2020	ERA5	1555	419	1424	758	1536	1120	1255	1281	1820
2021-2040	ssp245	1605	521	1485	872	1578	1306	1435	1309	1832
	ssp370	1782	644	1669	1034	1763	1459	1559	1497	2019
	ssp585	1799	651	1665	1090	1775	1474	1576	1541	2026
2041-2060	ssp245	1598	704	1517	994	1582	1340	1432	1325	1788
	ssp370	1733	925	1627	1223	1703	1468	1540	1535	1887
	ssp585	1741	1059	1635	1349	1711	1511	1780	1585	1883
2061-2080	ssp245	1749	917	1618	1225	1718	1501	1554	1527	1911
	ssp370	2352	1348	2254	1732	2340	2106	2129	2123	2497
	ssp585	2201	1510	2116	1765	2191	1996	2043	2022	2371
2081-2100	ssp245	1769	1085	1664	1337	1743	1522	1576	1593	1911
	ssp370	2112	1627	1977	1726	2090	1905	1926	1938	2246
	ssp585	2604	1923	2467	2123	2576	2368	2345	2434	2728

2. Résultats par rapport à la simulation initiale

Le tableau 15 donne l'évolution de la demande en chaleur des simulations comprenant un refroidissement actif par rapport à la simulation de base. Ainsi, la simulation de base est systématiquement à 100% puisque c'est sa demande qui sert de référence. Mis à part les simulations « Inertie » et « IsolPlus », toutes les autres simulations ont un pourcentage supérieur à 100%. Ce qui signifie que les consommations en chauffage augmentent pour chaque solution, excepté celles concernant l'augmentation de l'inertie et de l'isolation des murs extérieurs qui baissent ou maintiennent la demande en chauffage par rapport à la simulation de base. Attention toutefois que dans l'absolu les demandes en chaleur diminuent au fil des décennies pour chacune des actions mises en place. En revanche, la mise en place de certaines actions augmentera avec plus ou moins d'importance la demande en chaleur par rapport au cas où aucune action n'aurait été menée.

Tableau 15 : Comparaison de la demande en chaleur des simulations avec cooling par rapport à la simulation de base

Q_HEAT (Initial/Simulation)		1	2	4	6	8	10	12	14	16
Période	Scenario	Base	Prot_Ext	Posit_Vitr	g_Vitr	Inertie	Ombr_Fixe	Arbres	Aer_Noct	IsolPlus
1981-2000	ERA5	100%	113%	101%	110%	99%	103%	100%	101%	92%
2001-2020	ERA5	100%	113%	100%	109%	99%	103%	101%	101%	92%
2021-2040	ssp245	100%	109%	101%	108%	99%	103%	101%	101%	92%
	ssp370	100%	108%	100%	107%	99%	102%	100%	101%	92%
	ssp585	100%	109%	101%	108%	99%	103%	101%	101%	92%
2041-2060	ssp245	100%	109%	101%	108%	99%	103%	100%	101%	92%
	ssp370	100%	111%	101%	109%	99%	103%	101%	102%	92%
	ssp585	100%	110%	101%	108%	99%	103%	98%	102%	92%
2061-2080	ssp245	100%	112%	102%	110%	99%	103%	101%	101%	92%
	ssp370	100%	109%	101%	108%	99%	103%	100%	102%	92%
	ssp585	100%	109%	101%	108%	100%	103%	100%	103%	93%
2081-2100	ssp245	100%	110%	101%	108%	99%	103%	100%	102%	92%
	ssp370	100%	107%	100%	107%	99%	102%	100%	103%	92%
	ssp585	100%	112%	102%	109%	99%	103%	100%	104%	91%

Le tableau numéro 16 est le pendant du précédent mais concernant les simulations dépourvues de système de refroidissement. Les résultats sont largement similaires à ceux du tableau précédent.

Tableau 16 : Comparaison de la demande en chaleur des simulations sans cooling par rapport à la simulation de base

Q_HEAT (Initial/Simulation)		1'	3	5	7	9	11	13	15	17
Période	Scenario	Base_NC	Prot_Ext_NC	Posit_Vitr_NC	g_Vitr_NC	Inertie_NC	Ombr_Fixe_NC	Arbres_NC	Aer_Noct_NC	IsolPlus_NC
1981-2000	ERA5	100%	113%	101%	110%	100%	103%	100%	101%	92%
2001-2020	ERA5	100%	113%	101%	109%	100%	103%	101%	101%	92%
2021-2040	ssp245	100%	109%	101%	108%	100%	103%	101%	101%	92%
	ssp370	100%	108%	100%	107%	100%	102%	100%	101%	92%
	ssp585	100%	109%	101%	108%	100%	102%	101%	101%	92%
2041-2060	ssp245	100%	109%	101%	108%	100%	103%	100%	101%	92%
	ssp370	100%	111%	101%	109%	100%	103%	101%	102%	92%
	ssp585	100%	110%	101%	108%	100%	103%	98%	102%	92%
2061-2080	ssp245	100%	112%	102%	110%	100%	103%	101%	101%	92%
	ssp370	100%	109%	101%	108%	100%	103%	100%	102%	92%
	ssp585	100%	108%	101%	108%	100%	102%	100%	103%	92%
2081-2100	ssp245	100%	111%	101%	109%	100%	103%	101%	102%	92%
	ssp370	100%	107%	100%	107%	100%	102%	100%	102%	92%
	ssp585	100%	112%	102%	110%	100%	103%	100%	104%	92%

Le prochain tableau montre l'évolution des demandes en froid pour les simulations comprenant cette option. Ces données illustrent parfaitement l'efficacité octroyée par chacune des solutions mises en œuvre pour diminuer le recours à un système actif de conditionnement de la température de l'air. Au vu des résultats de ce tableau, ce sont les protections solaires extérieures automatisées qui semblent offrir les meilleurs résultats avec une baisse de 85% de la demande en froid par rapport à la situation initiale pour la première période. Cependant, malgré ces performances idéales la baisse n'est plus que de 45% dans les pires conditions (scénario SSP5-8.5 horizon 2100). Il est également à noter le faible impact que représente l'augmentation de l'inertie.

Tableau 17 : Comparaison de la demande en froid des simulations avec cooling par rapport à la simulation initiale

Q_COOL (Initial/Simulation)		1	2	4	6	8	10	12	14	16
Période	Scenario	Base	Prot_Ext	Posit_Vitr	g_Vitr	Inertie	Ombre_Fixe	Arbres	Aer_Noct	IsolPlus
1981-2000	ERA5	100%	15%	92%	36%	98%	64%	75%	76%	117%
2001-2020	ERA5	100%	21%	95%	40%	98%	67%	81%	77%	117%
2021-2040	ssp245	100%	28%	93%	44%	99%	71%	82%	75%	115%
	ssp370	100%	25%	93%	41%	100%	70%	82%	75%	116%
	ssp585	100%	25%	93%	41%	99%	70%	80%	75%	115%
2041-2060	ssp245	100%	34%	94%	49%	99%	74%	85%	78%	113%
	ssp370	100%	39%	95%	53%	99%	76%	86%	81%	111%
	ssp585	100%	40%	96%	55%	100%	77%	110%	82%	110%
2061-2080	ssp245	100%	35%	95%	50%	100%	75%	84%	79%	112%
	ssp370	100%	41%	94%	54%	100%	78%	85%	81%	110%
	ssp585	100%	43%	95%	56%	100%	79%	85%	80%	109%
2081-2100	ssp245	100%	41%	96%	55%	100%	78%	87%	82%	110%
	ssp370	100%	51%	96%	61%	100%	82%	89%	84%	107%
	ssp585	100%	55%	95%	65%	100%	83%	89%	85%	106%

Afficher le tableau de comparaison des demandes en froid pour les simulations sans cooling est inutile puisque cette demande est nulle pour ces simulations. Les deux tableaux suivants (18 et 19) comparent les périodes de surchauffe de la simulation de base avec chacune des autres simulations. Au plus la valeur du pourcentage est faible, au plus les heures de surchauffe sont réduites.

Tableau 18 : Comparaison des heures de surchauffe des simulations avec cooling par rapport à la simulation de base

Heures Surchauffe		1	2	4	6	8	10	12	14	16
Période	Scenario	Base	Prot_Ext	Posit_Vitr	g_Vitr	Inertie	Ombre_Fixe	Arbres	Aer_Noct	IsolPlus
1981-2000	ERA5	100%	6%	84%	26%	97%	61%	68%	86%	118%
2001-2020	ERA5	100%	4%	84%	10%	96%	54%	71%	83%	119%
2021-2040	ssp245	100%	12%	81%	29%	97%	59%	71%	78%	117%
	ssp370	100%	9%	83%	27%	97%	57%	73%	80%	117%
	ssp585	100%	11%	81%	27%	96%	57%	72%	79%	115%
2041-2060	ssp245	100%	12%	86%	35%	97%	63%	75%	81%	112%
	ssp370	100%	16%	88%	43%	97%	65%	77%	86%	112%
	ssp585	100%	16%	90%	44%	98%	67%	95%	90%	111%
2061-2080	ssp245	100%	15%	89%	36%	98%	62%	77%	86%	112%
	ssp370	100%	18%	87%	41%	97%	68%	78%	87%	110%
	ssp585	100%	18%	88%	45%	98%	70%	77%	84%	107%
2081-2100	ssp245	100%	16%	90%	46%	98%	66%	79%	88%	111%
	ssp370	100%	22%	88%	49%	98%	69%	82%	88%	108%
	ssp585	100%	29%	90%	57%	98%	74%	85%	90%	105%

Tableau 19 : Comparaison des heures de surchauffe des simulations sans cooling par rapport à la simulation de base sans cooling

Heures Surchauffe		1'	3	5	7	9	11	13	15	17
Période	Scénario	Base_NC	Prot_Ext_NC	Posit_Vitr_NC	g_Vitr_NC	Inertie_NC	Omr_Fixe_NC	Arbres_NC	Aer_Noct_NC	IsolPlus_NC
1981-2000	ERA5	100%	22%	94%	53%	99%	77%	85%	87%	112%
2001-2020	ERA5	100%	27%	92%	49%	99%	72%	81%	82%	117%
2021-2040	ssp245	100%	32%	93%	54%	98%	81%	89%	82%	114%
	ssp370	100%	36%	94%	58%	99%	82%	87%	84%	113%
	ssp585	100%	36%	93%	61%	99%	82%	88%	86%	113%
2041-2060	ssp245	100%	44%	95%	62%	99%	84%	90%	83%	112%
	ssp370	100%	53%	94%	71%	98%	85%	89%	89%	109%
	ssp585	100%	61%	94%	77%	98%	87%	102%	91%	108%
2061-2080	ssp245	100%	52%	93%	70%	98%	86%	89%	87%	109%
	ssp370	100%	57%	96%	74%	99%	90%	91%	90%	106%
	ssp585	100%	69%	96%	80%	100%	91%	93%	92%	108%
2081-2100	ssp245	100%	61%	94%	76%	99%	86%	89%	90%	108%
	ssp370	100%	77%	94%	82%	99%	90%	91%	92%	106%
	ssp585	100%	74%	95%	82%	99%	91%	90%	93%	105%

La surchauffe n'est calculée que lorsque les locaux sont occupés. Il est donc intéressant de comparer les temps de surchauffe de chaque simulation avec les 6672 heures d'occupation annuelle des différents locaux. Pour la simulation de base, le temps de surchauffe s'approche du double entre la période 1981-2000 et les scénarii horizon 2100 SSP2-4.5 et SSP3-7.0 alors qu'elle triple pour le scénario SSP5-8.5. Les tableaux 20 et 21 illustrent clairement la future dépendance des bâtiments aux systèmes de refroidissement actifs. En effet, même le système le plus performant que sont les protections solaires externes subissent de la surchauffe durant presque 30% du temps d'occupation dans le pire des scénarii 2100.

Tableau 20 : Part de surchauffe par rapport aux horaires d'occupation pour les simulations avec cooling

		Pourcentage de surchauffe par rapport aux heures d'occupation								
Période	Scénario	1	2	4	6	8	10	12	14	16
		Base	Prot_Ext	Posit_Vitr	g_Vitr	Inertie	Omr_Fixe	Arbres	Aer_Noct	IsolPlus
1981-2000	ERA5	7%	0%	6%	2%	7%	4%	0%	6%	8%
2001-2020	ERA5	9%	0%	8%	1%	9%	5%	0%	7%	11%
2021-2040	ssp245	9%	1%	7%	3%	8%	5%	0%	7%	10%
	ssp370	10%	1%	8%	3%	10%	6%	0%	8%	12%
	ssp585	11%	1%	9%	3%	10%	6%	0%	9%	12%
2041-2060	ssp245	10%	1%	8%	3%	9%	6%	0%	8%	11%
	ssp370	11%	2%	10%	5%	11%	7%	0%	10%	12%
	ssp585	12%	2%	11%	5%	12%	8%	0%	11%	13%
2061-2080	ssp245	11%	2%	10%	4%	11%	7%	0%	10%	13%
	ssp370	16%	3%	14%	7%	15%	11%	0%	14%	17%
	ssp585	15%	3%	13%	7%	15%	11%	0%	13%	16%
2081-2100	ssp245	12%	2%	11%	6%	12%	8%	0%	11%	14%
	ssp370	15%	3%	13%	7%	14%	10%	0%	13%	16%
	ssp585	21%	6%	19%	12%	21%	16%	0%	19%	22%

Tableau 21 : Part de surchauffe par rapport aux horaires d'occupation pour les simulations sans cooling

		Pourcentage de surchauffe par rapport aux heures d'occupation								
		1'	3	5	7	9	11	13	15	17
Période	Scénario	Base_NC	Prot_Ext_ NC	Posit_Vitr_ NC	g_Vitr_NC	Inertie_NC	Ombre_Fixe_ NC	Arbres_NC	Aer_Noct_ NC	IsolPlus_NC
1981-2000	ERA5	19%	4%	17%	10%	18%	14%	16%	16%	21%
2001-2020	ERA5	23%	6%	21%	11%	23%	17%	19%	19%	27%
2021-2040	ssp245	24%	8%	22%	13%	24%	20%	22%	20%	27%
	ssp370	27%	10%	25%	15%	26%	22%	23%	22%	30%
	ssp585	27%	10%	25%	16%	27%	22%	24%	23%	30%
2041-2060	ssp245	24%	11%	23%	15%	24%	20%	21%	20%	27%
	ssp370	26%	14%	24%	18%	26%	22%	23%	23%	28%
	ssp585	26%	16%	25%	20%	26%	23%	27%	24%	28%
2061-2080	ssp245	26%	14%	24%	18%	26%	22%	23%	23%	29%
	ssp370	35%	20%	34%	26%	35%	32%	32%	32%	37%
	ssp585	33%	23%	32%	26%	33%	30%	31%	30%	36%
2081-2100	ssp245	27%	16%	25%	20%	26%	23%	24%	24%	29%
	ssp370	32%	24%	30%	26%	31%	29%	29%	29%	34%
	ssp585	39%	29%	37%	32%	39%	35%	35%	36%	41%

3. Rapport des demandes en chauffage et en refroidissement

Afin de rendre compte de l'évolution de la demande énergétique, il est intéressant de réaliser le rapport entre la demande en chaud et celle en froid pour chacune des simulations. De cette façon, les simulations avec les valeurs les plus hautes sont celles où la demande en chaleur est plus importante que la demande en froid. Les simulations ayant une valeur inférieure à un sont celles qui possèdent une demande en refroidissement plus importante que la demande en chauffage. Cependant, aucun cas de ce type n'est répertorié dans le tableau 22 ci-dessous. Une coloration graduée a été appliquée afin d'aider à la lecture des résultats. Au plus la cellule est rouge foncé, au plus la demande est axée vers une demande en chaud et au plus la demande se rapproche d'une demande en froid, au plus la cellule sera de couleur bleue. La partie supérieure du tableau, correspondant aux périodes 1981 à 2040, est dominée par des demandes en chaleur. L'écart entre les deux demandes se réduit alors de plus en plus en descendant dans le tableau (donc en regardant plus loin dans le futur). Le transfert de chaleur le plus impressionnant revient à la simulation des protections solaires externes (Prot_Ext). Celle-ci voit la demande en chaud chuter de 85 fois la demande en froid à environ 3,5 fois cette dernière. Cette colossale variation est principalement due au fait que la demande en refroidissement initiale était extrêmement faible, à peine 192 kWh/an (cfr. tableau 12 page 46)

Tableau 22 : Rapport de la demande en chauffage et en refroidissement

Q_Heat/Q_Cool		0	1	2	4	6	8	10	12	14	16
Période	Scénario	Base_NoGrnd	Base	Prot_Ext	Posit_Vitr	g_Vitr	Inertie	Ombre_Fixe	Arbres	Aer_Noct	IsolPlus
1981-2000	ERA5	11.07	10.91	84.73	11.95	33.59	11.01	17.56	14.52	14.57	8.57
2001-2020	ERA5	8.71	8.59	46.56	9.06	23.47	8.65	13.16	10.72	11.15	6.77
2021-2040	ssp245	8.42	8.13	31.56	8.82	20.16	8.14	11.83	10.03	10.92	6.50
	ssp370	7.73	7.46	31.68	8.03	19.70	7.46	10.92	9.17	10.08	5.95
	ssp585	7.12	6.84	30.27	7.43	17.76	6.85	10.04	8.58	9.24	5.48
2041-2060	ssp245	7.09	6.85	22.01	7.33	15.24	6.85	9.56	8.14	8.83	5.59
	ssp370	5.34	5.13	14.49	5.44	10.51	5.11	6.92	6.02	6.44	4.25
	ssp585	5.13	4.92	13.56	5.16	9.77	4.91	6.54	4.38	6.13	4.12
2061-2080	ssp245	5.73	5.55	17.50	5.93	12.18	5.53	7.66	6.64	7.11	4.54
	ssp370	3.48	3.26	8.67	3.47	6.47	3.24	4.30	3.84	4.14	2.75
	ssp585	3.47	3.21	8.06	3.43	6.22	3.21	4.17	3.79	4.14	2.73
2081-2100	ssp245	4.84	4.64	12.40	4.86	9.11	4.62	6.16	5.37	5.76	3.90
	ssp370	3.28	3.06	6.46	3.20	5.31	3.05	3.84	3.44	3.76	2.64
	ssp585	1.84	1.69	3.46	1.79	2.83	1.67	2.09	1.90	2.06	1.46

XI. Analyse des résultats

À présent que les résultats ont été exposés, l'analyse de ceux-ci peut débuter. En premier lieu, la question pourrait se poser de comment des heures de surchauffe peuvent subsister malgré la présence d'un refroidissement actif d'une puissance illimitée pour la moitié des simulations. Plusieurs éléments peuvent venir expliquer ce point. Il y a tout d'abord une question d'horaire. En effet, l'activation du refroidissement et le commencement du comptage des heures de surchauffe se font aux mêmes horaires. Or si les pièces du bâtiment sont à une température supérieure à 26°C au moment où commencent le comptage et le refroidissement, il faut un certain temps avant que celles-ci ne se refroidissent. Ce laps de temps, plus ou moins élevé selon les conditions initiales, crée des périodes de surchauffe. La seconde cause est plus subtile. Le refroidissement actif est programmé sur base de la température de l'air mais le calcul de la surchauffe est quant à lui établi sur la température opérative. Ces deux données sont mesurées sur des valeurs physiques distinctes, ce qui provoque un léger décalage. Ce décalage est visible sur le graphique de la figure numéro 25. Ce graphique est tiré de la simulation de la première semaine de juin selon les prévisions climatiques de la période 2081-2100 pour le scénario SSP5-8.5 avec la paramétrisation de la simulation de base. La ligne jaune horizontale est un repère placé à 26°C, elle sert à identifier à quels instants les températures opératives (ligne verte) et températures de l'air (ligne bleu ciel) dépassent la limite autorisée. La ligne bleu marine quant à elle représente l'énergie utilisée par le système de climatisation en kJ/h. Les deux grands pics façonnés par la ligne bleu marine sont les zones d'intérêts pour visualiser les différences de réaction entre la température de l'air et la température opérative. Ils correspondent aux périodes d'activation du refroidissement durant la semaine. Le premier pic, entre 4469 heures et 4474 heures correspond à la première période d'occupation des locaux le matin (à savoir entre 5h et 8h). Le second pic, plus large, allant de 4479 heures à un peu plus que 4485 heures, correspond à la période de 16 heures à 23 heures. C'est durant ces deux périodes que sont comptabilisées les heures de surchauffe. Pour ce graphique, de nombreuses heures de surchauffe seront ajoutées puisque la température opérative (en vert) dépasse constamment la limite des 26°C (en jaune). On remarque une nette diminution lorsque le conditionnement de l'air débute mais elle n'est pas suffisante pour que la température ressentie soit inférieure à la limite fixée. La ligne bleu clair (température de l'air) décroît bien plus rapidement que la courbe verte et atteint un plateau durant la période de refroidissement, cela est dû au fait que la consigne de refroidissement est fixée à 25°C. Une solution pour éviter cette situation serait de diminuer la consigne de climatisation, mais il y aurait alors un risque de comptabiliser des kilowattheures de refroidissement inutiles trop souvent au cours de l'année. De plus, même avec une consigne plus basse, il y a toujours un risque que des heures de surchauffe subsistent malgré tout. Placer la consigne légèrement plus bas que la limite de surchauffe est donc un compromis juste pour tenter de minimiser la surchauffe sans considérer une demande excessive d'énergie froide.

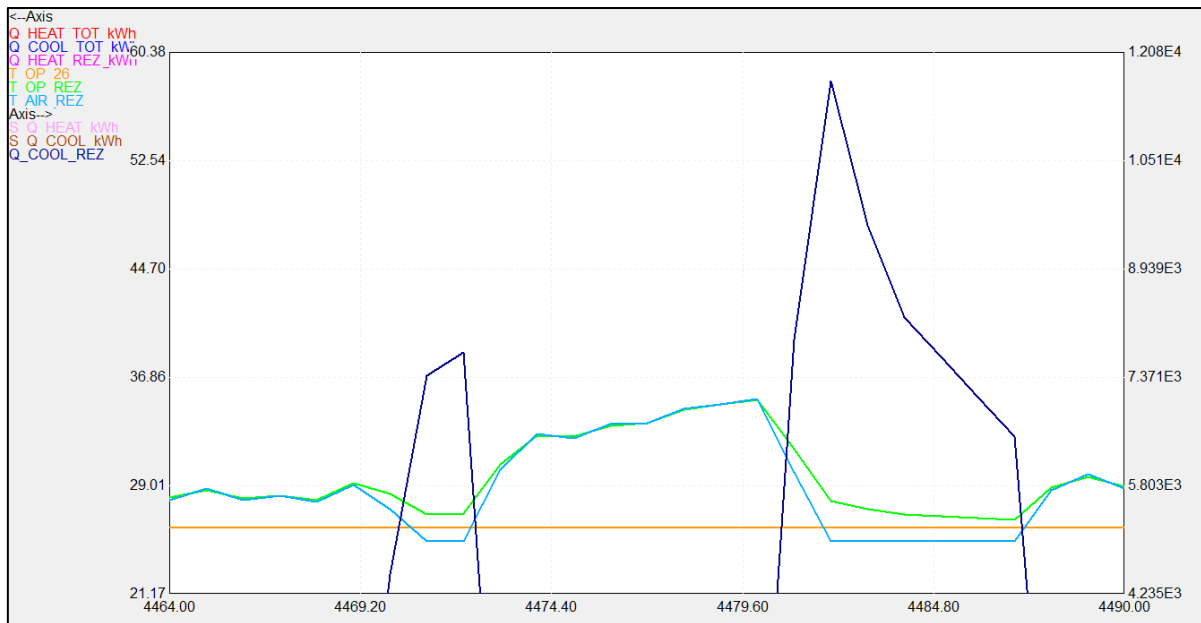


Figure 25 : Évolution des températures de l'air et opérative suite à l'activation du refroidissement

1. Analyse par type de simulation

Remarque préliminaire : Les simulations de même type (avec et sans refroidissement actif) sont regroupées dans les différents paragraphes qui suivent. Généralement, ce sont les résultats des simulations avec refroidissement qui seront cités. Ainsi, la majorité des pourcentages énoncés dans les prochaines sections font référence aux simulations du type de la section correspondante avec refroidissement, sauf si une indication contraire est mentionnée dans ce même paragraphe.

a. Simulation 0 : Base_NoGrnd

Cette simulation sert à mettre en évidence les effets que joueront les températures du sol sur le bâtiment. En effet, celles-ci ne resteront pas constantes si les conditions extérieures évoluent. Il est donc intéressant d'adapter le sol aux nouvelles conditions et de vérifier dans quelles mesures celles-ci influent les résultats. Les résultats offrent des variations plus ou moins faibles mais bel et bien présentes. La demande en chaleur augmente de 1% avant de baisser de 1 à 2% selon le scénario à l'horizon 2100. La demande en refroidissement quant à elle augmente de 3 à 7% sur l'ensemble des périodes et scénarii. Pour les mêmes plages, l'augmentation de la surchauffe est de 1 à 5%. Le tableau 23 reprend les variations obtenues en divisant les résultats de la simulation avec modifications des paramètres influençant la température du sol par les résultats sans modification de ces paramètres. Ainsi, les valeurs obtenues qui sont supérieures à 100% indiquent une augmentation de la demande énergétique ou de la surchauffe lorsque les paramètres du sol sont modifiés. Et inversement pour les valeurs inférieures à 100%. Au vu de ces résultats, notamment au point de vue de la demande en refroidissement qui est impactée jusqu'à 7%, la paramétrisation de la température du sol a été faite pour l'ensemble des simulations suivantes.

Tenter de prendre en compte de manière holistique les perturbations pouvant découler du choc auquel il faut faire face fait partie de l'analyse résiliente de la vulnérabilité du bâtiment. L'augmentation des moyennes de températures du sol découlant de la hausse des températures de l'air doit être prise en compte dans cette démarche. Négliger ce paramètre conduirait à occulter une partie de la demande en refroidissement du bâtiment.

Tableau 23 : Evolution des résultats avec ou sans paramétrisation des températures du sol

Période	Scénario	Q_Heat	Q_Cool	H_Surch
1981-2000	ERA5	101%	103%	101%
2001-2020	ERA5	101%	103%	101%
2021-2040	ssp245	101%	105%	103%
	ssp370	101%	105%	103%
	ssp585	101%	105%	104%
2041-2060	ssp245	101%	105%	102%
	ssp370	101%	105%	103%
	ssp585	101%	105%	102%
2061-2080	ssp245	101%	104%	103%
	ssp370	100%	106%	103%
	ssp585	99%	107%	104%
2081-2100	ssp245	101%	105%	102%
	ssp370	99%	106%	105%
	ssp585	98%	107%	104%

b. Simulations 1 et 1' : Base et Base_NC

Dans cette simulation de base, aucun système de protection contre la chaleur n'est mis en place. Cette simulation et son homologue dépourvu de système de refroidissement servent de référence par rapport aux autres simulations respectivement avec et sans refroidissement. Toutes deux montrent un risque croissant et non négligeable de surchauffe de l'habitation. La surchauffe passe de 19% du temps d'occupation à presque 40% dans le pire des scénarii. Une telle valeur semble être invivable pour les occupants et des systèmes de protection solaire doivent être mis en place. Entre la période 1981-2000 et la période 2081-2100, la demande en chaleur chute de plus de 30% et la demande en froid est un peu moins de 4,5 fois plus élevée, soit 450% de la demande initiale pour le pire scénario.

c. Simulations 2 et 3 : Prot_Ext et Prot_Ext_NC

Ces simulations sont les plus performantes d'un point de vue de la réduction de la surchauffe et de la consommation d'énergie de refroidissement. Pour chaque tableau affiché dans la section précédente « X.Présentation des résultats », cette solution est la plus efficace excepté pour ce qui est de la demande en chaleur qui augmente d'une plage allant de 7% à 13%. Cependant, les performances de réduction de la demande en froid sont exceptionnelles. La demande se situe entre 15% et 55% de la demande en froid initiale. Le tableau 24 montre la balance énergétique entre la simulation de base et celle simulant les protections solaires externes. La colonne nommée « Surplus Q_Heat » indique le nombre de kilowattheures de chauffage supplémentaires qui sont nécessaires lorsque les stores automatisés sont mis en place. Ainsi, 1824 kWh/an supplémentaires devraient être fournis pour la période 1981-2000. Cette augmentation s'explique par le fait que les gains solaires entrant sont fortement réduits dû à la présence des stores externes. La colonne suivante affiche les économies d'énergie de refroidissement réalisées grâce à l'ajout des stores. Enfin, la troisième section donne la balance annuelle en sommant les valeurs des deux colonnes précédentes. Si ce chiffre est positif, cela signifie que la solution mise en place nécessite d'apporter davantage de chaleur que ce qu'elle n'épargne du froid. A l'inverse, une valeur négative signifie que l'énergie de refroidissement évitée est supérieure à l'énergie de chauffage supplémentaire qui a du être ajoutée pour compenser l'effet de la pose des protections automatisées. Si l'on considère que les rendements de chauffage et de refroidissement sont similaires, la mise en place

de la solution devient intéressante dès l'instant où la balance passe à une valeur négative. Dès lors, cette solution devient intéressante dès la période 2021-2040 pour les scénarii SSP3-7.0 et SSP5-8.5 et dès 2041-2060 pour tous les scénarii. Cependant, les quantités d'énergie avancées dans ce tableau ne sont que les besoins bruts d'énergie (chaude ou froide) à apporter dans le bâtiment. La balance réelle dépendra des systèmes de production, de transfert et d'émission (de chaleur et de refroidissement) qui seront installés dans le bâtiment. Sachant que de manière générale il est plus rentable énergétiquement de produire de la chaleur que du froid (61), la balance avancée dans le tableau ci-dessous peut-être considérée comme fiable.

Tableau 24 : Balance énergétique annuelle entre la simulation de base et la simulation protections solaires automatisées

Période	Scénario	Surplus Q_Heat [kWh/an]	Economie Q_Cool [kWh/an]	Balance [kWh/an]
1981-2000	ERA5	1824	-1132	692
2001-2020	ERA5	1869	-1357	512
2021-2040	ssp245	1402	-1338	64
	ssp370	1223	-1510	-287
	ssp585	1308	-1624	-316
2041-2060	ssp245	1335	-1433	-98
	ssp370	1551	-1649	-98
	ssp585	1423	-1757	-334
2061-2080	ssp245	1686	-1657	29
	ssp370	1107	-2256	-1149
	ssp585	1057	-2155	-1098
2081-2100	ssp245	1468	-1785	-317
	ssp370	862	-2028	-1166
	ssp585	1189	-2689	-1500

La solution présentée ici semble donc idéale pour fortement diminuer la demande en refroidissement tout en évitant d'augmenter trop fortement les besoins en chaleur. Cependant, le bon fonctionnement de cette solution dépend de nombreux facteurs externes. Il y a tout d'abord l'absolue nécessité d'électricité pour baisser ou relever les protections automatiquement. Il est important de notifier ce point même si le projet prévoit d'intégrer des panneaux photovoltaïques lors de la construction du bâtiment. Il y a également de nombreuses pièces et capteurs, provenant certainement de l'autre bout du globe, qui sont susceptibles de casser ou de s'user. Le remplacement de ceux-ci ne serait alors pas garanti en cas de perturbations mondiales ou de pénurie de matériaux (62). La mise en place de ce système, bien que particulièrement efficace, pose donc quelques problèmes d'un point de vue de la résilience.

d. Simulations 4 et 5 : Posit_Vitr et Posit_Vitr_NC

La réduction du vitrage des façades sud tel que proposée dans ces deux simulations ci n'a permis d'obtenir que des économies minimales d'énergie en froid (de l'ordre de 4% à 8% de réduction) et une très légère augmentation de la demande en chauffage (maximum 2%). Les périodes de surchauffe ne sont que faiblement diminuées par rapport à la simulation de base. Le repositionnement des vitrages devient de plus en plus intéressant au fur et à mesure que les températures moyennes augmentent. Dans le dernier

scénario (SSP5-8.5 horizon 2100), cette solution permet de réduire la surchauffe de 138 heures. A titre de comparaison, la mise en place des protections automatisées réduisait la surchauffe de presque 1000 heures. Une solution serait alors de réduire davantage la surface totale de vitrage sur les façades sud mais le confort visuel des occupants risque alors d'être impacté. Malgré tout, penser à la meilleure façon de positionner le vitrage entre totalement dans une démarche résiliente puisque penser à l'avance aux risques liés à une exposition trop importante lors du design de la maison permettra de prémunir les occupants de surchauffes récurrentes.

e. Simulations 6 et 7 : g_Vitr et g_Vitr_NC

Réduire le facteur solaire de 0,62 à 0,42 permet d'obtenir des réductions d'utilisation de la climatisation efficaces. La demande en refroidissement baisse de 35% à 64% sur l'ensemble des scénarii alors que la demande en chauffage augmente de 7% à 10%. La figure 26 montre l'évolution de la demande de froid par rapport aux résultats de la simulation de base. Durant les premières décennies, la demande en froid baisse fortement avec presque 65% de réduction. Au fil du temps, l'écart entre la demande en refroidissement se réduit jusqu'à atteindre 35% de réduction dans le scénario le moins souhaitable. Il est intéressant de noter que la réduction du facteur solaire permet davantage d'économies d'énergie pour le scénario SSP2-4.5 par rapport aux deux autres à l'horizon 2100, mais que cette tendance est inverse pour les périodes allant de 2001 à 2060.

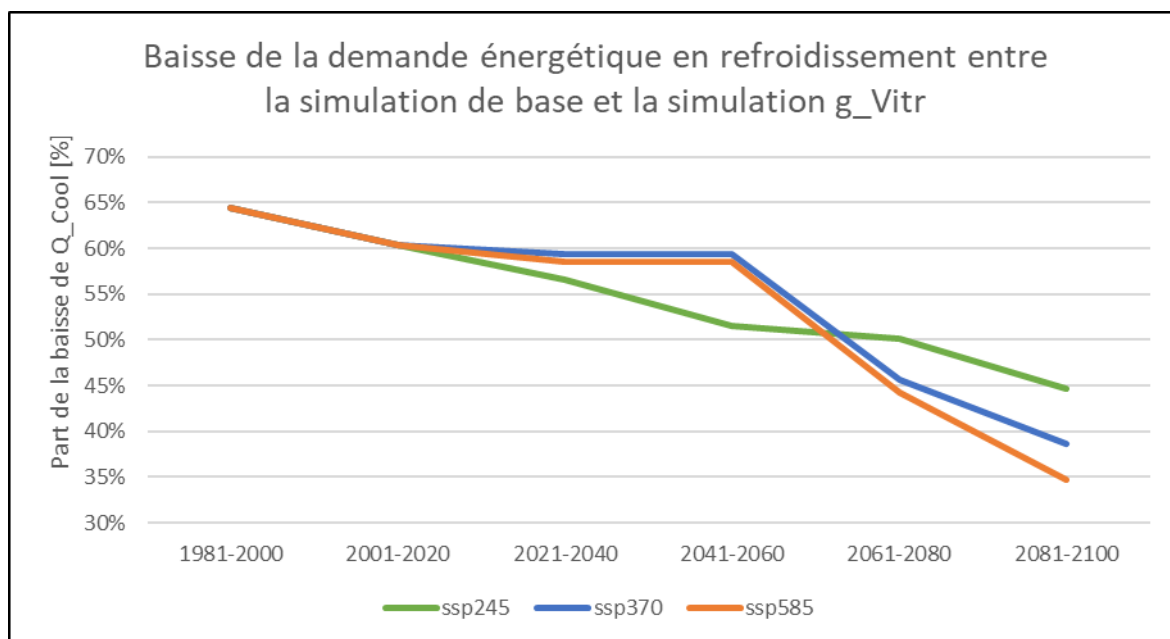


Figure 26 : Evolution de la part de baisse de la demande énergétique de refroidissement pour la simulation baisse du facteur solaire

Les heures où le bâtiment subit de la surchauffe sont également fortement réduites. Cependant, en ce qui concerne le nombre d'heures de surchauffe, si cette solution est comparée à celle des protections solaires automatisées, ces dernières restent en moyenne 2,5 fois plus efficaces que la solution réduction du facteur solaire. Cependant, les vitrages ne risquent pas de subir des défaillances techniques et seul un effondrement de la filière de production risquerait d'empêcher un renouvellement du vitrage en cas de casse. De plus, les occupants n'ont pas spécialement besoin de modifier leurs habitudes puisqu'une fois posé, le verre régule lui-même le flux solaire d'entrée. Il ne faut toutefois pas négliger l'importance du taux de transmission lumineuse qui doit être assez élevé que pour maintenir un confort visuel au sein du bâtiment.

f. Simulations 8 et 9 : Inertie et Inertie_NC

La mise en place de cette solution est celle qui impacte le moins les résultats de la simulation de base. En effet, les résultats obtenus ne réduisent que très peu les demandes énergétiques (1% à 2% maximum) et les heures de surchauffe (4% de réduction maximum). Un point positif est tout de même à mentionner, cette simulation est la seule qui réduit la demande en refroidissement et celle en chauffage en même temps tout en réduisant le nombre d'heures de surchauffe. Les faibles résultats de cette simulation pourraient éventuellement être imputables à l'inertie déjà importante du modèle initial. De fait, les murs extérieurs du rez-de-chaussée sont déjà tous en pierre, le mur orienté est du salon est déjà partiellement enterré et l'ossature du bâtiment est constituée de blocs de béton et de planchers en béton armé. La comparaison avec une simulation de base où le bâtiment est construit en ossature bois donne des résultats légèrement plus convaincants. Pour la première période, le bâtiment permet une baisse de la consommation destinée au rafraîchissement de 17% et une baisse du temps de surchauffe de 19%. Seulement, ces performances semblent se réduire avec l'augmentation des moyennes de températures extérieures. En termes de résilience, l'augmentation de l'inertie thermique se fonde totalement dans le principe. Bien utilisé, l'inertie permet de stocker une partie de l'excédant de chaleur.

g. Simulations 10 et 11 : Ombr_Fixe et Ombr_Fixe_NC

Les simulations d'ombrages fixes sont les troisièmes plus performantes, à quasi-égalité avec l'ombrage apporté par les arbres. Une légère augmentation des besoins en chauffage permet d'économiser en moyenne 25% de la consommation en énergie de refroidissement et de diminuer la surchauffe d'une valeur allant de 46% à 26% ; amenant ainsi le pourcentage de surchauffe durant les heures d'occupation à 12% en moyenne. Comme pour toutes les autres simulations jusqu'à présent, les performances diminuent au fil des périodes et des scénarii. Cette solution adaptative peut être mise en place aisément par un professionnel, rapidement et avec des matériaux locaux. Une solution qui pourrait permettre de limiter l'augmentation de la demande en chauffage serait l'utilisation de protections saisonnières. Les protections ne seraient alors présentes que durant une certaine période de l'année afin de capter un maximum de rayons en hiver.

h. Simulations 12 et 13 : Arbres et Arbres_NC

Les résultats de ces simulations se rapprochent fortement de ceux des simulations précédentes. L'avantage des arbres est qu'ils perdent leur feuillage en hiver, permettant ainsi de profiter des gains solaires hivernaux tout en se protégeant des puissants rayons en été. La plantation d'arbres offre d'autres avantages qui ne peuvent pas être pris en compte lors de simulations TRNSYS. Parmi eux, peuvent être cités le rafraîchissement local de l'air grâce à l'évapotranspiration, la création d'habitats pour de nombreux organismes, la fixation du carbone atmosphérique, la production éventuelle de nourriture, etc. Mais le problème est que ces arbres doivent avoir atteint un certain stade de maturité pour pouvoir fournir un ombrage suffisant. Il faudra sans doute attendre de nombreuses années avant d'obtenir un ombrage suffisant pour atteindre les résultats escomptés. Le second problème vient du fait qu'avec les augmentations des températures, le cycle de feuillage des arbres risque d'être perturbé. La figure 27 illustre les différences de température entre la période 2001-2020 (ligne bleue) et la période 2081-2100 (ligne orange). Si le graphique est analysé sur un plan horizontal, on remarque que les températures entre mars et avril (début du feuillage des arbres) sont atteintes plus rapidement. En fin d'année, les températures habituellement atteintes en septembre le sont en octobre à l'horizon 2100. Ces décalages risquent d'allonger la période de feuillage des arbres. D'ailleurs, des avancées de trois jours par décennie des phénomènes liés au printemps ont eu lieu en région tempérée au cours des cinquante dernières années (63) et un retardement des événements d'automne d'en moyenne un jour et demi par décennie (63) (64). Ces variations n'ont pas été prises en compte lors des simulations de ce travail.

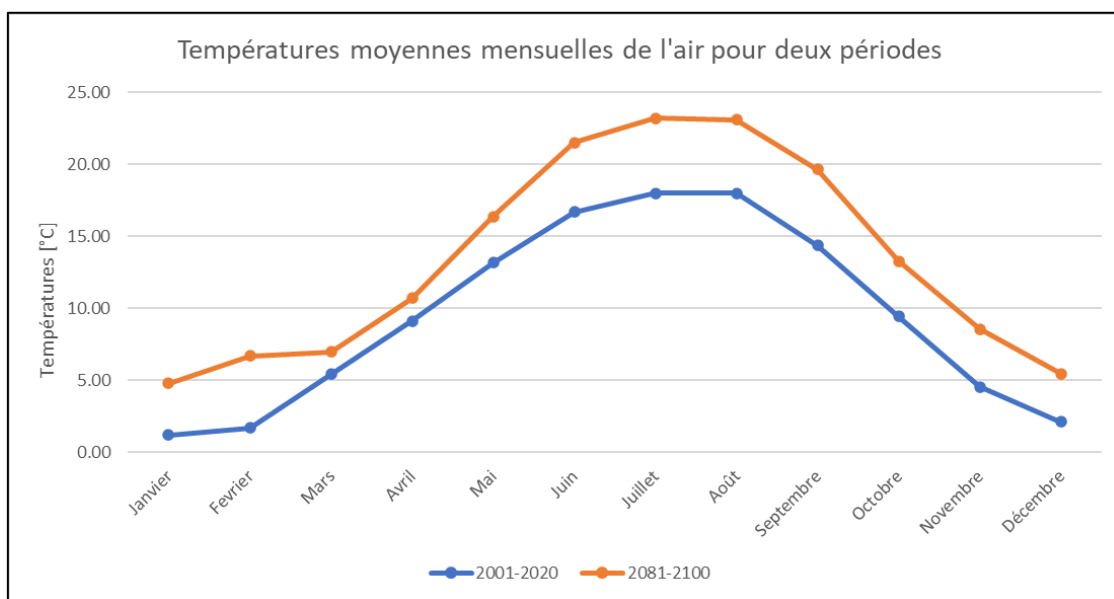


Figure 27 : Evolution des températures moyennes mensuelles de l'air entre la période 2001-2020 et 2081-2100

i. Simulations 14 et 15 : Aer_Noct et Aer_Noct_NC

Les simulations de l'aération nocturne obtiennent à peu près les mêmes résultats que pour l'ombrage fixe et l'ombrage par les arbres. La majorité des heures de surchauffe comptabilisées proviennent de la pièce composée de la cuisine et de la salle à manger et qui est dénommée « REZ » lors des simulations. Cette situation est illustrée sur la figure numéro 28 qui représente le cumul des heures de surchauffe pour le rez-de-chaussée (cuisine et salle à manger), le salon, la mezzanine et les chambres 1 et 2. La simulation donnant ces résultats suit le scénario SSP2-4.5 pour la période 2041-2060. La ligne rouge, représentant le nœud d'air « REZ », domine clairement les données des autres pièces. La deuxième ligne la plus haute est la chambre numéro 2 qui n'a pas de ventilation accrue durant la nuit pour cette simulation. La grande majorité des heures de surchauffe provient donc de la journée. Limiter les gains solaires diurnes grâce à un ombrage pourrait peut-être diminuer les heures de surchauffe du « REZ ».

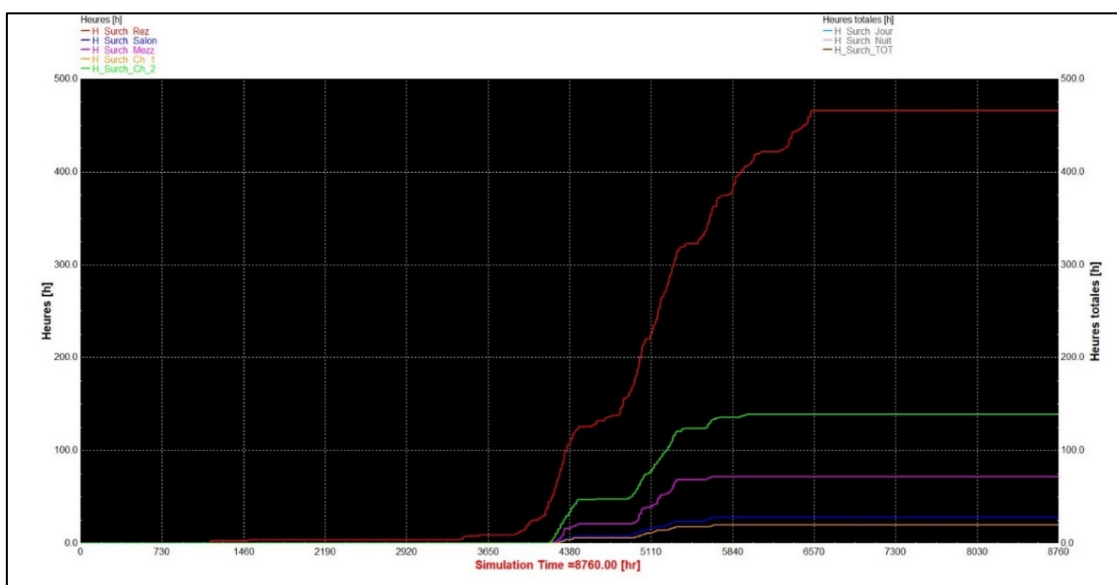


Figure 28 : Evolution annuelle des heures de surchauffe pour la simulation SSP2-4.5 de la période 2041-2060

j. Simulations 16 et 17 : Isol_Plus et Isol_Plus_NC

Les simulations où l'isolant des parois extérieures sont épaissies de 50% n'améliorent que les besoins en chaleur, tous les autres paramètres sont dévalorisés (plus de demande en froid et plus de surchauffe). Fait intéressant, cette solution est la seule dont les performances s'améliorent au fur et à mesure des augmentations de température. Pour exemple, la demande en refroidissement est de 118% par rapport à la simulation initiale pour la simulation de la période 1981-2000, alors qu'elle n'est « plus » que de 105% pour le scénario SSP5-8.5 de la dernière période. Cela signifie que cette solution pourrait être envisagée en cas d'emballement imprévu et supérieur des températures de l'air. Cependant, pour l'heure, cette solution est à exclure des moyens d'atténuation à mettre en œuvre. Quelques simulations tests, où l'épaisseur d'isolant avait été diminuée de 50%, ont été réalisées. Les résultats obtenus ont montré des performances encore moins intéressantes qu'avec l'isolation supplémentaire, autant pour les demandes en chaleur et refroidissement que concernant les heures de surchauffe. La prospective de cette solution s'est donc arrêtée là.

2. Tableau d'indicateurs pour chaque méthode

Le tableau coloré ci-dessous montre une distribution d'indices de plusieurs critères de résilience pour chaque solution testée. La valeur 2 est attribuée pour des réponses ayant un impact positif vis-à-vis du critère, la valeur 1 pour des réponses moyennes et la valeur 0 pour des réponses à impact négatif.

Par exemple pour le critère autonomie d'énergie : la valeur 2 signifie que le système une fois mis en place n'a besoin d'aucun apport d'énergie pour fonctionner ; la réponse 1 pour l'aération nocturne signifie que la simulation a été menée en considérant une consigne d'ouverture ou fermeture automatique selon certaines conditions (à savoir la saison, l'heure, la température moyenne intérieure et la température extérieure) mais cette solution pourrait se faire manuellement, sans dépendance à l'électricité ; la réponse zéro signifie que la solution ne peut se passer d'un apport extérieur d'énergie (ici l'électricité pour les protections solaires automatisées).

Le deuxième critère est la proximité d'approvisionnement des matériaux constituant le système de réduction de la chaleur. Les protections externes nécessitent de nombreux composants tels que les capteurs solaires ou servo-moteurs qui proviennent généralement de l'autre côté du globe. Idem pour l'aération nocturne automatisée, cependant celle-ci peut être aisément remplacée par des mécanismes manuels à ouvrir en été. Il en est de même pour les isolants qui sont constitués de dérivés de pétrole mais qui peuvent aisément être remplacés par des produits nationaux biosourcés.

L'expertise nécessaire reprend la nécessité de disposer d'experts afin de dimensionner, mettre en place et/ou entretenir les installations. Il est évidemment nécessaire de réfléchir adéquatement à la question de comment optimiser l'utilisation de la solution, mais certaines techniques demandent une certaine expertise. Entre autres le calcul d'une surface de vitrage et d'une isolation suffisantes par l'architecte, la pose et l'entretien d'une protection solaire externe automatisée par un professionnel agréé, le montage d'une protection solaire externe fixe par une personne compétente, ...

Vient ensuite la question du coût que la mise en place des solutions engendre. La mise en place de protections automatisées et l'ajout d'isolant augmentent le prix de base du bâtiment. Il en va de même avec l'augmentation de l'inertie et la mise en place d'un ombrage fixe mais cela dépend des matériaux choisis (le béton est un moyen efficace d'augmenter l'inertie à moindre coût et le prix de la protection fixe dépendra de ses matériaux). L'aération nocturne est un cas légèrement à part, si l'aération est automatisée, le coût en sera plus élevé. En revanche si le choix est fait d'ouvrir manuellement chaque soir les fenêtres, le coût est alors nul (hormis d'éventuelles protections contre les intrusions aux fenêtres du rez-de-chaussée). Prévoir une autre disposition de vitrage ou planter un arbre impacte de manière insignifiante le coût total du bâtiment.

Concernant l'impact environnemental de la solution, seule la plantation d'un arbre apporte véritablement un effet bénéfique. Les autres solutions n'y changent rien (position vitrage et aération nocturne manuelle) ou nécessitent l'extraction de matière première (protection solaire et aération nocturne automatisées, augmentation de l'inertie et de l'isolation, montage d'une protection fixe). Cependant, augmenter l'inertie et fabriquer une protection fixe est réalisable à partir de matériaux de récupération.

Le critère de simplicité d'utilisation indique si une tâche doit être réalisée par les occupants. Dans la majorité des cas, la régulation se fait naturellement ou de manière automatisée. Seul le cas où l'aération nocturne se fait de manière manuelle nécessiterait un effort récurrent des habitants.

Le critère de modification du confort pointe les changements que peuvent impliquer la mise en place des solutions : les protections automatisées réduisent la luminosité de l'environnement intérieur ; idem pour le repositionnement du vitrage ainsi que pour l'ombrage fixe et la présence des arbres ; la réduction du facteur solaire et l'augmentation de l'inertie n'impactent pas négativement le confort des occupants ; la présence d'arbres peut impacter la vue sur le paysage ou au contraire l'améliorer ; au vu des simulations, l'augmentation de l'isolation engendre un ressenti de surchauffe plus important, c'est pourquoi son score est de zéro pour ce critère ainsi que le suivant qui désigne la performance de refroidissement du système en place.

Pour ce critère, c'est la pose de protections solaires externes automatisées qui est de loin la plus performante. Les autres solutions ont un impact relativement efficace, hormis la position du vitrage et l'inertie qui ne changent pas grand-chose aux résultats. Attention, l'ensemble des évaluations menées dans ce paragraphe ne concerne que les résultats obtenus spécifiquement via les paramètres définis au cours des simulations de ce travail. Dans d'autres cas, les performances concernant l'inertie ou la position des vitrages pourraient obtenir des résultats bien plus probants que ceux avancés dans cette étude.

Tableau 25 : Indices de résiliences attribués à chaque solution

	1 Prot_Ext	2 Posit_Vitr	3 g_Vitr	4 Inertie	5 Ombr_Fixe	6 Arbres	7 Aer_Noct	8 Isol_Plus
Autonomie énergétique	0	2	2	2	2	2	1	2
Proximité approvisionnement	0	2	1	2	2	2	1	1
Expertise nécessaire	0	0	0	1	1	2	1	0
Coûts économiques	0	2	1	1	1	2	1	0
Impact environnemental	0	1	0	1	1	2	1	0
Simplicité d'utilisation	2	2	2	2	2	2	1	2
Modification du confort	1	1	2	2	1	1	2	0
Performances de refroidissement	2	0	1	0	1	1	1	0

3. Couplage de solutions

L'analyse des résultats montre qu'aucune solution ne se suffit à elle-même pour éliminer totalement le risque de surchauffe et la consommation d'énergie de refroidissement. Par ailleurs, de nombreuses études citent l'intérêt du couplage de plusieurs solutions afin de tendre vers la résilience. La mise en place d'une aération nocturne dans un bâtiment à forte inertie est souvent citée. Les solutions proposées dans cette étude peuvent être séparées en trois grandes catégories : limiter l'entrée des gains solaire à travers le vitrage ; accumuler ou évacuer la chaleur ; protéger des conditions extérieures. La première catégorie peut être scindée en deux groupes. D'un côté les solutions utilisant l'ombrage et de l'autre côté celles qui ne l'utilisent pas. Dès lors les solutions analysées peuvent être réparties comme suit :

- Limiter les rayons :
 - Ombrage : protections solaires externes automatisées ; ombrières fixes ; arbres
 - Autres : positionnement du vitrage ; réduction du facteur solaire
- Accumulation et évacuation :
 - Inertie
 - Aération nocturne
- Protection :
 - Augmentation de l'isolation des parois.

Certains couplages de solutions fonctionnent plus efficacement que d'autres. Il serait, par exemple, non productif de combiner protections externes automatisées et ombrières fixes. En revanche, cumuler ombrage fixe (arbres ou auvent) et aération nocturne avec l'inertie déjà importante du bâtiment de base pourrait fournir de bons résultats. De nombreuses autres pistes pourraient être menées mais cela sort du périmètre de recherche fixé initialement dans le cadre de ce mémoire. Néanmoins, à titre d'exemple, une simulation a été réalisée avec une association entre la solution de réduction du facteur solaire des vitrages et le placement d'un ombrage fixe. Cette simulation a été menée selon les pires conditions climatiques possibles, à savoir le scénario SSP5-8.5 à l'horizon 2100. Dans le tableau 26, la deuxième ligne donne les résultats précédemment obtenus pour la réduction du facteur solaire. La suivante donne les résultats précédemment obtenus pour la simulation de l'ombrage fixe. La dernière ligne du tableau annonce les résultats lorsque ces deux solutions sont assemblées. Cette association accentue les besoins en chauffage de 2% et 9% respectivement pour la simulation facteur solaire et ombrage fixe. En revanche, les besoins en refroidissement baissent de 15% et 33% (resp. pour g_Vitr et Ombr_Fixe) et enfin la surchauffe baisse de 37% et 52% (resp. pour g_Vitr et Ombr_Fixe). Coupler différentes solutions au sein d'un même bâtiment a donc le potentiel de découpler les effets recherchés.

Tableau 26 : Résultats couplage simulations réduction du facteur solaire et Ombrage fixe

2081-2100 SSP5-8.5	S_QHEAT [kWh/an]	S_QCOOL [kWh/an]	Heures Surchauffe
g_Vitr	10905	3858	795
Ombr_Fixe	10278	4922	1041
g_Vitr + Ombr_Fixe	11175	3276	504

4. Critique des résultats

Les résultats apportés au terme de ces nombreuses simulations n'offrent pas une vision de l'avenir inéluctable. Tout d'abord, les conditions météorologiques futures utilisées ne sont qu'un modèle parmi d'autres et n'ont pas la prétention de prédire avec exactitude le climat de demain. De plus, les résultats obtenus pour ce bâtiment dépendent de nombreuses libertés qui ont été prises et bien que la modélisation réalisée tende le plus possible vers un réel plausible, il n'est absolument pas affirmé que les réactions réelles du bâtiment ainsi que de ses occupants fourniront des résultats semblables à ceux obtenus (notamment en termes de chauffage, refroidissement, gains internes, ventilation, etc.). Et ce n'était de toute façon pas le but de ce travail. Le but était de vérifier, à partir de conditions initiales similaires, comment chaque solution allait influencer les résultats. La paramétrisation de ces solutions pourrait d'ailleurs probablement être améliorée. Par exemple, une recherche de l'intensité lumineuse optimale

pour l'activation des protections solaires automatisées pourrait être réalisée. Différentes valeurs du facteur solaire des vitres pourraient être testées ainsi que l'isolation de ces dernières. Des simulations représentant des ombrières saisonnières auraient éventuellement permis de diminuer de quelques kilowattheures la demande en chauffage. Enfin, l'utilisation de TRNFLOW aurait permis de modéliser plus précisément les flux d'air au sein du bâtiment.

XII. Discussion

Cette étude considère l'augmentation des températures moyennes de l'air pour des années météorologiques typiques comme évènement perturbateur. Un bâtiment résidentiel standard dépourvu de protections solaires est initialement simulé afin d'observer les évolutions des consommations énergétiques destinées au confort thermique du bâtiment ainsi qu'au nombre d'heures annuelles de surchauffe répertoriées au sein de ce même bâtiment. Différentes solutions passives de réduction de la surchauffe sont testées une à une. Pour chacune de ces solutions la variation de la demande énergétique et la variation du temps de surchauffe sont relevées.

1. Évolution de la demande énergétique

La simulation de base ainsi que celles reprenant les solutions d'atténuation montrent une variation considérable de la balance entre la demande en chauffage et celle en refroidissement. Pour l'état initial, entre les années 1981 et 2100 et considérant le pire scénario, la demande en chauffage passe de 11 fois la demande en froid, à seulement environ 2 fois celle-ci. En revanche, si c'est le scénario de la décroissance qui est considéré, la demande en chauffage est toujours presque 5 fois supérieure à la demande en refroidissement. La figure 29 montre bien l'évolution des résultats en fonction du scénario suivi. Dans le premier scénario (SSP2-4.5, en haut à gauche), la demande en chaleur (ligne rouge) est bien supérieure à la demande en refroidissement (ligne bleue) et ce même en 2100. La surchauffe (ligne jaune) double pratiquement. Pour le scénario SSP3-7.0 (en haut à droite), l'écart entre les demandes énergétiques diminue légèrement et la surchauffe augmente sensiblement à partir de 2041. Enfin, le scénario SSP5-8.5 (graphique du bas) voit l'écart entre la demande en chaud et en froid se réduire considérablement alors que la surchauffe croît de manière impressionnante. Les résultats de ces simulations coïncident avec ceux retrouvés dans la littérature.

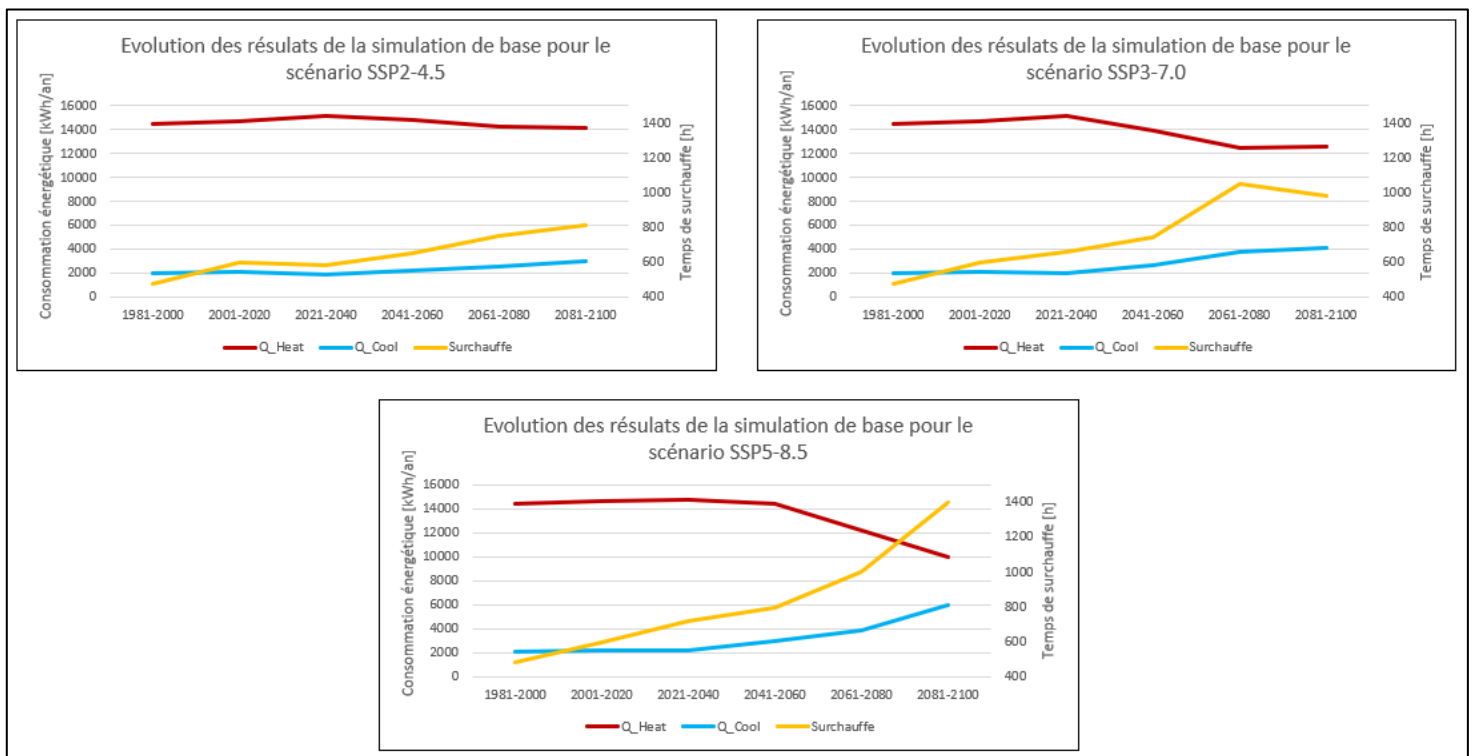


Figure 29 : Evolution des résultats de la simulation de base par scénario

2. Efficacité des solutions testées

Les huit solutions testées dans ce travail offrent pour certaines des réductions de la demande en froid intéressantes. C'est notamment le cas pour la pose de protections solaires externes automatisées. Les solutions : réduction du facteur solaire, pose d'un ombrage fixe, plantation d'arbres et aération nocturne offrent des performances non négligeables dans la recherche de réduction des dépenses énergétiques. Cependant, tous ces systèmes ne peuvent remplacer l'utilisation d'un système de conditionnement de l'air actif. Cette dépendance est d'ailleurs bien illustrée dans la comparaison des deux figures suivantes qui donnent la part du temps d'occupation du bâtiment où la surchauffe se fait ressentir. La première figure (numéro 30) montre cette évolution pour chaque type de simulation lorsque le refroidissement actif est activé. Les lignes les plus basses indiquent des temps de surchauffe plus réduits, donc une meilleure efficacité. Cette figure est à comparer avec la figure numéro 31 qui représente les mêmes simulations mais lorsque le refroidissement actif est désactivé. L'échelle des ordonnées identique pour les deux figures permet de rapidement visualiser l'ajout massif d'heures de surchauffe pour chacune des simulations.

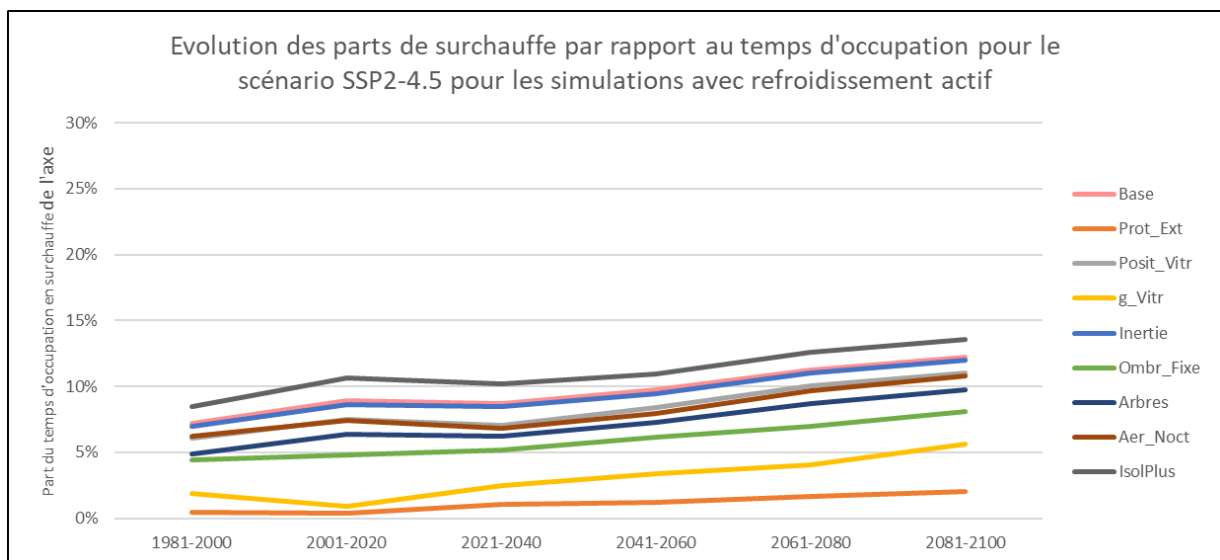


Figure 30 : Evolution de la surchauffe pour chaque type de solution avec refroidissement actif suivant le scénario SSP2-4.5

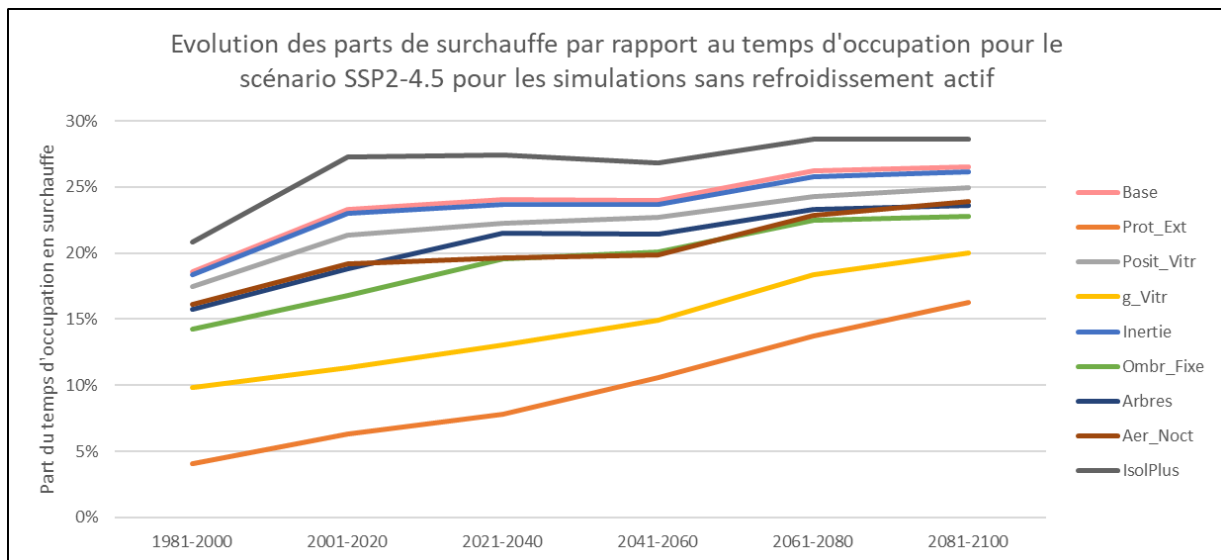


Figure 31 : Evolution de la surchauffe pour chaque type de solution sans refroidissement actif suivant le scénario SSP2-4.5

3. Résiliences des solutions analysées

Les résultats montrent que les solutions proposées ne permettent pas de rendre à elles seules le bâtiment résilient face aux élévations de température. En reprenant les quatre phases de la résilience développées au point « VIII.3. Résilience », on remarque que les solutions proposées agissent principalement dans les phases de « résistance » et de « robustesse » en limitant l'impact induit par les vagues de chaleur. Seule la solution mettant en place l'aération nocturne permet d'agir sur la phase de « recouvrement » en éliminant la chaleur résiduelle à la suite de températures élevées. Cependant, les solutions proposées entrent dans une démarche de résilience grâce à plusieurs points variant selon le type de solution. L'aspect passif permet aux systèmes mis en place d'agir de manière autonome même en cas de coupure de courant. En effet, même les deux solutions utilisant des procédés d'automatisation peuvent être opérationnelles en cas de coupure de courant si cette option est prévue lors de l'installation. Il est aisé d'ouvrir une fenêtre ou de baisser un store manuellement. Les performances en seront peut-être légèrement réduites mais l'effet attendu restera tout de même bel et bien présent. Cette opérationnalité face aux coupures de courant est une qualité fréquemment recherchée dans la littérature scientifique.

Un autre aspect résilient est la disponibilité des ressources à proximité du lieu d'utilisation. Augmenter l'inertie, fabriquer un ombrage fixe ou planter un arbre sont autant de solutions réalisables à partir d'éléments disponibles dans les environs du bâtiment. De plus, leur mise en place ne nécessite pas une longue chaîne de production faisant transiter les matières premières d'un continent à l'autre avant l'installation du produit final.

Les systèmes analysés sont également facilement réparables. Il est en effet plus facile de réparer un ombrage fixe, une fenêtre ou un store automatique que dans des systèmes complexes telle qu'une pompe à chaleur réversible ou une installation de climatisation de l'air.

L'ensemble de ces solutions s'intégreront donc très naturellement dans une stratégie de résilience thermique du bâtiment puisque celle-ci est par essence, un ensemble de méthodes, techniques et comportements qui permettent au bâtiment de faire face aux aléas. Le couplage de plusieurs techniques est donc nécessaire à l'optimisation de la résilience en vue, non seulement de multiplier les effets de réduction, mais également de ne pas dépendre d'un seul système de protection. Les associations de systèmes de protection peuvent être multiples dans le cas des fortes chaleurs. Il y a déjà les solutions présentées dans ce travail qui peuvent certainement s'additionner pour améliorer les performances. Ces

méthodes peuvent également être couplées à un refroidissement actif comme c'est le cas pour la moitié des simulations du présent travail. De nombreuses possibilités de système de refroidissement actif sont disponibles sur le marché et des études de la résilience de certains d'entre eux ont déjà été réalisées, notamment dans deux articles cités précédemment (33) (38) (50). Toutes ces méthodes peuvent être également couplées à toute une série de systèmes passifs ou non d'atténuation de la surchauffe tels que : les matériaux à changement de phase, les puits canadiens, le refroidissement par éco-évaporation, l'utilisation d'une pièce refuge (par exemple le garage pour ce cas d'étude), la végétalisation des surfaces, les vitrages intelligents, etc. Les possibilités sont abondantes et méritent d'être approfondies.

Pour finir, il est bon de mentionner le rôle crucial du comportement des occupants pour atteindre la résilience thermique du bâtiment. En effet, sans une sensibilisation au phénomène de surchauffe et aux comportements adéquats à adopter par les habitants en cas de choc, il est impossible d'atteindre l'état de résilience.

XIII. Conclusion

Au travers de ces 250 simulations, ce travail a su démontrer les performances et les limites de huit systèmes de réduction de la surchauffe. La baisse de la demande en chauffage et l'augmentation effrénée de la demande en refroidissement annoncées dans la littérature scientifique ont été rejointes. De plus, les éléments permettant au bâtiment de tendre vers un processus résilient ont été exposés. Il en est ressorti la nécessité de découpler les systèmes de protection contre les fortes chaleurs tout en adoptant les comportements adéquats. Enfin, il semble important de continuer à chercher l'équilibre entre méthodes passives et actives afin de permettre aux bâtiments d'assurer un confort thermique acceptable tout en limitant les rejets de gaz à effet de serre dans un futur climatique incertain et qui dépend essentiellement des décisions que prendra l'Humanité dans les prochaines années.

XIV. Bibliographie

1. **European Commission.** *Communication from the commission to the European Parlement, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives.* 2020. p. 1. SWD(2020) 550 final.
2. *Analyse de cycle de vie d'un bâtiment.* **Maxime Trocmé, Bruno Peuportier.** 2008, J3eA, Vol. 7.
3. **Carl Grekou, Emmanuel Hache, Frédéric Lantz, Olivier Massol, Valérie Mignon, Lionel Ragot.** *Guerre en Ukraine : bouleversements et défis énergétiques en Europe.* Policy Brief, Centre d'Etudes Prospectives et d'Informations Internationales. 2022.
4. **McAllister, Therese.** *Developing Guidelines and Standards for Disaster Resilience of the Built Environment: A Research Needs Assessment.* U.S. Department of Commerce National Institute of Standards and Technology. 2013.
5. *Resilient cooling of buildings to protect against heat waves and power outages: Key concepts and definition.* **Shady Attia, Ronnen Levinson, Eileen Ndongo, Peter Holzer, Ongun Berk Kazanci, Shabnam Homaei, Chen Zhang, Bjarne W. Olesen, Dahai Qi, Mohamed Hamdy, Per Heiselberg.** May 2021, Energy Buildings, Vol. 239. 110869.
6. **Commission européenne.** La facilité pour la reprise et la résilience. *Commission européenne.* [En ligne] [Citation : 16 08 2023.] https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility_fr.
7. **Maud Hallin, Pierard Aurélie, Lamarque Pénélope, Mancilla Garcia Maria, Gemenne François.** Congrès Résilience : Anticiper et s'adapter pour notre futur. *La résilience de la Wallonie face aux risques environnementaux: Le rôle des observatoires. Note de synthèse et de recommandations.* Namur, Belgique : s.n., 02 12 2022.
8. **IPCC.** *Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6) Longer report.* 19 Mars 2023. p. 6.
9. **Working Groupe I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** *Figure SPM1 in IPCC 2021: Summary for Policymakers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* p. 596.
10. **IPCC.** *Synthesis report of the IPCC sixth assessment report - Summary for Policymakers.* p. 4.
11. **IPCC Working Group I.** *Climate Change 2021 The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* 2021. pp. 8-230-596-2245-2248-2253.
12. **Vailles, Charlotte.** D'où viennent les cinq nouveaux scénarios du GIEC ? *I4CE Institute for climate economics.* [En ligne] 14 september 2021. [Citation : 12 05 2023.] <https://www.i4ce.org/douviennent-les-cinq-nouveaux-scenarios-du-giec-climat/>.
13. *The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview.* **Keywan Riahi, Detlef P. van Vuuren, Elmar Kriegler, Jae Edmonds, Brian C. O'Neill, Shinichiro Fujimori, Nico Bauer, Katherine Calvin, Rob Dellink, Oliver Fricko, Wolfgang Lutz, Alexander Popp, Jesus Crespo Cuaresma, Samir KC, Marian Leimbach, Leiwen Jiang.** 1 February 2017, Global Environmental Change, Vol. 42, pp. 153-168.
14. *The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century.* **Brian C. O'Neill, Elmar Kriegler, Kristie L. Ebi, Eric Kemp-Benedict, Keywan**

- Riahi, Dale S. Rothman, Bas J. van Ruijven, Detlef P. van Vuuren, Joern Birkmann, Kasper Kok, Marc Levy, William Solecki.** 1 February 2017, *Global ENvironmental Change*, Vol. 42, pp. 169-180.
15. **Koen De Ridder, Koen Couderé, Mathieu Depoorter, Inge Liekens, Xavier Pourria, David Steinmetz, Eline Vanuytrecht, Katelijne Verhaegen, Hendrik Wouters.** *Evaluation de l'impact socio-economique du changement climatique en Belgique.* 2020.
16. **Minne, Geneviève.** Effets du changement climatique et gestion des risques de production en Wallonie. *CRA-Wallonie.* [En ligne] 09 Mars 2020. [Citation : 02 06 2023.] <https://www.cra.wallonie.be/fr/effets-changement-climatique-gestion-risques-production-wallonie#>.
17. **SPW Territoire, Logement, Patrimoine et Energie, Institut de conseils et d'études en développement durable (ICEDD), IWEPS.** Consommation d'énergie par secteur/vecteur. *Iweps.* [En ligne] 01 06 2023. [Citation : 15 07 2023.]
18. *Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade.* **Xiaodong Cao, Xilei Dai, Junjie Liu.** 128, 29 June 2016, *Energy and BUildings.* 198-213.
19. **Prevedello Cédric (AQUAWAL), Kryvobokov Marko (CEHD), Lemaire Emilie (CEHD), Pradella Sébastien (CEHD).** *Etude sur les consommations résidentielles d'eau et d'énergie en Wallonie - Projet de rapport final.* 2015. p. 85.
20. **SPW.** Consommation résidentielle d'énergie. *Etat de l'environnement wallon.* [En ligne] 10 Janvier 2018. [Citation : 02 06 2023.] <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/MEN%20Focus%201.html#:~:text=La%20part%20de%20la%20consommation,ensemble%20de%20l'%C3%A9nergie%20consomm%C3%A9e..>
21. **SPW .** La réglementation wallonne - PEB. *Wallonie énergie SPW.* [En ligne] [Citation : 23 07 2023.] <https://energie.wallonie.be/fr/reglementation-wallonne-sur-la-peb.html?IDC=7224>.
22. **SPW.** Directives européennes en matière de performance énergétique des bâtiments. *Wallonie énergie.* [En ligne] [Citation : 23 07 2023.] <https://energie.wallonie.be/fr/directives-europeennes-en-matiere-de-performance-energetique-des-batiments.html?IDD=97287&IDC=7224>.
23. —. Nouvelles constructions : des bâtiments Quasi Zéro Energie (Q-ZEN) dès 2021 ! *Wallonie énergie.* [En ligne] [Citation : 08 06 2023.] <https://energie.wallonie.be/fr/q-zen.html?IDC=8729>.
24. **Chatain, Baptiste.** Performance énergétique des bâtiments : neutralité climatique d'ici 2050. *Actualité Parlement européen.* [En ligne] 09 02 2023. [Citation : 08 06 2023.] <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/press-room/20230206IPR72112/performance-energetique-des-batiments-neutralite-climatique-d-ici-2050>.
25. **Institut de conseils et d'étude en développement durable (ICEDD).** *Bilan énergétique de la Wallonie 2019 - Bilan du secteur domestique et équivalents.* 2022. p. 46.
26. **ECMWF.** ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). *ECMWF.* [En ligne] [Citation : 17 05 2023.] <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>.
27. **Copernicus.** A propos de Copernicus. *Copernicus.* [En ligne] [Citation : 17 05 2023.] <https://www.copernicus.eu/fr/propos-de-copernicus>.
28. **Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** *Figure 4.19 in IPCC, 2021: Chapter 4. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* 2021.

29. **Kittel, Christoph.** *Present and future sensitivity of the Antarctic surface mass balance to oceanic and atmospheric forcings: insights with the regional climate model MAR.* University of Liège, Faculté des Sciences, Département de Géographie, Unité de recherches SPHERES, Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie. 2021. p. 24.
30. *Historical and future weather data for dynamic building simulations in Belgium using the regional climate model MAR: typical and extreme meteorological year and heatwaves.* **Sébastien Doutreloup, Xavier Fettweis, Ramin Rahif, Essam Elnagar, Mohsen S. Pourkiaei, Deepak Amaripadath, Shady Attia.** 14, s.l. : Copernicus Publications, 2022, Earth System Science Data, pp. 3039-3051.
31. *La démographie de l'Afrique subsaharienne au XXI siècle. Bilan des changements de 2000 à 2020, perspectives et défis d'ici 2050.* **Dominique Tabutin, Bruno Schoumaker.** s.l. : INED EDITIONS, 2020, Population, Vol. 75, p. 169 à 295.
32. *Impact of climate change on the design of energy efficient residential building envelopes.* **Mahsa Karimpour, Martin Belusko, Ke Xing, John Boland, Frank Bruno.** [éd.] Elsevier. January 2015, Energy and buildings, Vol. 87, pp. 142-154.
33. *Active and passive cooling methods for dwellings: A review.* **Ivan Oropeza-Perez, Poul Alberg Østergaard.** February 2018, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, pp. 531-544.
34. *The impact of climate change on building heat demand in different climate types.* **I. Andrić, André Pina, Paulo Ferrão, Jérémy Fournier, Bruno Lacarrière, Olivier Le Corre.** s.l. : Elsevier, August 2017, Energy and buildings, Vol. 149, pp. 225-234.
35. *Climate change impacts on trends and extremes in future heating and cooling demands over Europe.* **M.A.D. Larsen, S. Petrović, A.M. Radoszynski, R. McKenna, O. Balyk.** s.l. : Elsevier, November 2020, Energy and Buildings, Vol. 226, pp. 1-14. 110397.
36. *Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change.* **Morna Isaac, Detlef P. van Vuuren.** 37, 13 November 2008, Energy Policy, pp. 507-521.
37. *Residential indoor thermal environment investigation and analysis on energy saving of air conditioning in hot summer and warm winter zone in China.* **Meinan Wang, Qingqing Li, Feng Wang, Zhaojing Yuan, Liang Wang, Xiaolong Zhou.** 47, 2 December 2022, Urban Climate.
38. *A qualitative assessment of integrated active cooling systems: A review with a focus on system flexibility and climate resilience.* **Essam Elnagar, Alanis Zeoli, Ramin Rahif, Shady Attia, Vincent Lemort.** April 2023, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 175. 113179.
39. **Pauline Abrahams, Grégoire Botquin, Philippe André.** 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. *Evaluation of the flexibility potential of buildings in the Greater Region to contribute to the management of the grid: study case for two reference buildings in Belgium.* Guimarães, Portugal : s.n., 17-22 June 2018.
40. **Tisseron, Serge.** *La résilience.* [éd.] Presses Universitaires de France. Sixième édition. Paris : s.n., 2017. pp. 11-16.
41. *La résilience : un concept pour la gestion des risques.* **André Dauphiné, Damien Provitolo.** [éd.] Armand Colin. 654, 2007, Annales de géographie, pp. 115-125.
42. *La résilience - Un regard qui fait vivre.* **Manciaux, Michel.** [éd.] S.E.R. Octobre 2001, Etudes - Revue de culture contemporaine, Vol. 395, pp. 321-330.
43. *Resilience and Stability of Ecological Systems.* **Holling, C S.** 1973, Annual Review of Ecology and Systematics, Vol. 4, pp. 1-23.

44. *On the notion of regional economic resilience: conceptualization and explanation.* **Ron Martin, Peter Sunley.** January 2015, *Journal of Economic Geography*, Vol. 15, pp. 1-42.
45. **Holling, C. S.** *Engineering Resilience versus Ecological Resilience.* 1996.
46. **IPCC Working Group II.** *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* p. 2921.
47. *Defining urban resilience: A review.* **Sara Meerow, Joshua P. Newell, Melissa Stults.** s.l. : Elsevier, 2016, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 147, pp. 38-49.
48. *Thermal resilient buildings: How to be quantified? A novel benchmarking framework and labelling metric.* **Shabnam Homaei, Mohamed Hamdy.** 15 August 2021, *Building and Environment*, Vol. 201.
49. *Simulation-based framework to evaluate resistivity of cooling strategies in buildings against overheating impact of climate change.* **R. Rahif, M. Hamdy, S. Homaei, C. Zhang, P. Holzer, S. Attia.** 15 January 2022, *Building and Environment*, Vol. 208.
50. *Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment.* **Chen Zhang, Ongun Berk Kazanci, Ronnen Levinson, Per Heiselberg, Bjarne W. Olesen, Giacomo Chiesa, Behzad Sodagar, Zhengtao Ai, Stephen Selkowitz, Michele Zinzi, Ardeshir Mahdavi, Helene Teufl, Maria Kolokotroni, Agnese Salvati, Emmanuel Bozonnet and all.** 15 November 2021, *Energy and Buildings*, Vol. 251.
51. **Cerema.** La boussole de la résilience : quels enjeux, quelle stratégie pour mon territoire ? *Cerema.* [En ligne] 14 10 2020. [Citation : 12 06 2023.] <https://www.cerema.fr/fr/actualites/boussole-resilience-quels-enjeux-quelle-strategie-mon>.
52. **Service Public Wallon.** Guide PEB 2018 / 09-Etanchéité à l'air. *Energie Wallonie.* [En ligne] 08 07 2019. [Citation : 29 05 2023.] https://energie.wallonie.be/fr/09-02-difference-entre-v-50-v-50-et-n50.html?IDC_PEB=9652&IDD=136669&IDC=9808.
53. **Jean-Marie Hauglustaine, Francy Simon.** *La ventilation et l'énergie - Guide pratique pour les architectes.* 2018. p. 15.
54. **Energie +.** Choisir les corps de chauffe. *Energie plus le site.* [En ligne] [Citation : 26 05 2023.] <https://energieplus-lesite.be/concevoir/chauffage/choisir-le-chauffage-central-a-eau-chaude/choisir-les-corps-de-chauffe/>.
55. **Roulet, Claude-Alain.** *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments.* 2e édition mise à jour et complétée. s.l. : Presses polytechniques et universitaires Romandes, 2010. pp. 91-92.
56. **TRNSYS18, Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison, TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Thermal Energy Systems Specialists.** TRNSYS 18 a TRaNsient SYstem Simulation program. Madison, U.S.A. : s.n., February 2018. pp. 1-6.
57. **Gouvernement Wallon.** Arrêté du Gouvernement wallon déterminant les critères minimaux de salubrité, les critères de surpeuplement et portant les définitions visées à l'article 1er, 19° à 22° bis, du Code wallon (de l'habitation durable - AGW du 3 décembre 2020, art.1er). 30 August 2007. p. 10.
58. **Energie Plus Le Site.** Glossaire. *Energie+.* [En ligne] 2021. [Citation : 26 07 2023.] <https://energieplus-lesite.be/glossary/>.
59. **Le Robert.** azimut. *LeRobert dico en ligne.* [En ligne] [Citation : 02 08 2023.] <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/azimut>.

60. Outils pour les consommateurs et les concepteurs de l'énergie solaire. *SunEarthTools.com*. [En ligne] [Citation : 07 28 2023.] https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=fr#top.
61. Energie Plus. Evaluer l'efficacité de la production frigorifique. *energie plus le site*. [En ligne] [Citation : 02 08 2023.] <https://energieplus-lesite.be/evaluer/climatisation5/evaluer-l-efficacite-de-la-production-frigorifique/>.
62. Parlement européen. Paquet législatif sur les semi-conducteurs : le plan de l'UE pour lutter contre la pénurie de semi-conducteurs. *Actualité Parlement européen*. [En ligne] 11 07 2023. [Citation : 18 08 2023.] <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20230210STO74502/plan-de-l-ue-pour-surmonter-la-penurie-de-semi-conducteurs>.
63. Legay, Myriam. *Effets attendus du changement climatique sur l'arbre et la forêt*. ONF. 2014. p. 41.
64. *Changes in leaf phenology of three European oak species in response to experimental climate change*. Isabelle Chuine, Xavier Morin, Jacques Roy. June 2010, New Phytologist.
65. SPW. Guide PEB 2015 - 07.06 Facteur solaire g. *Energie Wallonie*. [En ligne] 16 20 2016. [Citation : 20 08 2023.] https://energie.wallonie.be/fr/07-06-facteur-solaire-g.html?IDC_PEB=9491&IDD=113659&IDC=9094.
66. David Calson, Veronika Eyring. L'apport du Projet de comparaison de modèles couplés à la science du climat. *Organisation météorologique mondiale*. [En ligne] 2016. [Citation : 23 05 2023.] <https://public.wmo.int/fr/ressources/bulletin/l%E2%80%99apport-du-projet-de-comparaison-de-mod%C3%A8les-coupl%C3%A9s-%C3%A0-la-science-du-climat#:~:text=En%20r%C3%A9sum%C3%A9,cibl%C3%A9e%2C%20dans%20le%20monde%20scientifique..>

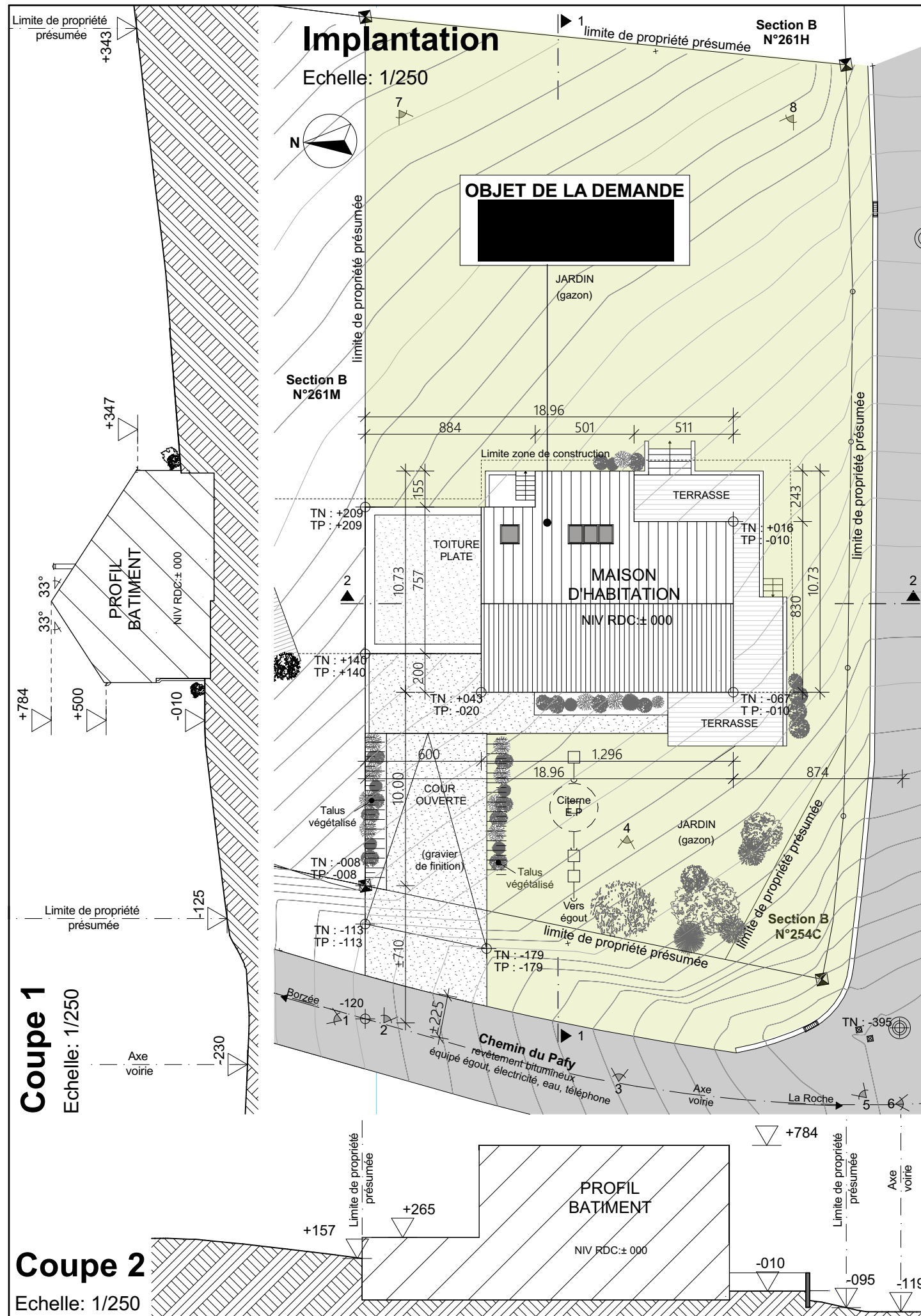
XV. Glossaire

- Facteur solaire : Le facteur solaire g , anciennement dénommé FS, est le rapport entre l'énergie solaire entrant dans un local à travers un vitrage et l'énergie solaire incidente. Il s'exprime en %. L'énergie qui aboutit à l'intérieur est la somme de l'énergie entrant par transmission directe, et de l'énergie cédée par le vitrage à l'ambiance intérieure à la suite de son échauffement. Pour une même surface, plus le facteur solaire g sera grand, plus les apports de chaleur solaire seront importants (65).
- Forçage radiatif : Variation du flux radiatif net, descendant moins ascendant (exprimé en W/m^2), due à une variation d'un facteur externe de changement climatique, tel qu'une variation de la concentration de dioxyde de carbone (CO_2), de la concentration d'aérosols volcaniques ou de la puissance du soleil. Le forçage radiatif ajusté à la stratosphère est calculé avec toutes les propriétés troposphériques maintenues à leurs valeurs non perturbées, et après avoir pris en compte les températures stratosphériques, si elles sont perturbées, pour se réajuster à l'équilibre radiatif-dynamique. Le forçage radiatif est dit instantané si aucun changement de la température stratosphérique n'est pris en compte. Le forçage radiatif une fois stratosphérique et troposphérique est appelé forçage radiatif effectif (11).
- Îlot de chaleur urbain : Chaleur relative d'une ville par rapport aux zones rurales environnantes, associée au piégeage de la chaleur dû à l'exposition à la chaleur par rapport aux zones rurales environnantes, associée au piégeage de la chaleur en raison la proximité de grands bâtiments, des propriétés d'absorption de la chaleur des matériaux de construction urbains, d'une ventilation réduite et de la chaleur générée directement par les activités humaines (11).
- Température moyenne globale de l'air en surface : (GSAT) Moyenne mondiale des températures de l'air près de la surfaces des terres, des océans et des glaciers (11).
- Température moyenne globale de surface : (GMST) Moyenne mondiale estimée des températures de l'air à proximité de la surface des terres, des glaciers et de la surfaces de mers dans les régions océaniques libres. Les changements sont normalement exprimés sous forme d'écarts par rapport à une valeur au cours d'une période de référence donnée (11).
- Température opérative : Moyenne pondérée de la température de l'air et de la température radiante (55).
- Température radiante : Moyenne en un endroit d'une pièce qui a plusieurs surfaces à différentes températures est la température homogène qu'aurait une pièce imaginaire dans laquelle le rayonnement reçu à cet endroit serait le même que dans la pièce réelle (55).

XVI. Annexes

1. Annexe 1 : Plans de la maison d'habitation
2. Annexe 2 : Rapport PEB
3. Annexe 3 : Etude de Faisabilité technique, environnementale et économique

ANNEXE 1 : PLANS DE LA MAISON D'HABITATION



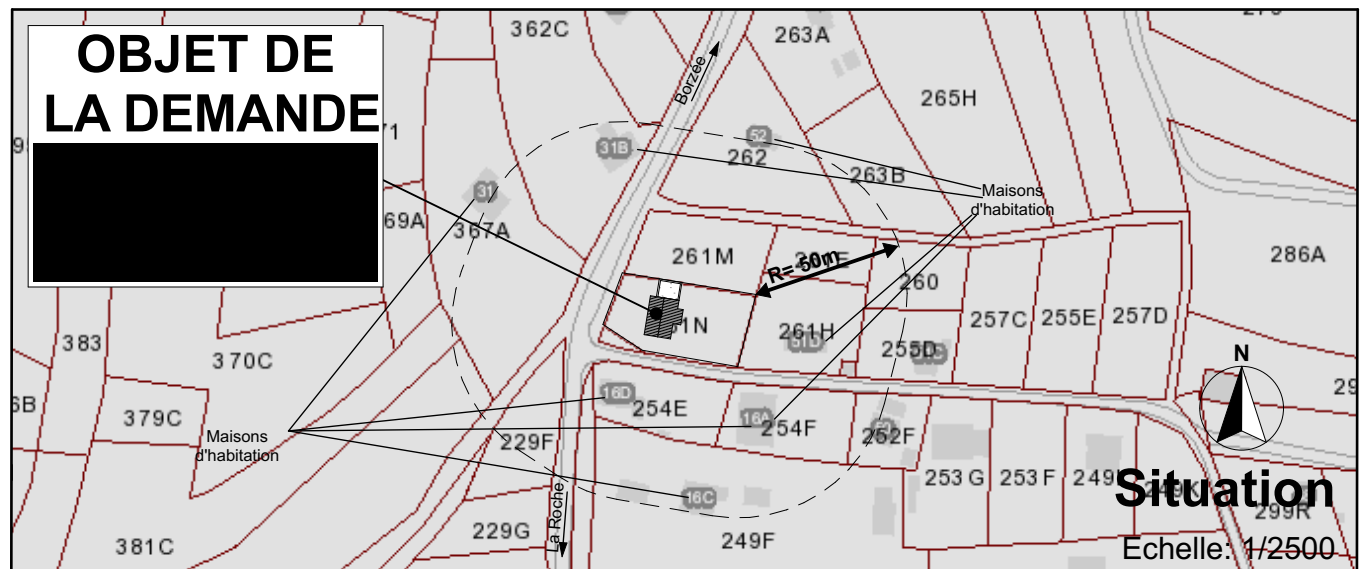
PROVINCE : [REDACTED]

COMMUNE : [REDACTED]

AR01
29/09/2022

CONSTRUCTION D'UNE MAISON D'HABITATION
DEMANDE DE PERMIS D'URBANISME

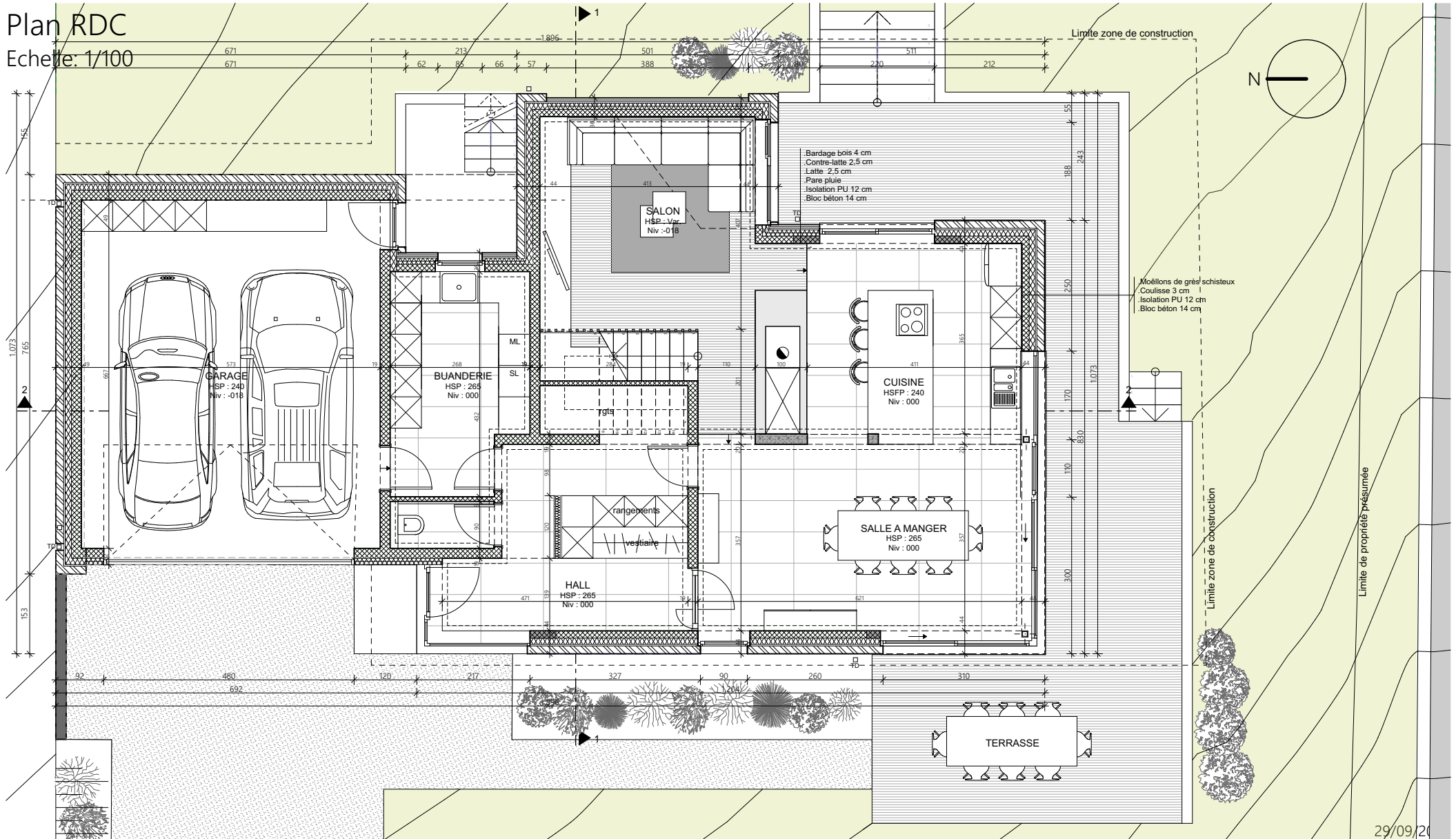
DEMANDEURS	[REDACTED]
SITUATION PROJET	[REDACTED]
ARCHITECTE	PIERRE LEGNIERE INGENIEUR ARCHITECTE Rue de la Palette, 1 - 6980 LA ROCHE-EN-ARDENNE Gsm : 0493 / 13 18 93 Mail : pierre@pl-architecture.be



L'ENTREPRENEUR EST TENU DE FAIRE DESSINER ET CALCULER TOUS LES OUVRAGES DE STRUCTURE EN ACIER, EN BOIS, EN BETON ARME OU EN ELEMENTS DE BETON PREFABRIQUES PAR UN INGENIEUR SPECIALISE. LES RENSEIGNEMENTS REPRIS SUR CE PLAN N'ETANT DONNES QU'A TITRE INDICATIF. LES COTES SERONT VERIFIEES PAR L'ENTREPRENEUR AVANT EXECUTION ET NE SERONT JAMAIS REPRISES A L'ECHELLE SUR LES PLANS. CE PLAN RESTE LA PROPRIETE DU BUREAU D'ARCHITECTURE ET NE PEUT ETRE DIVULGUE SANS L'AUTORISATION DE CE DERNIER

Plan RDC

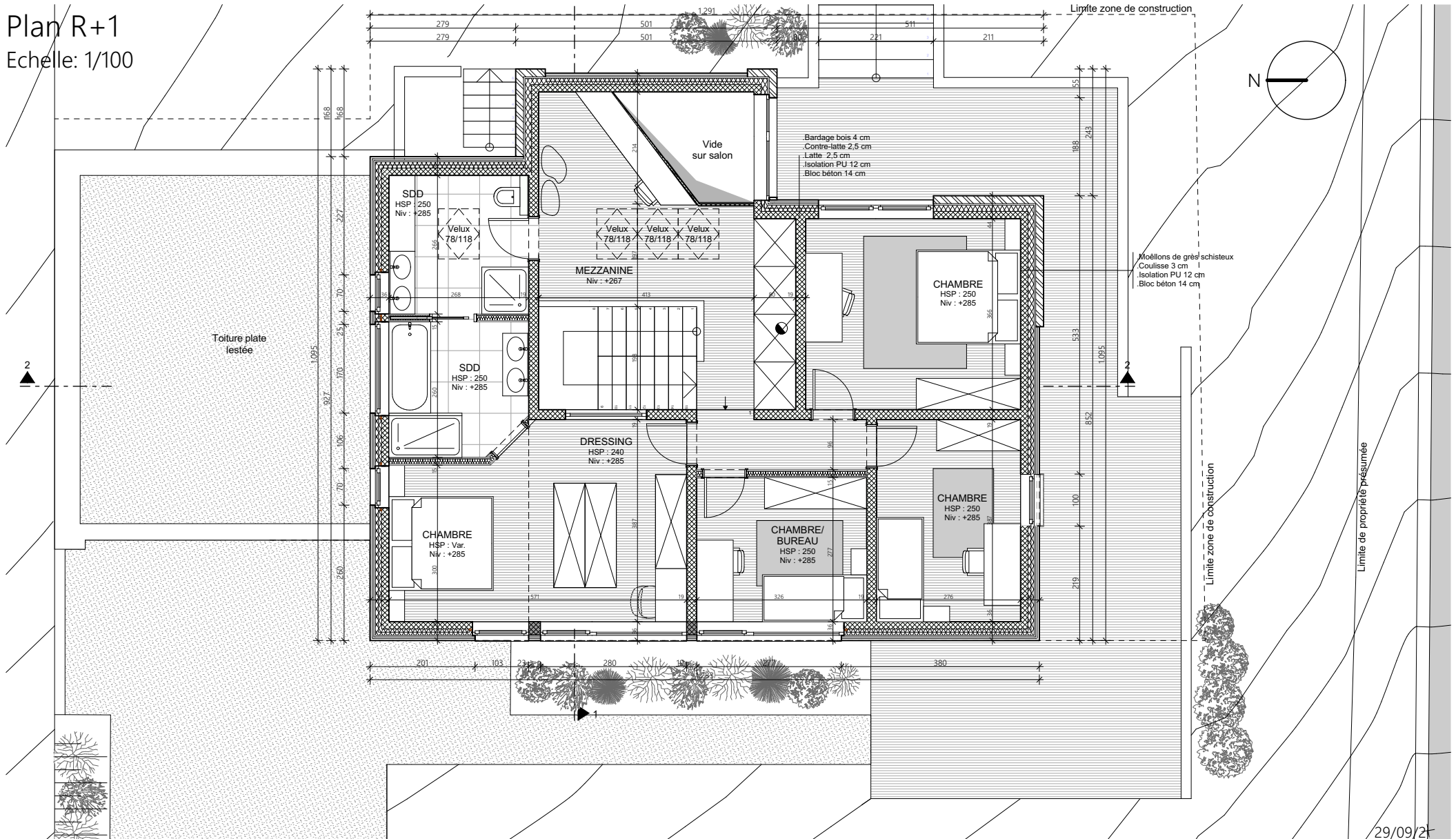
Echelle: 1/100



Feuille 02	PROJET	DEMANDEURS	ARCHITECTE	DOCUMENT
			Pierre Legniere - Ingénieur Architecte Quai de l'Ourthe 12, 6980 La Roche-en-Ardenne	Demande de permis d'urbanisme Plan RDC Echelle: 1/100

L'ENTREPRENEUR EST TENU DE FAIRE DESSINER ET CALCULER TOUS LES OUVRAGES DE STRUCTURE EN ACIER, EN BOIS, EN BETON ARME OU EN ELEMENTS DE BETON PREFABRIQUES PAR UN INGENIEUR SPECIALISE, LES RENSEIGNEMENTS REPRIS SUR CE PLAN N'ETANT DONNES QU'A TITRE INDICATIF. LES COTES SERONT VERIFIEES PAR L'ENTREPRENEUR AVANT EXECUTION ET NE SERONT JAMAIS REPRIS A L'ECHELLE SUR LES PLANS. CE PLAN RESTE LA PROPRIETE DU BUREAU D'ARCHITECTURE ET NE PEUT ETRE DIVULGUE SANS L'AUTORISATION DE CE DERNIER.

Plan R+1
Echelle: 1/100



Feuille 03	PROJET	DEMANDEURS	ARCHITECTE	DOCUMENT
			Pierre Legniere - Ingénieur Architecte Quai de l'Ourthe 12, 6980 La Roche-en-Ardenne	Demande de permis d'urbanisme Plan R+1 Echelle: 1/100

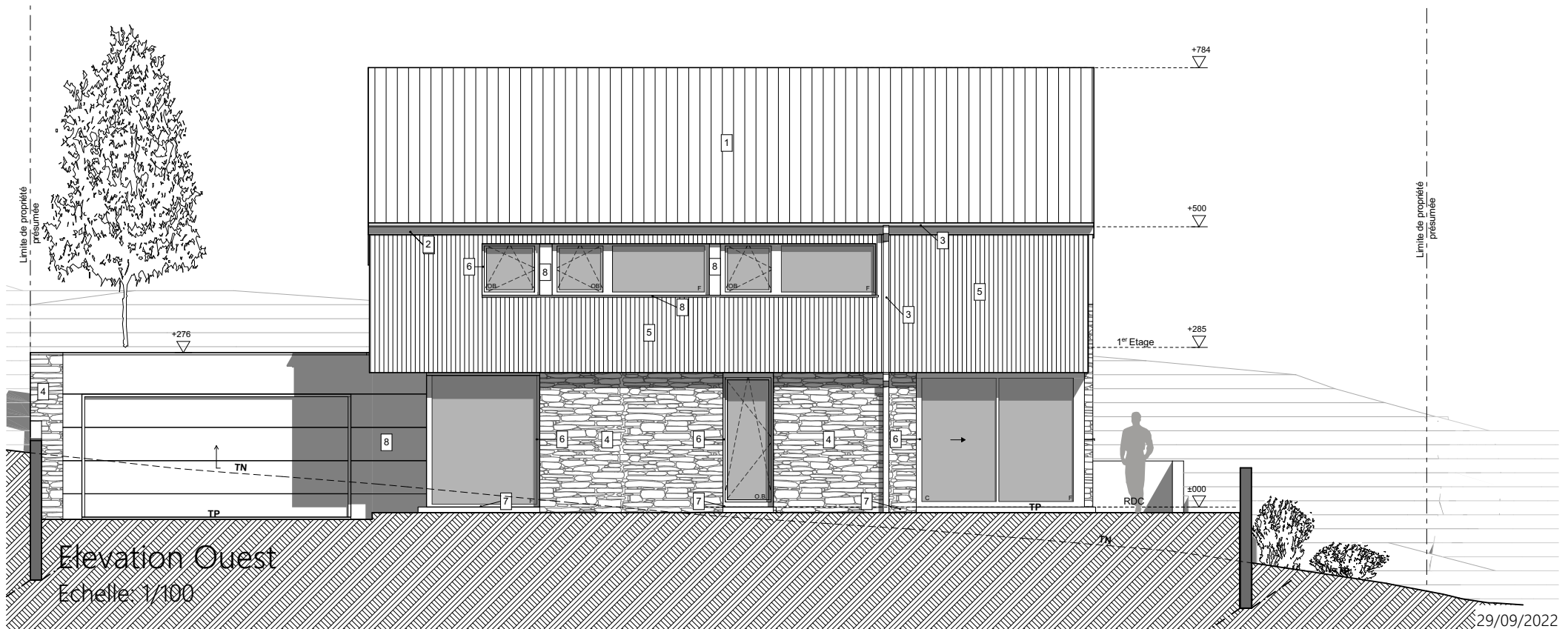
L'ENTREPRENEUR EST TENU DE FAIRE DESSINER ET CALCULER TOUS LES OUVRAGES DE STRUCTURE EN ACIER, EN BOIS, EN BETON ARME OU EN ELEMENTS DE BETON PREFABRIQUES PAR UN INGENIEUR SPECIALISE, LES RENSEIGNEMENTS REPRIS SUR CE PLAN N'ETANT DONNES QU'A TITRE INDICATIF. LES COTES SERONT VERIFIEES PAR L'ENTREPRENEUR AVANT EXECUTION ET NE SERONT JAMAIS REPRISES A L'ECHELLE SUR LES PLANS. CE PLAN RESTE LA PROPRIETE DU BUREAU D'ARCHITECTURE ET NE PEUT ETRE DIVULGUE SANS L'AUTORISATION DE CE DERNIER.

29/09/21

LEGENDE

Matériaux

- | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|--------------------------------------|---|---|
| 1 | Couverture ardoises naturelles/artificielles ton gris foncé | 3 | Chéneaux et tuyaux de descente zinc naturel | 5 | Bardage cèdre huilé ton gris naturel | 7 | Seuils, couvres-murs et éléments P.G. |
| 2 | Planches de rive et de face ardoisées | 4 | Maçonnerie moëllons grès schisteux | 6 | Châssis ALU ton gris moyen/foncé | 8 | Finitions et éléments métalliques ALU ton gris moyen/foncé idem |



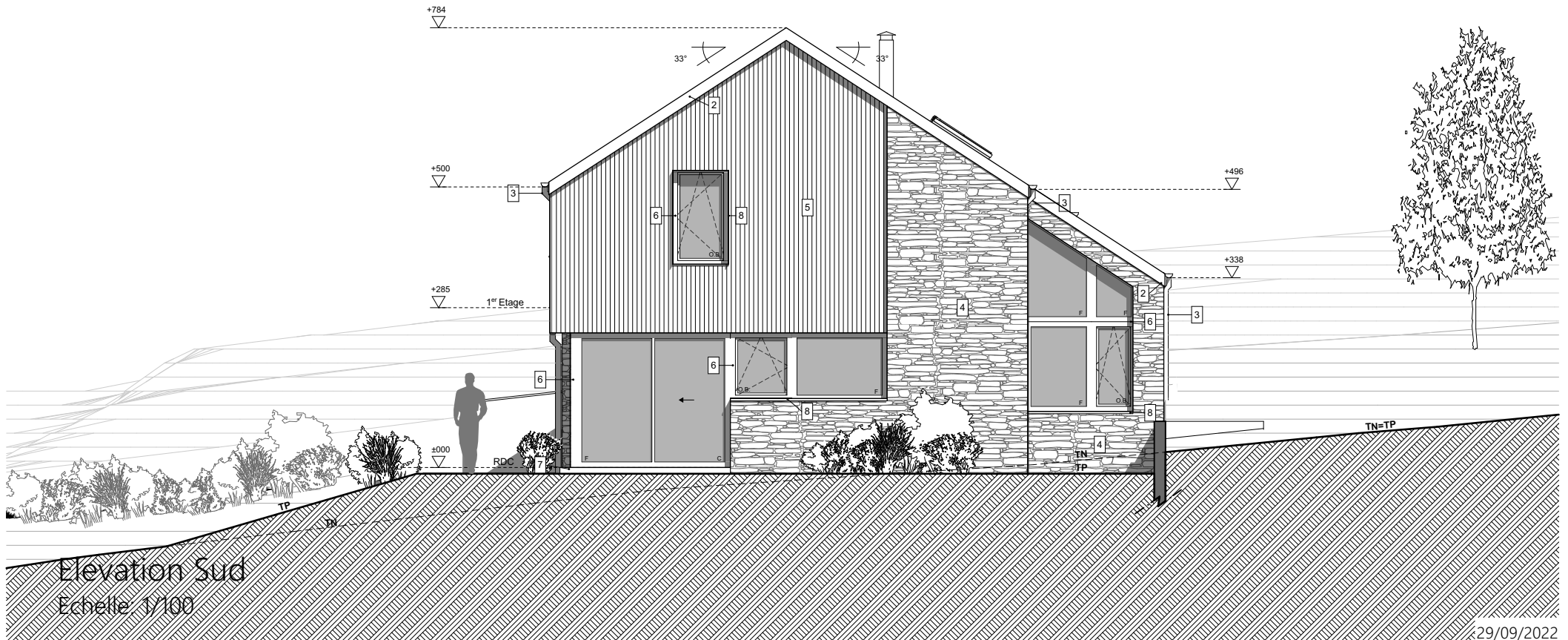
Feuille 04	PROJET	DEMANDEURS	ARCHITECTE	DOCUMENT
			Pierre Legniere - Ingénieur Architecte Quai de l'Ourthe 12, 6980 La Roche-en-Ardenne	Demande de permis d'urbanisme Élévation Ouest Echelle: 1/100

L'ENTREPRENEUR EST TENU DE FAIRE DESSINER ET CALCULER TOUS LES OUVRAGES DE STRUCTURE EN ACIER, EN BOIS, EN BETON ARME OU EN ELEMENTS DE BETON PREFABRIQUES PAR UN INGENIEUR SPECIALISE. LES RENSEIGNEMENTS REPRIS SUR CE PLAN N'ETANT DONNES QU'A TITRE INDICATIF. LES COTES SERONT VERIFIEES PAR L'ENTREPRENEUR AVANT EXECUTION ET NE SERONT JAMAIS REPRISES A L'ECHELLE SUR LES PLANS. CE PLAN RESTE LA PROPRIETE DU BUREAU D'ARCHITECTURE ET NE PEUT ETRE DIVULGUE SANS L'AUTORISATION DE CE DERNIER.

LEGENDE

Matériaux

- 1 Couverture ardoises naturelles/artificielles ton gris foncé
- 2 Planches de rive et de face ardoisées
- 3 Chêneaux et tuyaux de descente zinc naturel
- 4 Maçonnerie moëllons grès schisteux
- 5 Bardage cèdre huilé ton gris naturel
- 6 Châssis ALU ton gris moyen/foncé
- 7 Seuils, couvres-murs et éléments P.G.
- 8 Finitions et éléments métalliques ALU ton gris moyen/foncé idem



Feuille 05	PROJET	DEMANDEURS	ARCHITECTE	DOCUMENT
			Pierre Legniere - Ingénieur Architecte Quai de l'Ourthe 12, 6980 La Roche-en-Ardenne	Demande de permis d'urbanisme Elévation Sud Echelle: 1/100

L'ENTREPRENEUR EST TENU DE FAIRE DESSINER ET CALCULER TOUS LES OUVRAGES DE STRUCTURE EN ACIER, EN BOIS, EN BETON ARME OU EN ELEMENTS DE BETON PREFABRIQUES PAR UN INGENIEUR SPECIALISE. LES RENSEIGNEMENTS REPRIS SUR CE PLAN N'ETANT DONNES QU'A TITRE INDICATIF. LES COTES SERONT VERIFIEES PAR L'ENTREPRENEUR AVANT EXECUTION ET NE SERONT JAMAIS REPRISES A L'ECHELLE SUR LES PLANS. CE PLAN RESTE LA PROPRIETE DU BUREAU D'ARCHITECTURE ET NE PEUT ETRE DIVULGUE SANS L'AUTORISATION DE CE DERNIER.

LEGENDE

Matériaux

- 1 Couverture ardoises naturelles/artificielles ton gris foncé
- 2 Planches de rive et de face ardoisées
- 3 Chêneaux et tuyaux de descente zinc naturel
- 4 Maçonnerie moellons grès schisteux
- 5 Bardage cèdre huilé ton gris naturel
- 6 Châssis ALU ton gris moyen/foncé
- 7 Seuils, couvres-murs et éléments P.G.
- 8 Finitions et éléments métalliques ALU ton gris moyen/foncé idem



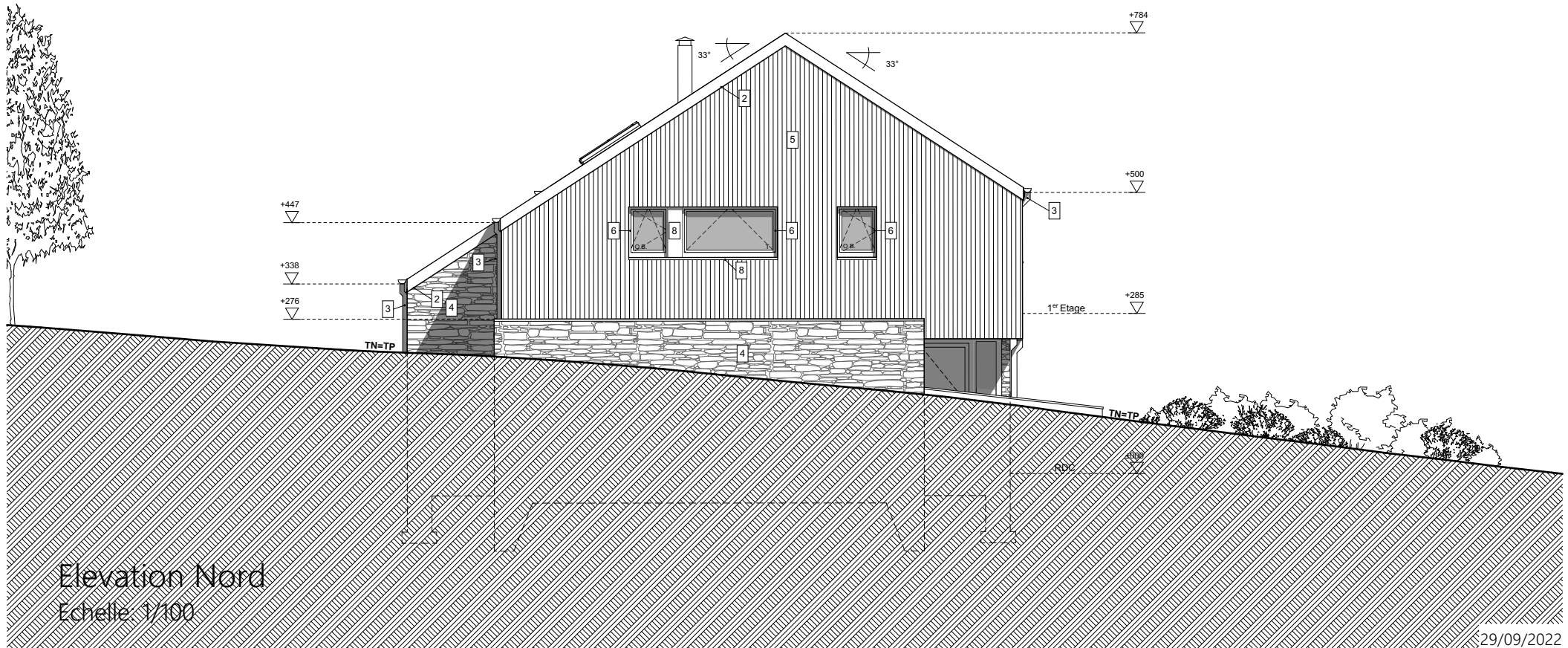
Feuille 06	PROJET [REDACTED]	DEMANDEURS [REDACTED]	ARCHITECTE Pierre Legniere - Ingénieur Architecte Quai de l'Ourthe 12, 6980 La Roche-en-Ardenne	DOCUMENT Demande de permis d'urbanisme Elévation Est Echelle: 1/100
-----------------------	-----------------------------	---------------------------------	---	---

L'ENTREPRENEUR EST TENU DE FAIRE DESSINER ET CALCULER TOUS LES OUVRAGES DE STRUCTURE EN ACIER, EN BOIS, EN BETON ARME OU EN ELEMENTS DE BETON PREFABRIQUES PAR UN INGENIEUR SPECIALISE. LES RENSEIGNEMENTS REPRIS SUR CE PLAN N'ETANT DONNES QU'A TITRE INDICATIF. LES COTES SERONT VERIFIEES PAR L'ENTREPRENEUR AVANT EXECUTION ET NE SERONT JAMAIS REPRISES A L'ECHELLE SUR LES PLANS. CE PLAN RESTE LA PROPRIETE DU BUREAU D'ARCHITECTURE ET NE PEUT ETRE DIVULGUE SANS L'AUTORISATION DE CE DERNIER.

LEGENDE

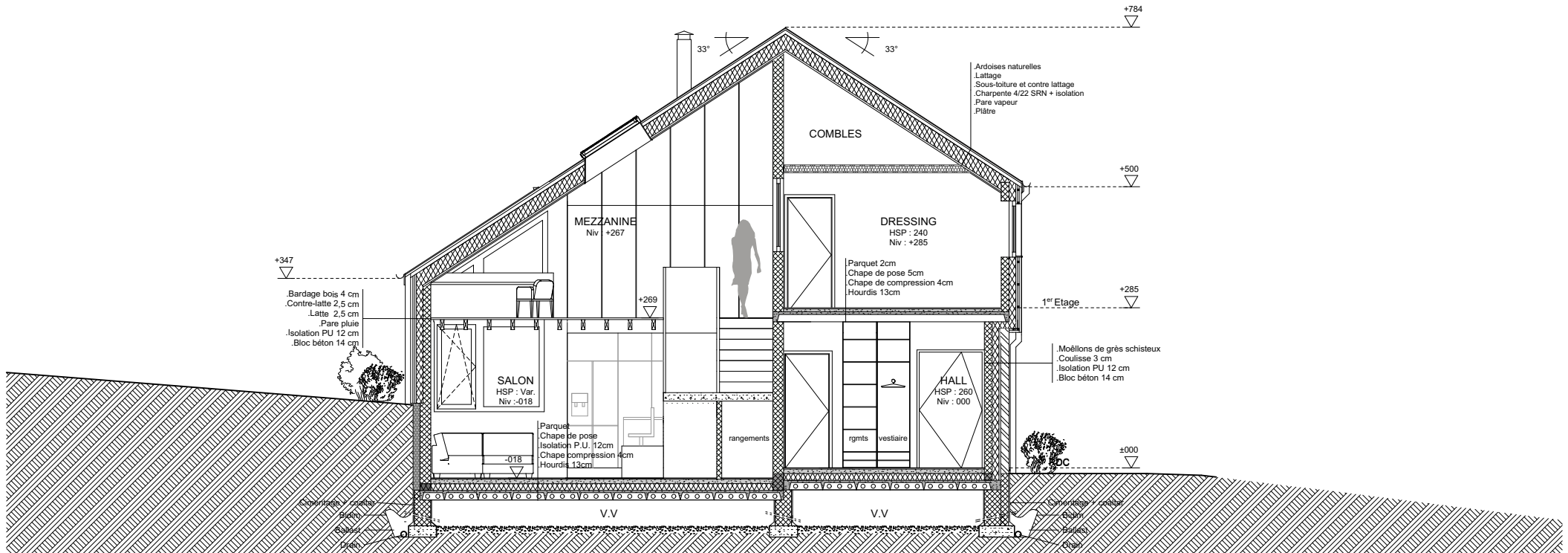
Matériaux

- | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|--------------------------------------|---|---|
| 1 | Couverture ardoises naturelles/artificielles ton gris foncé | 3 | Chéneaux et tuyaux de descente zinc naturel | 5 | Bardage cèdre huilé ton gris naturel | 7 | Seuils, couvres-murs et éléments P.G. |
| 2 | Planches de rive et de face ardoisées | 4 | Maçonnerie moëllons grès schisteux | 6 | Châssis ALU ton gris moyen/foncé | 8 | Finitions et éléments métalliques ALU ton gris moyen/foncé idem 6 |



Feuille 07	PROJET	DEMANDEURS	ARCHITECTE	DOCUMENT
			Pierre Legniere - Ingénieur Architecte Quai de l'Ourthe 12, 6980 La Roche-en-Ardenne	Demande de permis d'urbanisme Elévation Nord Echelle: 1/100

L'ENTREPRENEUR EST TENU DE FAIRE DESSINER ET CALCULER TOUS LES OUVRAGES DE STRUCTURE EN ACIER, EN BOIS, EN BETON ARME OU EN ELEMENTS DE BETON PREFABRIQUES PAR UN INGENIEUR SPECIALISE. LES RENSEIGNEMENTS REPRIS SUR CE PLAN N'ETANT DONNES QU'A TITRE INDICATIF. LES COTES SERONT VERIFIEES PAR L'ENTREPRENEUR AVANT EXECUTION ET NE SERONT JAMAIS REPRISES A L'ECHELLE SUR LES PLANS. CE PLAN RESTE LA PROPRIETE DU BUREAU D'ARCHITECTURE ET NE PEUT ETRE DIVULGUE SANS L'AUTORISATION DE CE DERNIER.

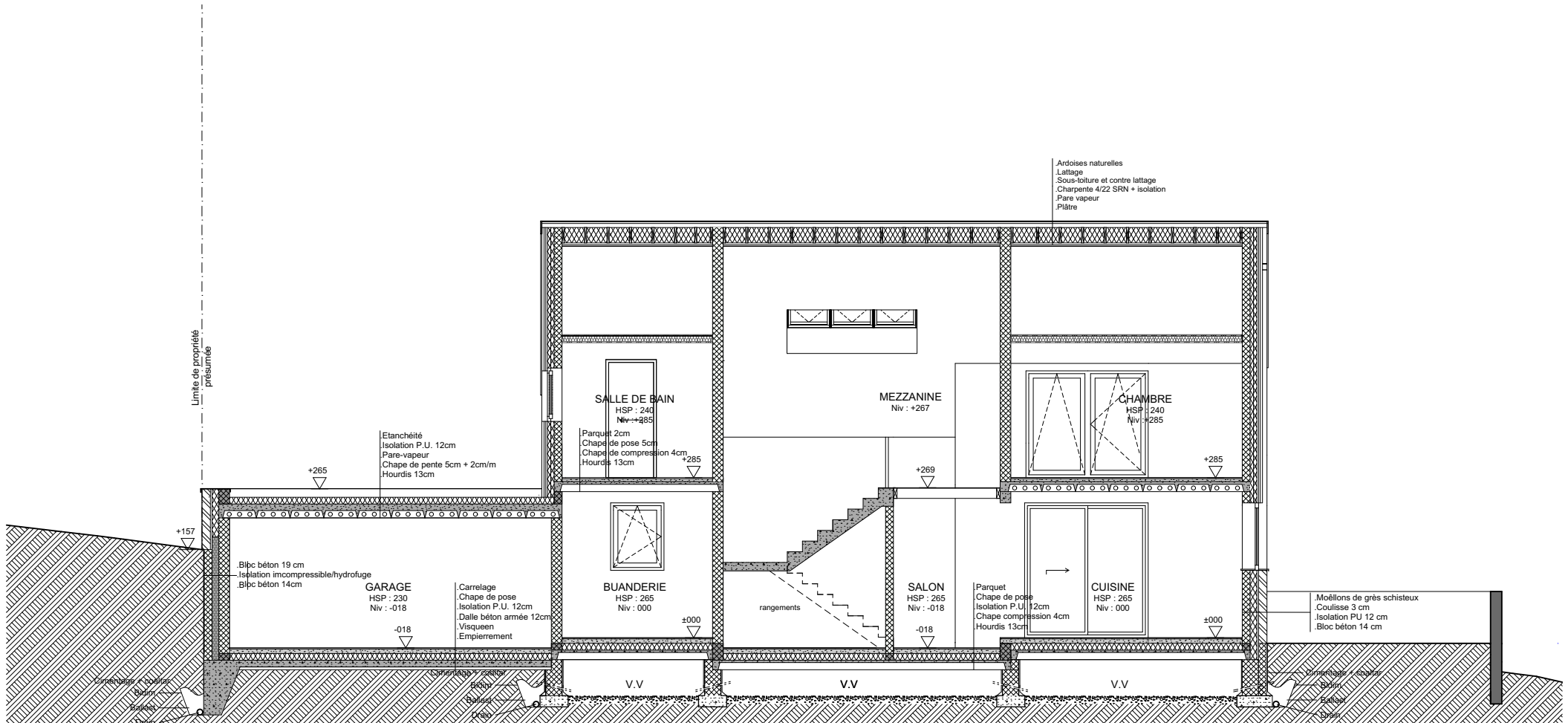


COUPE 1
Echelle: 1/100

29/09/2022

Feuille 08	PROJET	DEMANDEURS	ARCHITECTE	DOCUMENT
			Pierre Legniere - Ingénieur Architecte Quai de l'Ourthe 12, 6980 La Roche-en-Ardenne	Demande de permis d'urbanisme Coupe 1 Echelle: 1/100

L'ENTREPRENEUR EST TENU DE FAIRE DESSINER ET CALCULER TOUS LES OUVRAGES DE STRUCTURE EN ACIER, EN BOIS, EN BETON ARME OU EN ELEMENTS DE BETON PREFABRIQUES PAR UN INGENIEUR SPECIALISE, LES RENSEIGNEMENTS REPRIS SUR CE PLAN N'ETANT DONNES QU'A TITRE INDICATIF. LES COTES SERONT VERIFIEES PAR L'ENTREPRENEUR AVANT EXECUTION ET NE SERONT JAMAIS REPRISES A L'ECHELLE SUR LES PLANS. CE PLAN RESTE LA PROPRIETE DU BUREAU D'ARCHITECTURE ET NE PEUT ETRE DIVULGUE SANS L'AUTORISATION DE CE DERNIER.



COUPE 2
Echelle 1/100

Feuille 09	PROJET	DEMANDEURS	ARCHITECTE	DOCUMENT
			Pierre Legniere - Ingénieur Architecte Quai de l'Ourthe 12, 6980 La Roche-en-Ardenne	Demande de permis d'urbanisme Coupe 2 Echelle: 1/100

L'ENTREPRENEUR EST TENU DE FAIRE DESSINER ET CALCULER TOUS LES OUVRAGES DE STRUCTURE EN ACIER, EN BOIS, EN BETON ARME OU EN ELEMENTS DE BETON PREFABRIQUES PAR UN INGENIEUR SPECIALISE, LES RENSEIGNEMENTS REPRIS SUR CE PLAN N'ETANT DONNES QU'A TITRE INDICATIF. LES COTES SERONT VERIFIEES PAR L'ENTREPRENEUR AVANT EXECUTION ET NE SERONT JAMAIS REPRIS A L'ECHELLE SUR LES PLANS. CE PLAN RESTE LA PROPRIETE DU BUREAU D'ARCHITECTURE ET NE PEUT ETRE DIVULGUE SANS L'AUTORISATION DE CE DERNIER.

ANNEXE 2 : RAPPORT PEB

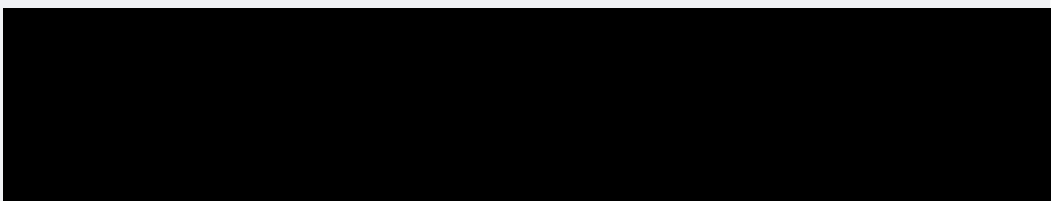


Performance énergétique et climat intérieur des bâtiments

Rapport PEB

Données administratives du projet

Nom du Projet
Rue
Localité
Référence cadastrale



Affichage du rapport

Ordre d'affichage dans le rapport

Toutes les unités par exigence

Unités PEB affichées dans le rapport

- Bâtiment "b1"
 - Unité PEB "upeb1"

Liste des intervenants

Les intervenants sont définis au niveau formulaire.

Bâtiment "b1"

(nom du bâtiment)

Nature des travaux: Bâtiment neuf et assimilé

Volume protégé : 944,52 m³

Volume "K 35 - vk5"

Unité PEB "upeb1"

Destination de l'unité PEB : Résidentielle (logement individuel)

Surface totale de plancher chauffé (Ach) : 276,50 m²

Exigences à respecter au niveau de l'unité PEB :

Umax / Rmin	Niveau K	Niveau E _w	E _{spec}	Ventilation	Surchauffe	Électromobilité
✓	✓ 31.0	✓ 37.0	✓ 61.0	✓	⚠	
voir fiche(s) 1	voir fiche(s) 2	voir fiche(s) 3	voir fiche(s) 3	voir fiche(s) 4	voir fiche(s) 3	

Méthode de calcul pour les noeuds constructifs : Option B : Méthode des nœuds PEB conformes

Bâtiment "b1"

(nom du bâtiment)

Nature des travaux : Bâtiment neuf et assimilé

Volume "K 35 - vk5"
Unité PEB "upeb1"

1.1. PAROIS TRANSPARENTES/TRANSLUCIDES

								Uw (moyen)	1,39	✓
Nom de la paroi	Type	U	Ug	R	b.Ui	a.Ueq	b.Ueq	Exig.		
F1	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F2	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F3	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F4	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F5	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F6	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F7	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F8	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F9	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F10	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F11	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F12	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F13	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F14	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F15	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F16	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F17	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
F18	Fenêtre	1,40	1,10	-	-	-	-	✓		
V1	Fenêtre de toit	1,30	1,10	-	-	-	-	✓		
V2	Fenêtre de toit	1,30	1,10	-	-	-	-	✓		
V3	Fenêtre de toit	1,30	1,10	-	-	-	-	✓		
V4	Fenêtre de toit	1,30	1,10	-	-	-	-	✓		

1.2.1 toitures et plafonds

Nom de la paroi	Type	U	Ug	R	b.Ui	a.Ueq	b.Ueq	Exig.
Toiture inclinée	Toiture	0,19	-	-	-	-	-	✓
Toiture plate	Toiture	0,19	-	-	-	-	-	✓


1.2.2. murs non en contact avec le sol, à l'exception des murs visés en 1.2.4.

Nom de la paroi	Type	U	Ug	R	b.Ui	a.Ueq	b.Ueq	Exig.
Murs extérieur pierre	Mur	0,19	-	-	-	-	-	✓
Murs extérieur bardage	Mur	0,20	-	-	-	-	-	✓
Murs extérieur bardage	Mur	0,20	-	-	-	-	-	✓



1.2.3. murs en contact avec le sol

Nom de la paroi	Type	U	Ug	R	b.Ui	a.Ueq	b.Ueq	Exig.
Murs contre terre	Mur	0,27	-	3,68	-	0,19	-	




1.2.5. planchers en contact avec l'environnement extérieur

Nom de la paroi	Type	U	Ug	R	b.Ui	a.Ueq	b.Ueq	Exig.
Dalle sur extérieure	Plancher/Plafond	0,17	-	-	-	-	-	

1.2.6. autres planchers (planchers sur terre-plein, au dessus d'un vide sanitaire ou au-dessus d'une cave en dehors du volume protégé, planchers de cave enterrés)

Nom de la paroi	Type	U	Ug	R	b.Ui	a.Ueq	b.Ueq	Exig.
Dalle sur sol	Plancher/Plafond	0,23	-	4,03	-	0,19	-	
Dalle sur VV	Plancher/Plafond	0,22	-	4,17	-	-	0,18	

1.3. PORTES ET PORTES DE GARAGE (cadre inclus)

Nom de la paroi	Type	U	Ug	R	b.Ui	a.Ueq	b.Ueq	Exig.
Garage P1	Porte	1,30	-	-	1,30	-	-	
Entrée P2	Porte	1,97	-	-	-	-	-	
Vers garage P3	Porte	1,97	-	-	-	-	-	

Annexe à la fiche 1 : Rappel des normes U/R

Tableau des valeurs U max admissibles ou valeurs R min à réaliser

Exigences applicables : Du 11/03/2021 au 31/12/2022

ELEMENT DE CONSTRUCTION	Umax et Rmin
1. PAROIS DELIMITANT LE VOLUME PROTEGE	
1.1. Parois transparentes / translucides, à l'exception des portes et portes de garage (voir 1.3), des murs-rideaux (voir 1.4), des parois en briques de verre (voir 1.5) et des parois transparentes/translucides autres que le verre (voir 1.6).	U _{w,max} = 1,50 W/m ² K et U _{g, max} = 1,10 W/m ² K
1.2. Parois opaques, à l'exception des portes et portes de garage (voir 1.3) et des murs-rideaux (voir 1.4)	
1.2.1. Toitures et plafonds	U _{max} = 0,24 W/m ² K
1.2.2. Murs non en contact avec le sol, à l'exception des murs visés en 1.2.4	U _{max} = 0,24 W/m ² K
1.2.3. Murs en contact avec le sol	U _{max} = 0,24 W/m ² K ou R _{min} = - m ² K/W
1.2.4. Parois verticales et en pente en contact avec un vide sanitaire ou avec une cave en dehors du volume protégé	U _{max} = 0,24 W/m ² K ou R _{min} = - m ² K/W
1.2.5. Planchers en contact avec l'environnement extérieur ou au-dessus d'un espace adjacent non-chauffé	U _{max} = 0,24 W/m ² K
1.2.6. Autres planchers (planchers sur terre-plein, au-dessus d'un vide sanitaire ou au-dessus d'une cave en dehors du volume protégé, ou planchers de cave enterrés)	U _{max} = 0,24 W/m ² K ou R _{min} = - m ² K/W
1.3. Portes et portes de garage (cadre inclus)	U _{D,max} = 2,00 W/m ² K
1.4. Murs-rideaux	U _{cw,max} = 2,00 W/m ² K et U _{g, max} = 1,10 W/m ² K
1.5. Parois en briques de verre	U _{max} = 2,00 W/m ² K
1.6. Parois transparentes/translucides autres que le verre, à l'exception des portes et portes de garage (voir 1.3) et des murs rideaux (voir 1.4)	U _{max} = 2,00 W/m ² K et U _{g, max} = - W/m ² K
2. PAROIS ENTRE 2 VOLUMES PROTEGES SITUES SUR DES PARCELLES ADJACENTES	U _{max} = 1,00 W/m ² K
3. PAROIS OPAQUES A L'INTERIEUR DU VOLUME PROTEGE OU ADJACENT A UN VOLUME PROTEGE SUR LA MEME PARCELLE 3.1. Entre unités d'habitation distinctes 3.2. Entre unités d'habitation et espaces communs 3.3. Entre unités d'habitation et espaces à affectation non résidentielle 3.4. Entre espaces à affectation industrielle et espaces à affectation non industrielle	U _{max} = 1,00 W/m ² K

Bâtiment "b1"

(nom du bâtiment)

Nature des travaux: Bâtiment neuf et assimilé

Volume K : vk5

Résultats :

Volume protégé (V) :	944,52 m ³
Surface totale de déperdition (At) :	682,96 m ²
Compacité (V/At) :	1,38 m
Coefficient moyen déperditions thermiques (Um) :	0,35 W/m ² .K
Niveau K :	31,00

Destination de l'unité PEB:

upeb1 : Résidentielle (logement individuel)

Bâtiment "b1"

(nom du bâtiment)

Nature des travaux : Bâtiment neuf et assimilé

Unité PEB : upeb1

Destination de l'unité PEB: Résidentielle (logement individuel)

Surchauffe	Indice	Probabilité
se1	4 011,99	54,76%

Résumé des résultats de l'unité PEB

Postes	Total annuel
Consommation d'EP pour le chauffage (et l'humidification si PEN) (MJ)	57 307,10
Consommation d'EP pour le refroidissement (MJ)	6 816,10
Consommation d'EP pour l'ECS (MJ)	18 617,92
Economie d'EP par le photovoltaïque (MJ)	-32 101,76
Consommation d'EP pour les auxiliaires (MJ)	9 737,02
Economie d'EP par la cogénération (MJ)	0,00
Consommation caractéristique d'EP (MJ)	60 376,39

Consommation d'EP pour le chauffage (et l'humidification si PEN)

Postes	Total annuel
Pertes par transmission (MJ)	58 183,50
Pertes par ventilation (MJ)	43 207,72
Gains internes (MJ)	-26 894,80
Gains solaires (MJ)	-30 715,89
Besoins nets pour le chauffage (MJ)	66 768,72
Besoins bruts pour le chauffage (MJ)	76 745,66
Energie produite pour le chauffage par le système solaire thermique (MJ)	0,00
Besoins bruts assumés par le système de chauffage (MJ)	76 745,66
Consommation finale préférentielle pour le chauffage (MJ)	22 922,84
Consommation finale non préf. pour le chauffage (MJ)	0,00
Consommation finale pour le chauffage (MJ)	22 922,84
Consommation d'EP pour le chauffage (et l'humidification si PEN) (MJ)	57 307,10

Consommation d'EP pour le refroidissement

Postes	Total annuel
Pertes par transmission en refroidissement (MJ)	83 187,71
Pertes par ventilation en refroidissement (MJ)	65 637,33
Gains internes en refroidissement (MJ)	-26 894,80
Gains solaires en refroidissement (MJ)	-39 038,55
Besoins nets pour le refroidissement (MJ)	6 134,49
Consommation finale pour le refroidissement (kWh)	757,34
Consommation d'EP pour le refroidissement (MJ)	6 816,10

Consommation d'EP pour l'ECS	
Postes	Total annuel
Besoins nets pour l'ECS (MJ)	9 049,03
Besoins bruts pour l'ECS (MJ)	11 582,76
Energie produite pour l'ECS par le système solaire thermique (MJ)	0,00
Besoins bruts assumés par le système d'ECS (MJ)	11 582,76
Consommation finale préférentielle pour l'ECS (MJ)	5 199,79
Consommation finale non-préf. pour l'ECS (MJ)	2 247,38
Consommation finale pour l'ECS (MJ)	7 447,17
Consommation d'EP pour l'ECS (MJ)	18 617,92
Consommation d'EP pour les auxiliaires	
Postes	Total annuel
Ventilateurs (kWh)	735,84
Distribution (kWh)	170,85
Générateurs (kWh)	175,20
Pompes de circulation pour l'énergie solaire thermique (kWh)	0,00
Free-chilling	0,00
Pré-refroidissement (kWh)	0,00
Consommation d'EP pour les auxiliaires (MJ)	9 737,02
Economie d'EP par le photovoltaïque	
Postes	Total annuel
Production finale d'électricité (kWh)	3 566,86
Economie d'EP par le photovoltaïque (MJ)	-32 101,76
Economie d'EP par la cogénération	
Postes	Total annuel
Production finale d'électricité (kWh)	0,00
Economie d'EP par la cogénération (MJ)	0,00
Emissions de CO2	
Postes	Total annuel
Emissions dues au chauffage (kg)	4 103,19
Emissions dues à l'ECS (kg)	1 333,04
Emissions dues au refroidissement (kg)	0,00
Emissions dues aux auxiliaires (kg)	697,17
Emissions économisées grâce au photovoltaïque (kg)	-2 298,49
Emissions économisées grâce à la cogénération (kg)	0,00
Emission totale de CO2 (kg)	3 834,92

Fiche 4 : Exigence ventilation

Bâtiment "b1"

(nom du bâtiment)

Nature des travaux : Bâtiment neuf et assimilé

Volume K : K 35 - vk5

Unité PEB : upeb1

Destination de l'unité PEB: Résidentielle (logement individuel)

Respect de l'exigence :

Système de ventilation : zv1

Type de système : C - Alimentation naturelle, évacuation mécanique

Avec récupération :

	Espaces	Surface [m ²]	Alimentation [m ³ /h]	Transfert [m ³ /h]	Evacuation [m ³ /h]	Dispositifs	Exig.
S	Salon (Local de séjour (ou espaces analogues))	25.65	95,000	25,200	0,000	1 OAR, 1 OT	<input checked="" type="checkbox"/>
S	Salle à manger (Local de séjour (ou espaces analogues))	22.2	80,000	25,200	0,000	1 OAR, 1 OT	<input checked="" type="checkbox"/>
S	Bureau (Chambre à coucher, Chambre hobby ou étude (ou espaces analogues))	9.01	35,000	25,200	0,000	1 OAR, 1 OT	<input checked="" type="checkbox"/>
S	Chambre 1 (Chambre à coucher, Chambre hobby ou étude (ou espaces analogues))	20.04	72,000	25,200	0,000	1 OAR, 1 OT	<input checked="" type="checkbox"/>
S	Chambre 2 (Chambre à coucher, Chambre hobby ou étude (ou espaces analogues))	10.69	40,000	25,200	0,000	1 OAR, 1 OT	<input checked="" type="checkbox"/>
S	Chambre 3 (Chambre à coucher, Chambre hobby ou étude (ou espaces analogues))	15.08	55,000	25,200	0,000	1 OAR, 1 OT	<input checked="" type="checkbox"/>
S	Mezzanine (salle de jeux) (Chambre à coucher, Chambre hobby ou étude (ou espaces analogues))	17.31	65,000	25,200	0,000	1 OAR, 1 OT	<input checked="" type="checkbox"/>
H	Cuisine (Cuisine ouverte)		0,000	0,000	110,000	1 OEM	<input checked="" type="checkbox"/>
H	Buanderie (Salle de bain, buanderie, local de séchage)	10.71	0,000	25,200	70,000	1 OT, 1 OEM	<input checked="" type="checkbox"/>
H	WC rdc (WC)		0,000	25,200	25,000	1 OT, 1 OEM	<input checked="" type="checkbox"/>
H	SDD 1 (Salle de bain, buanderie, local de séchage)	6.81	0,000	25,200	70,000	1 OT, 1 OEM	<input checked="" type="checkbox"/>
H	SDD 2 (Salle de bain, buanderie, local de séchage)	6.64	0,000	25,200	70,000	1 OT, 1 OEM	<input checked="" type="checkbox"/>
	Total		442,000		345,000		

Fiche 5 : Exigences d'électromobilité

Bâtiment "b1"

(nom du bâtiment)

Description du bâtiment

Nature des travaux : Bâtiment neuf et assimilé

Destination principale : Résidentielle

Un parc de stationnement de plus de 10 emplacements est situé dans le bâtiment : Non

Un parc de stationnement de plus de 10 emplacements juxte le bâtiment : Non

Le bâtiment n'est pas dans le champ d'application des exigences d'électromobilité

Annexe 1 : Calculs détaillés par mois

Bâtiment "b1"

(nom du bâtiment)

Unité PEB : upeb1

Destination de l'unité PEB: Résidentielle (logement individuel)

Résumé des résultats de l'unité PEB												
Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Consommation d'EP pour le chauffage (et l'humidification si PEN) (MJ)												
11 853,3	9 712,1	7 782,5	3 594,5	676,8	0,0	0,0	0,0	178,2	3 349,5	8 509,1	11 651,1	57 307,1
Consommation d'EP pour le refroidissement (MJ)												
0,0	0,0	0,0	179,3	669,1	1 469,5	1 971,7	1 774,1	659,7	92,9	0,0	0,0	6 816,1
Consommation d'EP pour l'ECS (MJ)												
2 316,3	1 965,1	1 473,2	1 309,0	1 288,9	1 236,9	1 278,1	1 278,1	1 239,8	1 341,0	1 591,4	2 300,1	18 617,9
Economie d'EP par le photovoltaïque (MJ)												
-674,2	-1 186,9	-2 274,9	-3 412,0	-4 647,3	-4 834,2	-4 710,9	-4 173,8	-3 007,4	-1 815,5	-847,3	-517,4	-32 101,8
Consommation d'EP pour les auxiliaires (MJ)												
954,4	850,9	903,6	805,5	742,8	673,9	696,4	696,4	694,4	855,1	908,2	955,3	9 737,0
Economie d'EP par la cogénération (MJ)												
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Consommation caractéristique d'EP (MJ)												
14 449,8	11 341,2	7 884,5	2 476,3	-1 269,7	-1 453,9	-764,7	-425,2	-235,3	3 823,0	10 161,4	14 389,0	60 376,4
Consommation d'EP pour le chauffage (et l'humidification si PEN)												
Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Pertes par transmission (MJ)												
9 491,4	8 167,4	7 759,9	5 461,5	3 014,2	1 117,1	256,5	256,5	1 737,7	4 360,9	7 261,3	9 299,0	58 183,5
Pertes par ventilation (MJ)												
7 048,4	6 065,2	5 762,6	4 055,8	2 238,4	829,6	190,5	190,5	1 290,5	3 238,5	5 392,3	6 905,6	43 207,7
Gains internes (MJ)												
-2 284,2	-2 063,2	-2 284,2	-2 210,5	-2 284,2	-2 210,5	-2 284,2	-2 284,2	-2 210,5	-2 284,2	-2 210,5	-2 284,2	-26 894,8
Gains solaires (MJ)												
-451,3	-866,4	-2 253,1	-3 630,7	-4 386,2	-4 600,3	-4 548,2	-4 186,4	-3 260,0	-1 639,2	-543,1	-351,1	-30 715,9
Besoins nets pour le chauffage (MJ)												
13 810,3	11 315,6	9 067,5	4 187,9	788,6	0,0	0,0	0,0	207,7	3 902,5	9 914,0	13 574,7	66 768,7
Besoins bruts pour le chauffage (MJ)												
15 873,9	13 006,4	10 422,4	4 813,7	906,4	0,0	0,0	0,0	238,7	4 485,7	11 395,4	15 603,1	76 745,7
Energie produite pour le chauffage par le système solaire thermique (MJ)												
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Besoins bruts assumés par le système de chauffage (MJ)												
15 873,9	13 006,4	10 422,4	4 813,7	906,4	0,0	0,0	0,0	238,7	4 485,7	11 395,4	15 603,1	76 745,7
Consommation finale préférentielle pour le chauffage (MJ)												
4 741,3	3 884,8	3 113,0	1 437,8	270,7	0,0	0,0	0,0	71,3	1 339,8	3 403,6	4 660,4	22 922,8
Consommation finale non préf. pour le chauffage (MJ)												
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Consommation finale pour le chauffage (MJ)												
4 741,3	3 884,8	3 113,0	1 437,8	270,7	0,0	0,0	0,0	71,3	1 339,8	3 403,6	4 660,4	22 922,8
Consommation d'EP pour le chauffage (et l'humidification si PEN) (MJ)												
11 853,3	9 712,1	7 782,5	3 594,5	676,8	0,0	0,0	0,0	178,2	3 349,5	8 509,1	11 651,1	57 307,1

Consommation d'EP pour le refroidissement

Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Pertes par transmission en refroidissement (MJ)												
11 347,4	9 867,6	9 717,7	7 476,7	5 251,2	3 387,9	2 655,8	2 655,8	3 972,0	6 518,7	9 170,6	11 166,3	83 187,7
Pertes par ventilation en refroidissement (MJ)												
8 953,4	7 785,8	7 667,5	5 899,3	4 143,3	2 673,1	2 095,5	2 095,5	3 134,0	5 143,4	7 235,9	8 810,5	65 637,3
Gains internes en refroidissement (MJ)												
-2 284,2	-2 063,2	-2 284,2	-2 210,5	-2 284,2	-2 210,5	-2 284,2	-2 284,2	-2 210,5	-2 284,2	-2 210,5	-2 284,2	-26 894,8
Gains solaires en refroidissement (MJ)												
-841,3	-1 806,2	-3 124,4	-4 239,7	-5 161,6	-5 349,2	-5 287,7	-4 910,1	-3 946,3	-2 602,2	-1 271,0	-498,7	-39 038,6
Besoins nets pour le refroidissement (MJ)												
0,0	0,0	0,0	161,3	602,2	1 322,5	1 774,5	1 596,7	593,7	83,6	0,0	0,0	6 134,5
Consommation finale pour le refroidissement (kWh)												
0,0	0,0	0,0	19,9	74,3	163,3	219,1	197,1	73,3	10,3	0,0	0,0	757,3
Consommation d'EP pour le refroidissement (MJ)												
0,0	0,0	0,0	179,3	669,1	1 469,5	1 971,7	1 774,1	659,7	92,9	0,0	0,0	6 816,1

Consommation d'EP pour l'ECS

Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Besoins nets pour l'ECS (MJ)												
768,5	694,2	768,5	743,8	768,5	743,8	768,5	768,5	743,8	768,5	743,8	768,5	9 049,0
Besoins bruts pour l'ECS (MJ)												
983,7	888,5	983,7	952,0	983,7	952,0	983,7	983,7	952,0	983,7	952,0	983,7	11 582,8
Energie produite pour l'ECS par le système solaire thermique (MJ)												
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Besoins bruts assumés par le système d'ECS (MJ)												
983,7	888,5	983,7	952,0	983,7	952,0	983,7	983,7	952,0	983,7	952,0	983,7	11 582,8
Consommation finale préférentielle pour l'ECS (MJ)												
273,6	276,2	466,3	478,0	508,4	494,4	510,9	510,9	493,8	496,5	413,4	277,3	5 199,8
Consommation finale non-préf. pour l'ECS (MJ)												
652,9	509,9	123,0	45,6	7,1	0,3	0,3	0,3	2,1	39,8	223,2	642,7	2 247,4
Consommation finale pour l'ECS (MJ)												
926,5	786,0	589,3	523,6	515,6	494,8	511,3	511,3	495,9	536,4	636,6	920,0	7 447,2
Consommation d'EP pour l'ECS (MJ)												
2 316,3	1 965,1	1 473,2	1 309,0	1 288,9	1 236,9	1 278,1	1 278,1	1 239,8	1 341,0	1 591,4	2 300,1	18 617,9

Consommation d'EP pour les auxiliaires

Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Ventilateurs (kWh)												
62,5	56,4	62,5	60,5	62,5	60,5	62,5	62,5	60,5	62,5	60,5	62,5	735,8
Distribution (kWh)												
28,7	24,7	23,0	14,6	5,2	0,0	0,0	0,0	2,3	17,6	26,0	28,8	170,9
Générateurs (kWh)												
14,9	13,4	14,9	14,4	14,9	14,4	14,9	14,9	14,4	14,9	14,4	14,9	175,2
Pompes de circulation pour l'énergie solaire thermique (kWh)												
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Free-chilling												
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Pré-refroidissement (kWh)												
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Consommation d'EP pour les auxiliaires (MJ)												
954,4	850,9	903,6	805,5	742,8	673,9	696,4	696,4	694,4	855,1	908,2	955,3	9 737,0
Economie d'EP par le photovoltaïque												
Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Production finale d'électricité (kWh)												
74,9	131,9	252,8	379,1	516,4	537,1	523,4	463,8	334,2	201,7	94,1	57,5	3 566,9
Economie d'EP par le photovoltaïque (MJ)												
-674,2	-1 186,9	-2 274,9	-3 412,0	-4 647,3	-4 834,2	-4 710,9	-4 173,8	-3 007,4	-1 815,5	-847,3	-517,4	-32 101,8
Economie d'EP par la cogénération												
Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Production finale d'électricité (kWh)												
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Economie d'EP par la cogénération (MJ)												
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Emissions de CO2												
Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Emissions dues au chauffage (kg)												
848,7	695,4	557,2	257,4	48,5	0,0	0,0	0,0	12,8	239,8	609,3	834,2	4 103,2
Emissions dues à l'ECS (kg)												
165,8	140,7	105,5	93,7	92,3	88,6	91,5	91,5	88,8	96,0	113,9	164,7	1 333,0
Emissions dues au refroidissement (kg)												
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Emissions dues aux auxiliaires (kg)												
68,3	60,9	64,7	57,7	53,2	48,3	49,9	49,9	49,7	61,2	65,0	68,4	697,2
Emissions économisées grâce au photovoltaïque (kg)												
-48,3	-85,0	-162,9	-244,3	-332,7	-346,1	-337,3	-298,8	-215,3	-130,0	-60,7	-37,0	-2 298,5
Emissions économisées grâce à la cogénération (kg)												
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Emission totale de CO2 (kg)												
1 034,6	812,0	564,5	164,5	-138,8	-209,3	-195,9	-157,5	-64,1	267,1	727,6	1 030,3	3 834,9

Annexe 2 : Composition des parois

Note : la valeur U reprise dans les tableaux des murs et planchers représente suivant les environnements :

- aUeq : si l'environnement est le sol
- bUeq : si l'environnement est une cave ou un vide sanitaire
- bUi : si l'environnement est un espace adjacent non chauffé


Type de paroi : Mur



Tableau des couches

#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	R [m²K/W]
1	Maçonnerie	Pierres dures (Pierres naturelles) - λU: 2.68 Joint: Mortier de ciment (Plâtres, mortiers et enduits) - λU: 1.5	0,150	0,056
2	Simple	Air peu ventilé (Air)	0,030	NA
3	Simple	Panneau PU.ref - λU: 0.023	0,120	5,217
4	Maçonnerie	Maçonnerie en blocs creux de béton lourd (Matériaux hétérogènes) Joint: Mortier de ciment (Plâtres, mortiers et enduits) - λU: 0.93	0.14	0,110
5	Simple	Enduit de plâtre (Plâtres, mortiers et enduits) - λU: 0.52	0,010	0,019

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Epaisseur Totale	Exigence
Murs extérieur pierre	90,72	Environnement extérieur	0,19		0,45	


Type de paroi : Mur



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	Membrane bitumeuse (Divers) - λU: 0.23	0,001	0,004
3	Simple	Panneau PU.ref - λU: 0.023	0,120	5,217
4	Maçonnerie	Maçonnerie en blocs creux de béton lourd (Matériaux hétérogènes) Joint: Mortier de ciment (Plâtres, mortiers et enduits) - λU: 0.93	0.14	0,110
5	Simple	Enduit de plâtre (Plâtres, mortiers et enduits) - λU: 0.52	0,010	0,019

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Epaisseur Totale	Exigence
Murs extérieur bardage bois	117,51	Environnement extérieur	0,20		-	


Type de paroi : Mur



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	Membrane bitumeuse (Divers) - λU: 0.23	0,001	0,004
3	Simple	Panneau PU.ref - λU: 0.023	0,120	5,217
4	Maçonnerie	Maçonnerie en blocs creux de béton lourd (Matériaux hétérogènes) Joint: Mortier de ciment (Plâtres, mortiers et enduits) - λU: 0.93	0.14	0,110
5	Simple	Enduit de plâtre (Plâtres, mortiers et enduits) - λU: 0.52	0,010	0,019

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Epaisseur Totale	Exigence
Murs extérieur bardage alu	9,06	Environnement extérieur	0,20		-	


Type de paroi : Mur



Tableau des couches

#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	R [m²K/W]
1	Maçonnerie	Maçonnerie en blocs creux de béton lourd (Matériaux hétérogènes) Joint: Mortier de ciment (Plâtres, mortiers et enduits) - λU: 1.5	0.14	0,105
2	Simple	Panneau XPS.ref - λU: 0.035	0,120	3,429
3	Simple	Mortier de ciment (Plâtres, mortiers et enduits) - λU: 0.93	0,010	0,011
4	Maçonnerie	Maçonnerie en blocs creux de béton lourd (Matériaux hétérogènes) Joint: Mortier de ciment (Plâtres, mortiers et enduits) - λU: 0.93	0.19	0,140

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Epaisseur Totale	Exigence
Murs contre terre	33,44	Sol	0,19	3,68	0,46	

Type de paroi : Fenêtre
 Type de fenêtre : Fenêtre simple
 Valeur U du vitrage : 1,10 W/m²K
 Valeur g (facteur solaire) : 0,63
 Groupe du profilé : Plastique
 Valeur Uf du profilé : 1,60 W/m²K (Calculée)
 Valeur U grille de ventilation : Pas de grille de ventilation
 Valeur U Panneau opaque : Pas de Panneau Opaque



Liste des parois (PVC DV)

Nom	Surface [m ²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m ² K]	Ug [m ² K/W]	Exigence
F2	4,85	Environnement extérieur	90,00	1,40	1,10	✓
F1	1,34	Environnement extérieur	180,00	1,40	1,10	✓
F3	2,16	Environnement extérieur	90,00	1,40	1,10	✓
F4	7,20	Environnement extérieur	90,00	1,40	1,10	✓
F5	6,96	Environnement extérieur	0,00	1,40	1,10	✓
F6	3,28	Environnement extérieur	0,00	1,40	1,10	✓
F7	5,28	Environnement extérieur	-90,00	1,40	1,10	✓
F8	3,01	Environnement extérieur	0,00	1,40	1,10	✓
F9	2,02	Environnement extérieur	-90,00	1,40	1,10	✓
F10	0,95	Environnement extérieur	90,00	1,40	1,10	✓
F11	2,59	Environnement extérieur	90,00	1,40	1,10	✓
F12	2,55	Environnement extérieur	90,00	1,40	1,10	✓
F13	1,68	Environnement extérieur	0,00	1,40	1,10	✓
F14	4,03	Environnement extérieur	-90,00	1,40	1,10	✓
F15	2,31	Environnement extérieur	0,00	1,40	1,10	✓
F16	0,63	Environnement extérieur	180,00	1,40	1,10	✓
F17	1,53	Environnement extérieur	180,00	1,40	1,10	✓
F18	0,63	Environnement extérieur	180,00	1,40	1,10	✓

Type de paroi : Fenêtre de toit
 Valeur U : 1,30 W/m²k (Introduction directe)
 Valeur g (facteur solaire) : 0,64
 Valeur U du vitrage : 1,10 W/m²k (Introduction directe)




Liste des parois

Nom	Surface [m ²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m ² K]	Ug [m ² K/W]	Exigence
V1	0,92	Environnement extérieur	-90,00	1,30	1,10	✓

Type de paroi : Fenêtre de toit
 Valeur U : 1,30 W/m²k (Introduction directe)
 Valeur g (facteur solaire) : 0,64
 Valeur U du vitrage : 1,10 W/m²k (Introduction directe)




Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Ug [m²K/W]	Exigence
V2	0,92	Environnement extérieur	-90,00	1,30	1,10	

Type de paroi : Fenêtre de toit
 Valeur U : 1,30 W/m²k (Introduction directe)
 Valeur g (facteur solaire) : 0,64
 Valeur U du vitrage : 1,10 W/m²k (Introduction directe)




Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Ug [m²K/W]	Exigence
V3	0,92	Environnement extérieur	-90,00	1,30	1,10	

Type de paroi : Fenêtre de toit
 Valeur U : 1,30 W/m²k (Introduction directe)
 Valeur g (facteur solaire) : 0,64
 Valeur U du vitrage : 1,10 W/m²k (Introduction directe)



Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Ug [m²K/W]	Exigence
V4	0,92	Environnement extérieur	-90,00	1,30	1,10	


Type de paroi : Plancher/Plafond



Tableau des couches

#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	R [m²K/W]
1	Simple	Béton lourd normal armé (Eléments de construction pierreux sans joints) - λU: 2.2	0,120	0,055
2	Simple	PU projeté.ref - λU: 0.027	0,120	3,915
3	Simple	Béton léger en dalles, panneaux pleins ou chape (Eléments de construction pierreux sans joints) - λU: 1.3	0,070	0,049
4	Simple	Carreaux de grès (Divers) - λU: 1.2	0,010	0,008

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Epaisseur Totale	Exigence
Dalle sur sol	48,52	Sol	0,19	4,03	0,32	


Type de paroi : Plancher/Plafond



Tableau des couches

#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	R [m²K/W]
1	Simple	Planchers bruts préfabriqués en béton lourd (avec éléments creux) (Matériaux hétérogènes)	0.12	0,110
2	Simple	Béton lourd normal armé (Eléments de construction pierreux sans joints) - λU: 1.7	0,040	0,024
3	Simple	PU projeté.ref - λU: 0.027	0,120	3,915
4	Simple	Béton léger en dalles, panneaux pleins ou chape (Eléments de construction pierreux sans joints) - λU: 1.3	0,070	0,049
5	Simple	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU: 0.13	0,010	0,077

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Epaisseur Totale	Exigence
Dalle sur VV	114,64	Vide sanitaire	0,18	4,17	0,36	


Type de paroi : Plancher/Plafond



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	Panneau PU - λU: 0.023	0,120	5,217
3	Simple	Planchers bruts préfabriqués en béton lourd (avec éléments creux) (Matériaux hétérogènes)	0.12	0,110
4	Simple	Béton lourd normal armé (Eléments de construction pierreux sans joints) - λU: 1.7	0,040	0,024
5	Simple	Béton léger en dalles, panneaux pleins ou chape (Eléments de construction pierreux sans joints) - λU: 0.6	0,050	0,076
6	Simple	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU: 0.13	0,020	0,154

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Epaisseur Totale	Exigence
Dalle sur extérieure	7,10	Environnement extérieur	0,17		-	


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	Membrane bitumeuse (Divers) - λU: 0.23	0,001	0,004
3	Composée	11% de Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU: 0.13 89% de Laine minérale MW.ref - λU: 0.035	0,220	4,840
4	Composée	89% de Air non ventilé (Air) 11% de Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - λU: 0.13	0,020	0,159
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]	Epaisseur Totale	Exigence
Toiture inclinée	144,50	Environnement extérieur	0,19		-	


Type de paroi : Toiture



Tableau des couches

#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	R [m²K/W]
1	Simple	Membrane bitumeuse (Divers) - λU: 0.23	0,005	0,022
2	Simple	Recticel Insulation / Powerdeck - λU: 0.024	0,120	5,000
3	Simple	Béton léger en dalles, panneaux pleins ou chape (Eléments de construction pierreux sans joints) - λU: 0.6	0,040	0,061
4	Simple	Béton lourd normal armé (Eléments de construction pierreux sans joints) - λU: 1.7	0,040	0,024
5	Simple	Planchers bruts préfabriqués en béton lourd (avec éléments creux) (Matériaux hétérogènes)	0.12	0,110

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Epaisseur Totale	Exigence
Toiture plate	46,00	Environnement extérieur	0,19		0,33	

Type de paroi : Porte

Valeur U introduite directement : 1,30 W/m²K



Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Exigence
Garage P1	10,56	Espace adjacent non chauffé	-	1,30	

Type de paroi : Porte




Groupe du profilé : Plastique

Valeur U_f du profilé : 1,60 W/m²K (Calculée)

Valeur U grille de ventilation : Pas de grille de ventilation

Valeur U Panneau opaque : 1,40 W/m²K

Liste des parois


Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Exigence
Entrée P2	2,40	Environnement extérieur	-	1,97	

Type de paroi : Porte



Groupe du profilé : Plastique
 Valeur Uf du profilé : 1,60 W/m²K (Calculée)
 Valeur U grille de ventilation : Pas de grille de ventilation
 Valeur U Panneau opaque : 1,40 W/m²K

Liste des parois

Nom	Surface [m ²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m ² K]	Exigence
Vers garage P3	1,83	Environnement extérieur	-	1,97	

Annexe 3 : Présence des systèmes

Systèmes de l'unité PEB : upeb1

Installation de chauffage <chauffage1>

Type de chauffage	Chauffage central
Introduction directe du rendement de stockage	Non
Stockage de chaleur dans réservoirs tampons	Absent
Rendement du système de chauffage	87,00 %

Système de production de chaleur <PAC air/eau>

Marque du produit	?
Product-ID	?
Type de générateur	Pompe à chaleur
Type de technologie de la PAC	Electrique
Rendement de production	334,80 %

Système de ventilation <systemevent1>

Type de ventilation	C - Alimentation naturelle, évacuation mécanique
Présence d'une ventilation à la demande	Non

Etanchéité à l'air (Valeur V50)

Mesure du débit de fuite présente	Oui
Le débit de fuite à 50 Pa par unité de surface	6,00 m ³ /(h.m ²)

Eau chaude sanitaire <instECS1>

Type d'ECS	ECS locale (dans 1 seule installation)
Boucle de circulation présente	Non

Système de production de chaleur <PAC air/eau>

Marque du produit	?
Product-ID	?
Type de générateur	Pompe à chaleur
Type de technologie de la PAC	Electrique

Puissance (nominale ou thermique)	7,00 kW
Rendement de production	192,50 %

Système de production de chaleur <R élec PAC>

Marque du produit	?
Product-ID	?
Type de générateur	Chauffage électrique par résistance
Puissance (nominale ou thermique)	2,00 kW
Rendement de production	70,00 %

Système solaire thermique

Néant

Système photovoltaïque <Panneaux photovoltaïques>

Puissance crête	5000,00
-----------------	---------

Concepts novateurs

Néant

**ANNEXE 3 : ETUDE DE FAISABILITE TECHNIQUE,
ENVIRONNEMENTALE ET ECONOMIQUE**



Étude de Faisabilité technique, environnementale et économique

Étude de faisabilité des systèmes alternatifs de production et d'utilisation d'énergie conformément au décret du 28 novembre 2013

Bâtiments simples (<1000 m²)

Rapport Étude de Faisabilité « b1 »

Scénario 1

26-09-2022

établi par le logiciel EF V 2.0 mis à disposition gratuite par le Service public de Wallonie, Département de l'énergie et du bâtiment durable ()*

() Les auteurs d'étude de faisabilité et les responsables PEB utilisent le logiciel sous leur propre responsabilité ; malgré le soin apporté à sa conception, le SPW ne peut garantir que son usage assure l'acceptation de l'étude de faisabilité par les autorités chargées de son contrôle.*

Données administratives du projet

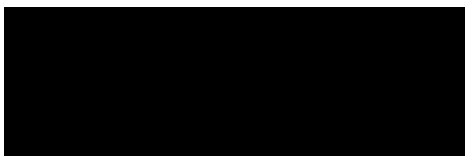


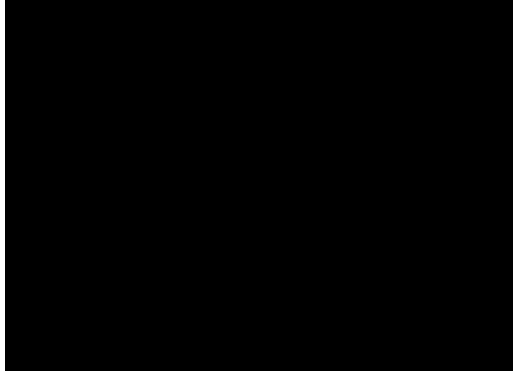
Table des matières

Table des matières	2
Etude de faisabilité	4
1. Description du projet	4
2. Présentation du bâtiment	4
3. Besoins énergétiques du bâtiment	6
4. Hypothèses	7
5. Description des technologies	7
6. Analyse de pertinence	8
7. Caractéristiques techniques des systèmes étudiés	10
8. Résultats	15
8.1 Analyse énergétique	15
8.2 Analyse environnementale	17
8.3 Analyse économique	18
9. Conclusions de l'auteur de l'étude quant au choix des technologies qu'il propose de retenir	19
10. Annexes	19

Identité, coordonnées et références d'agrément (numéro AEF) (numéro RPEB)

PEB-00494

Identité et coordonnées du déclarant PEB :



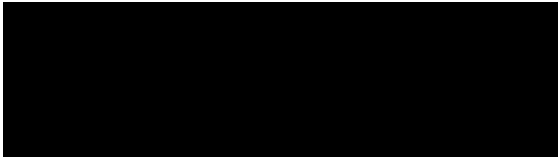
Identité et coordonnées de l'architecte :

LEGNIERE, Pierre

Quai de l'Ourthe, 12

6980 La-Roche-en-Ardenne

Identité et coordonnées du responsable PEB :



Etude de faisabilité

La présente étude est établie conformément aux prescriptions du Décret cadre du 28 novembre 2013 en vue de promouvoir la performance énergétique des bâtiments (PEB) et ses arrêtés d'application.

Lorsqu'une demande de permis d'urbanisme a pour objet la construction d'un bâtiment, l'étude de faisabilité technique, environnementale et économique et la déclaration PEB initiale sont jointes, par le déclarant PEB, au dossier de demande de permis. Cette étude a pour but d'analyser la possibilité de recourir à des systèmes de substitution à haute efficacité énergétique en se basant sur des critères objectifs (techniques, financiers ou environnementaux).

La faisabilité des systèmes de production alternative d'énergie suivants est envisagée:

- biomasse;
- panneaux solaires thermiques;
- panneaux solaires photovoltaïques;
- pompes à chaleur;
- réseau de chaleur;
- cogénération.
- combinaison solaire thermique et photovoltaïque.
- combinaison solaire thermique et pompes à chaleur.
- combinaison solaire thermique et biomasse.
- combinaison photovoltaïque et pompes à chaleur.
- combinaison photovoltaïque et biomasse.

Différents scénarios d'utilisation de ces systèmes sont étudiés de manière à définir les meilleurs moyens de couvrir les besoins pour atteindre un bilan technique, environnemental et économique optimal.

Cette étude présente les résultats et conclusions obtenus.

1. Description du projet

Construction d'une Maison d'habitation

2. Présentation du bâtiment

Le bâtiment est un bâtiment neuf ou assimilé à du neuf, présentant 1 unité(s) dont la destination est Résidentielle (et une ou plusieurs unités « Communs » éventuelles).

Caractéristiques du bâtiment

Type de toiture	toiture inclinée
Surface brute de toiture (m ²)	54
Ach* (m ²)	276
Nombre d'occupants*	5

Volume protégé total* (m ³)	945
Surface totale de déperditions* (m ²)	683

Indicateurs PEB

Niveau Ew**	36
Niveau E spec** (kWh/m ² .an)	61
Niveau K	31

* dans le cas d'un immeuble présentant plusieurs unités, les valeurs renseignées sont les valeurs globales pour le bâtiment.

** dans le cas d'un immeuble présentant plusieurs unités, les valeurs du tableau indiquées pour les indicateurs PEB sont des moyennes pondérées (sur la surface chauffée), calculées par le logiciel. Elles ne sont pas donc pas directement extraites des données .xml PEB.

		Entrée utilisateur	Unité
Paramètres financiers	Taux de TVA appliqué à l'investissement dans le système de production d'énergie	21	%
	Subsides solaire thermique	0	€
	Subsides photovoltaïque	0	€
	Subsides pompe à chaleur	0	€
	Subsides biomasse	0	€
Consommation d'électricité	Consommation d'électricité extraite des données PEB + estimation de la consommation des électroménagers des bâtiments résidentiels	4273	kWh
Bâtiment	Affectation du bâtiment	Résidentielle	-
	Toiture	toiture inclinée	-
	Surface maximale brute de toiture	54	m ²
	Estimation de l'ombrage sur la toiture	0	%
	Surface du local technique	11	m ²
	Y a-t-il un besoin d'ECS durant les mois de mai à septembre ?	oui	-

	Nombre de douches dans le bâtiment	3	-
	Nombre de salles de bain dans le bâtiment	2	-
	Méthode d'estimation de la consommation d'ECS	nombre d'occupants (7j/7)	-
	Nombre d'occupants du bâtiment	5	pers
	Niveau de consommation individuel	40	l/pers.j
Terrain environnant	Surface de terrain disponible	350.0	m ²
	Type de sol	Argileux sec	-
	Emplacement pour unité extérieure (PAC)	Disponible	-
	Avez-vous connaissance de l'existence d'un réseau de chaleur localisé à moins de 500 m (à vol d'oiseau) du bâtiment projeté?	non	-
	Volume disponible pour le stockage de combustible	4	m ³
	Distance de transport entre le stockage de granulés et la chaudière	1	m
	Distance entre le stockage et la zone de livraison	10	m
	Différence de hauteur entre le stockage de granulés et la chaudière	0	m

3. Besoins énergétiques du bâtiment

Les besoins énergétiques du bâtiment proviennent soit de la PEB, soit d'une évaluation du logiciel EF sur base des données entrées par l'utilisateur.

Besoins nets de chaleur (kWh/an)

Chauffage	18600	PEB
ECS	2971	Calcul EF
TOTAL CHAUD	21571	

Besoins nets de refroidissement (kWh/an)

Refroidissement	1694	PEB
TOTAL FROID	1694	

Consommation électrique totale (kWh/an)

Eclairage	618	calcul EF
Electroménager	2640	calcul EF
Auxiliaires	1015	PEB

Froid	753	PEB
<u>TOTAL ELECTRICITE pour 1 unité</u>	5026	

La consommation due à l'éclairage et à l'électroménager équivaut à 3258 kWh/an, en considérant que 50% des lampes installées sont munies d'ampoules économiques. La consommation des électroménagers est estimée selon les hypothèses suivantes:

- lessiveuse: 2.03 kWh par cycle;
- sèche-linge: 6.53 kWh par cycle;
- lave-vaisselle: 2.45 kWh par cycle;
- 275 kWh pour l'ensemble des équipements de cuisine (four, cuisinière, frigo, congélateur) et des appareils en veille dans les pièces de vie;
- La consommation des autres appareils électriques est négligée.

Dans le logiciel EF, la consommation électrique liée à l'éclairage et à l'électroménager est augmentée de 20% pour tenir compte de la présence d'équipements audiovisuels et informatiques,... Ce facteur est déjà inclus dans la valeur affichée dans le tableau ci-dessus.

4. Hypothèses

Les différentes hypothèses concernant les paramètres financiers, énergétiques, environnementaux, et techniques sont présentés en annexe.

5. Description des technologies

Chaudière à pellets

La chaudière à pellets fonctionne globalement comme une chaudière traditionnelle avec une alimentation en combustible automatisée. Les granulés de bois brûlés, appelés également pellets, sont principalement issus du compactage de résidus de scierie. La chaleur produite par la combustion est transmise au fluide caloporteur du circuit de chauffage (souvent de l'eau) et éventuellement à un ballon d'eau chaude sanitaire.

La combustion du bois produit des cendres. La plupart des systèmes sur le marché proposent le nettoyage automatique et l'évacuation des cendres vers un bac qui doit être vidé deux à trois fois par an. Les granulés de bois doivent être certifiés selon une norme du type DIN plus et stockés dans une réserve propre et sèche (silo de stockage).

Pompe à chaleur

Le principe d'une pompe à chaleur est de transférer, via un cycle frigorifique fonctionnant grâce à un appoint mécanique (moteur électrique le plus souvent), l'énergie contenue dans une « source froide » gratuite (soit le milieu où l'énergie est captée) vers un autre milieu (source chaude). Le COP (ou coefficient de performance) d'une pompe à chaleur représente le rapport entre la quantité d'énergie thermique produite à la sortie du système et la quantité d'énergie électrique fournie à la pompe. Un COP de 3 signifie donc que pour 1 kWh (électrique) fourni à la pompe à chaleur, il y a 3 kWh (thermique) disponibles en sortie. D'un point de vue énergétique, cette technologie est donc très intéressante si elle n'avait le désavantage de fonctionner en général à l'électricité du réseau qui est produite et transportée avec un rendement généralement faible (de l'ordre de 30 % à 40 %).

Il existe différentes technologies fonction de la source où l'énergie est captée (air/sol/eau) et du mode de restitution de la chaleur à l'intérieur d'un bâtiment (chauffage par l'air ou l'eau).

La pompe à chaleur sol-eau utilise le sol comme source froide. L'échangeur de chaleur horizontal consiste en un ou plusieurs circuits d'eau glycolée enterrés à une profondeur entre 1,2 et 1,5 m. La surface du capteur dépend des besoins de chaleur à couvrir et du type de sol.

Le système transmet la chaleur à l'eau du circuit de chauffage constitué d'émetteurs basse température (plancher chauffant, ventilo-convecteur).

Dans le cas de la pompe à chaleur air-eau, l'énergie est captée dans l'air extérieur. Le système transmet la chaleur à l'eau du circuit de chauffage constitué d'émetteurs basse température (plancher chauffant, ventilo-convecteur).

Réseau de chaleur

Un réseau de chaleur fonctionne comme un circuit de chauffage central mais à l'échelle du quartier. Chaque bâtiment est raccordé au réseau via une sous-station équipée d'un échangeur de chaleur qui transfère la chaleur aux installations de chauffage et d'ECS du bâtiment.

Cogénération

La cogénération est la production simultanée de chaleur et d'électricité.

L'installation est dimensionnée sur la base de la demande en chaleur. On parle de « cogénération de qualité » si une économie de 10 % de CO₂ est réalisée par rapport aux émissions de CO₂ d'une chaudière et d'une centrale électrique qui produiraient les mêmes quantités de chaleur et d'électricité.

Panneaux solaires thermiques

Un ou plusieurs capteurs solaires thermiques sont utilisés pour capter l'énergie lumineuse du rayonnement solaire et la transmettre à un fluide caloporteur. Il existe différents types de capteurs (absorbeur, capteurs plans vitrés et capteurs à tubes sous vide).

Solaire photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques sont constitués de cellules photovoltaïques qui produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire. Ce courant est ensuite transformé en courant alternatif conforme au réseau par un onduleur.

Plusieurs technologies sont disponibles: monocristallins, polycristallins, amorphes ou en « couches minces ».

6. Analyse de pertinence

Le système de production d'énergie « traditionnel » utilisé comme référence dans la comparaison comporte un(e) Pompe à chaleur pour le chauffage des locaux et un(e) Pompe à chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire.

La production de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire est effectuée de manière combinée.

Les technologies de production d'énergie renouvelable pour lesquelles un pré-dimensionnement chiffré ne se justifie pas sont rejetées sur base des arguments techniques résumés ci-dessous.

Les variantes sont analysées indépendamment l'une de l'autre et selon l'usage, à savoir chauffage, ECS, refroidissement et production d'électricité. Certaines technologies, comme la pompe à chaleur, peuvent avoir plusieurs finalités.

- technologies pertinentes, faisant l'objet d'un pré-dimensionnement indicatif, ainsi que d'une analyse économique, environnementale et énergétique.
- technologies potentiellement intéressantes mais devant faire l'objet d'une analyse complémentaire afin de vérifier leur pertinence.
- technologies non pertinentes pour le scénario considéré.

Solaire thermique

- La toiture semble être de taille suffisante et inclinée de manière optimale (dans le cas d'une toiture inclinée) pour accueillir des panneaux solaires thermiques et assurer une couverture solaire de 60% des besoins en ECS. Ces derniers sont suffisamment importants et constants pour justifier l'installation d'un système solaire thermique. La taille du local technique semble également être suffisamment grande.

Photovoltaïque:

- La toiture semble être de taille suffisante et inclinée de manière optimale (dans le cas d'une toiture inclinée) pour accueillir des panneaux solaires photovoltaïques

Pompes à chaleur:

- Le type d'émetteurs considérés permet l'utilisation d'une **pompe à chaleur classique** (basse température). Un stockage d'eau chaude et un ballon d'eau morte sont/doivent être installés pour assurer un fonctionnement optimal. La taille du local technique semble appropriée pour accueillir les différents composants de la pompe à chaleur.

Pompe à chaleur sol (eau glycolée) - eau:

- La surface de terrain disponible ne permet pas d'extraire suffisamment de puissance pour alimenter la pompe à chaleur.
 - **Pompe à chaleur air - eau:** Un emplacement extérieur est disponible pour permettre l'installation de l'unité extérieure de la pompe à chaleur.
- **Pompe à chaleur air - air:**
 - Une pompe à chaleur air-air ne peut pas servir à la production combinée de chauffage et d'ECS.

Chaudière à pellets:

- L'emplacement prévu pour le stockage est insuffisant pour un remplissage annuel. Veuillez prévoir un espace plus grand. Des solutions existent pour le stockage à l'extérieur (sous abri) ou dans le sol. Ces solutions ne sont pas envisagées par le logiciel.
- L'utilisation d'un poêle à pellets nécessite des besoins en chaleur du bâtiment suffisamment faibles (inférieurs à 10W/m²) pour garantir le confort dans toutes les pièces de vie.

Réseau de chaleur:

- Le raccordement à un réseau de chaleur distant de plus de 500 m n'est pas envisageable pour un bâtiment de cette taille. Aucune possibilité de connexion à un réseau de chaleur connu de l'utilisateur. **A noter** : Plusieurs réseaux de chaleur plus ou moins importants sont exploités en Wallonie. L'administration communale du lieu où est situé le bâtiment

- peut vous aider à identifier la présence ou le projet de construction d'un réseau de chaleur à proximité (maximum 500 mètres à vol d'oiseau). Dans l'affirmative, les possibilités de raccordement méritent d'être étudiées en détails, en particulier si le bâtiment est située dans une zone densément peuplée et s'inscrit dans un projet de développement urbain plus important (quartier, site, lotissement,...).

Cogénération:

- Le besoin de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (issu de la PEB) est a priori suffisant pour envisager l'installation d'un système de cogénération. D'autres critères doivent cependant également être satisfaits, en particulier:
 - Une distribution de chaleur la plus constante possible sur l'année, afin que le moteur du cogénérateur tourne minimum 2500 heures par an (idéalement 4000 heures/an et au-delà)
 - La connaissance des profils détaillés d'utilisation de l'électricité et de la chaleur dans le bâtiment (ou la partie du bâtiment) desservie par l'installation.
 - Un code EAN unique auquel associer l'électricité produite par le cogénérateur. Pour un immeuble de logements collectifs, seuls les « Communs » seront donc alimentés en électricité produite par cogénération. L'électricité produite en excès au niveau des communs sera réinjectée sur le réseau.
 - Le dimensionnement fin d'une cogénération est complexe et dépend énormément du profil d'utilisation de la chaleur, impossible à modéliser dans cet outil. L'outil COGENsim est disponible gratuitement sur le site portail de l'énergie en Wallonie pour effectuer un dimensionnement plus précis. Vous pouvez également vous adresser à un bureau agréé pour les études de faisabilité énergies renouvelables/cogénération en Wallonie.

7. Caractéristiques techniques des systèmes étudiés

Les dimensionnements de la solution de référence ainsi que des différentes technologies renouvelables étudiées sont reprises au tableau ci-dessous.

Technologie de base	
Générateur de chaleur (chauffage)	Chaudière à condensation
Vecteur	Gaz
Puissance	14 kW
Rendement (sur PCS)	335
Rendement de distribution, émission et stockage	85
Production de chaleur pour le chauffage et l'ECS	Combinée
Générateur de chaleur (ECS)	Même chaudière que pour le chauffage
Rendement de production, distribution et stockage	46
Chauffe-eau solaire	
Surface optique de capteurs (m ²)	4.2
Estimation du nombre de capteurs solaires thermiques correspondant (-)	2
Volume de stockage solaire (litres)	250
Inclinaison des capteurs (°)	33

Orientation des capteurs	est
Fraction solaire utile (-)	0.60
% de surface utile de la toiture couverte par les capteurs solaires thermiques	8
Panneaux photovoltaïques	
Puissance du système (kWc)	5.4
Surface estimée des panneaux (m ²)	34.5
% de surface utile de la toiture couverte par les panneaux PV	64
Inclinaison des capteurs (°)	33
Orientation des capteurs	est
Pompe à chaleur air - eau	
COP _{test} dans les conditions A2/W35	3.1
Puissance de la pompe à chaleur air - eau (kW)	14 (dans les conditions A2/W45)
Coefficient de performance saisonnier - SPF (sans la résistance électrique éventuelle)	2.83
Pourcentage de couverture (besoins) de la résistance électrique	20
Volume tampon (litres)	234
Panneaux solaires thermiques	
Surface optique de capteurs ST (m ²)	4.2
Estimation du nombre de capteurs solaires thermiques correspondant (-)	2
Volume de stockage solaire (litres)	250
Inclinaison des capteurs ST (°)	33
Orientation des capteurs ST	est
Fraction solaire utile (-)	0.60
% de surface utile de la toiture couverte par les capteurs solaires thermiques	8
Puissance du système (kWc)	5.4
Surface estimée des panneaux PV (m ²)	34.5
% de surface utile de la toiture couverte par les panneaux PV	64
Inclinaison des capteurs PV (°)	33
Orientation des capteurs PV	est
Pompe à chaleur air - eau + ST	
COP _{test} dans les conditions A2/W35	3.1
Puissance de la pompe à chaleur air - eau (kW)	14 (dans les conditions A2/W45)
Coefficient de performance saisonnier - SPF (sans l'impact de la résistance électrique éventuelle)	2.83
Pourcentage de couverture (besoins) de la résistance électrique	20
Volume tampon (litres)	234

Surface optique de capteurs ST (m ²)	4.2
Estimation du nombre de capteurs solaires thermiques correspondant (-)	2
Volume de stockage solaire (litres)	250
Inclinaison des capteurs (°)	33
Orientation des capteurs	est
Fraction solaire utile (-)	0.60
% de surface utile de la toiture couverte par les capteurs solaires thermiques	8
Pompe à chaleur air - eau + PV	
COP _{test} dans les conditions A2/W35	3.1
Puissance de la pompe à chaleur air - eau (kW)	Puissance 14 (dans les conditions A2/W45)
Coefficient de performance saisonnier (sans l'impact de la résistance électrique éventuelle) - SPF	2.83
Pourcentage de couverture (besoins) de la résistance électrique	20
Volume tampon (litres)	234
Puissance du système PV (kWc)	5.4
Surface estimée des panneaux (m ²)	34.5
% de surface utile de la toiture couverte par les panneaux PV	64
Inclinaison des capteurs (°)	33
Orientation des capteurs	est

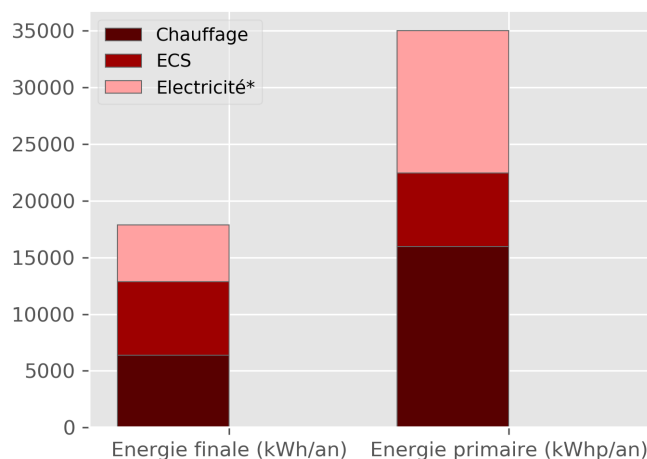
Solaire thermique		Photovoltaïque		PAC air-eau	
Bilan énergétique		Bilan énergétique		Bilan énergétique	
Production solaire annuelle nette (kWh/an)	1783.0	Production d'électricité verte (kWh/an)	4273.0	Energie primaire économisée par rapport à la référence (kWh/an)	-1659.0
Production spécifique (kWh/m ² .an)	557.0	Production spécifique (kWh/kWc)	794.0		
Economie de gaz (kWh/an)	2476.0	Energie primaire économisée par rapport à la référence (kWh/an)	10683.0		
Energie primaire économisée par rapport à la référence (kWh/an)	2476.0				
Bilan économique		Bilan économique		Bilan économique	
Investissement (€, hors TVA, hors subsides)	5557	Investissement (€, hors TVA, hors subsides)	7894.0	Investissement (€, hors TVA, hors subsides)	10573
Taux de rentabilité interne (%)	0.0	Coût d'investissement spécifique (€/kWc, hors TVA, hors subsides)	1466.0	Taux de rentabilité interne (%)	0
Temps de retour simple (années)	supérieur à 20 ans	Taux de rentabilité interne (%)	11.5	Temps de retour simple (années)	supérieur à 20 ans
Valeur actualisée nette (€)	-4649	Temps de retour simple (années)	8.2	Valeur actualisée nette (€)	-31127
La période de calcul pour la valeur actualisée nette (années)	20	Valeur actualisée nette (€)	6626.0	La période de calcul pour la valeur actualisée nette (années)	20
		La période de calcul pour la valeur actualisée nette (années)	20.0		
Bilan environnemental		Bilan environnemental		Bilan environnemental	
CO2 économisé par rapport à la référence (kg/an)	451.0	CO2 économisé par rapport à la référence (kg/an)	1184.0	CO2 économisé par rapport à la référence (kg/an)	1822.0

ST + PV		ST + PAC air-eau		PV + PAC air-eau	
Bilan énergétique		Bilan énergétique		Bilan énergétique	
Production solaire annuelle nette (kWh/an)	1783.0	Production solaire annuelle nette (kWh/an)	1783.0	Production d'électricité verte (kWh/an)	6681.0
Production spécifique (kWh/m².an)	557.0	Production spécifique (kWh/m².an)	557.0	Production spécifique (kWh/kWc)	794.0
Economie de gaz (kWh/an)	2476.0	Energie primaire économisée (ST+PAC) par rapport à la référence (kWh/an)	817.0	Energie primaire économisée (PV+PAC) par rapport à la référence (kWh/an)	15044.0
Production d'électricité verte (kWh/an)	4273.0				
Production spécifique (kWh/kWc)	794.0				
Energie primaire économisée (ST+PV) par rapport à la référence (kWh/an)	13159.0				
Bilan économique		Bilan économique		Bilan économique	
Investissement brut (ST+PV) (€, hors subsides)	13451.0	Investissement brut (ST+PAC) (€, hors subsides)	16130	Investissement brut (PV+PAC) (€, hors subsides)	22319
Taux de rentabilité interne (%)	6.3	Taux de rentabilité interne (%)	0	Taux de rentabilité interne (%)	0.0
Temps de retour simple (années)	11.9	Temps de retour simple (années)	supérieur à 20 ans	Temps de retour simple (années)	supérieur à 20 ans
Valeur actualisée nette (€)	1976.0	Valeur actualisée nette (€)	-35776	Valeur actualisée nette (€)	-19968
La période de calcul pour la valeur actualisée nette (années)	20.0	La période de calcul pour la valeur actualisée nette (années)	20	La période de calcul pour la valeur actualisée nette (années)	20
Bilan environnemental		Bilan environnemental		Bilan environnemental	
CO2 économisé (ST+PV) par rapport à la référence (kg/an)	1634.0	CO2 économisé (ST+PAC) par rapport à la référence (kg/an)	2273.0	CO2 économisé (PV+PAC) par rapport à la référence (kg/an)	3673.0

8. Résultats

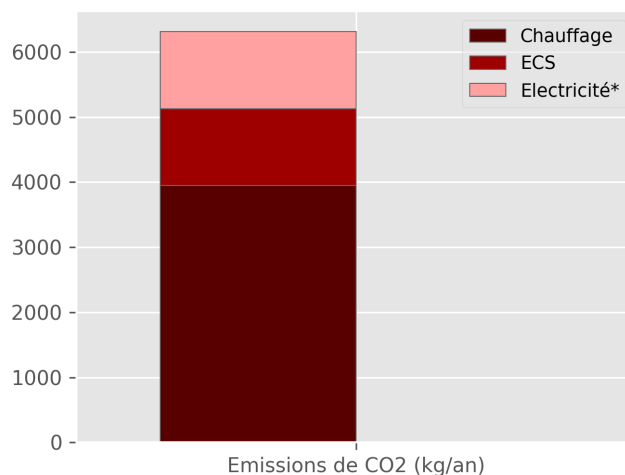
Les consommations d'énergie primaire nécessaires peuvent être estimées ainsi que les émissions globales de CO₂ associées.

Consommation pour la technologie de référence



*éclairage, électroménager, auxiliaires, froid éventuel

Emissions de CO₂ annuelles pour la technologie de référence



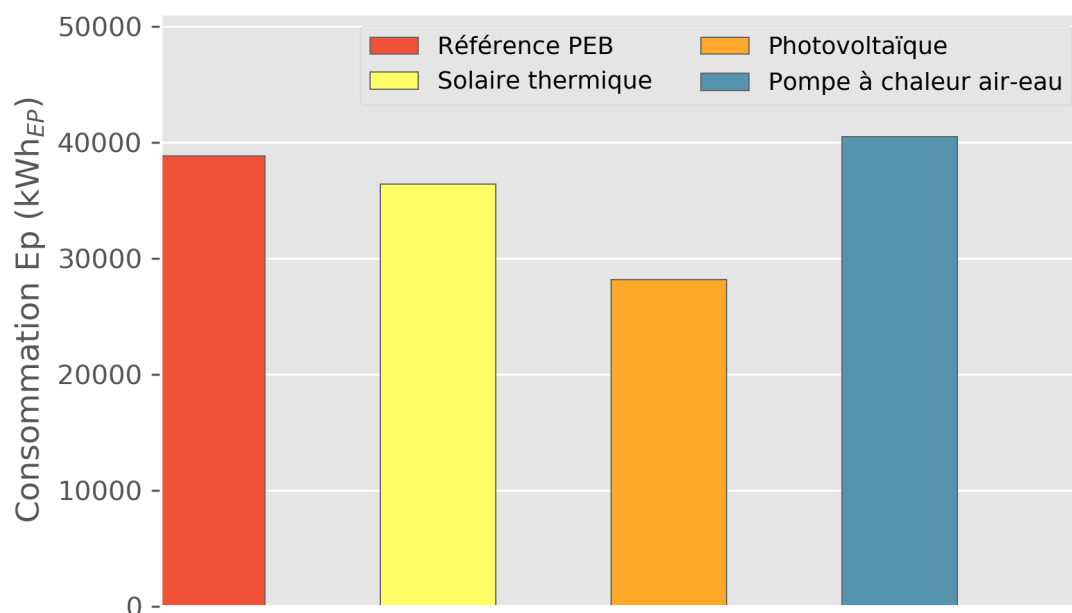
*éclairage, électroménager, auxiliaires, froid éventuel

Le tableau ci-dessous reprend les résultats de bilans environnementaux, économiques et énergétiques de la solution de référence et des différentes technologies renouvelables étudiées

8.1 Analyse énergétique

Technologies seules

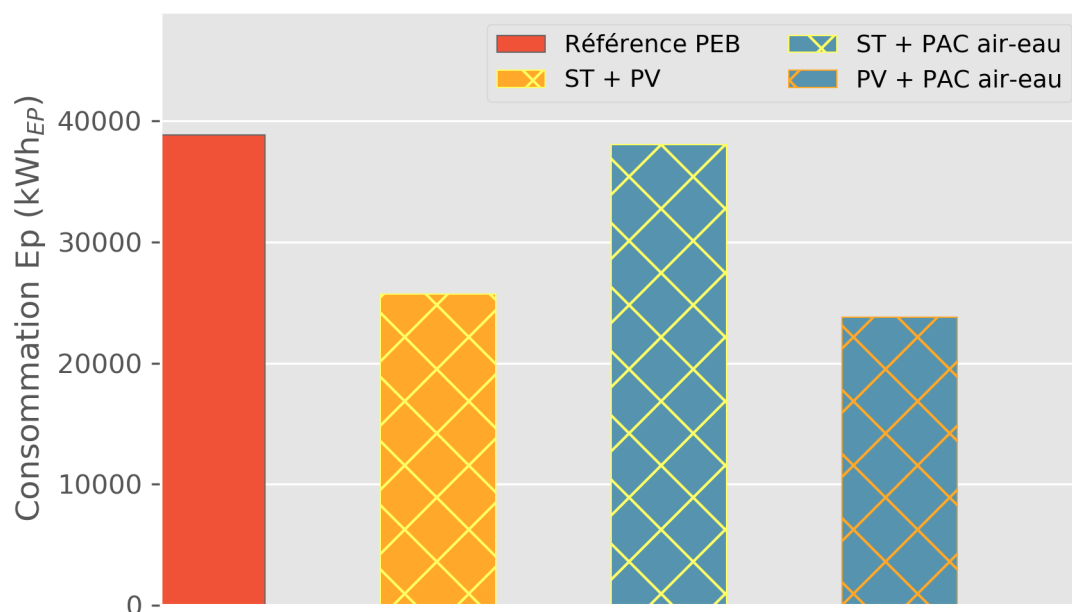
La consommation globale en énergie primaire (chauffage, ECS, refroidissement, auxiliaires, éclairage et électroménager) est illustrée pour chacune des technologies sur le graphique suivant.



Plus la valeur obtenue pour la situation avec énergie renouvelable est inférieure à la valeur de référence, plus la consommation en énergie primaire économisée est importante.

Technologies combinées

La consommation globale en énergie primaire (chauffage, ECS, refroidissement, auxiliaires, éclairage et électroménager) est illustrée pour chaque combinaison de technologies choisie sur le graphique suivant.

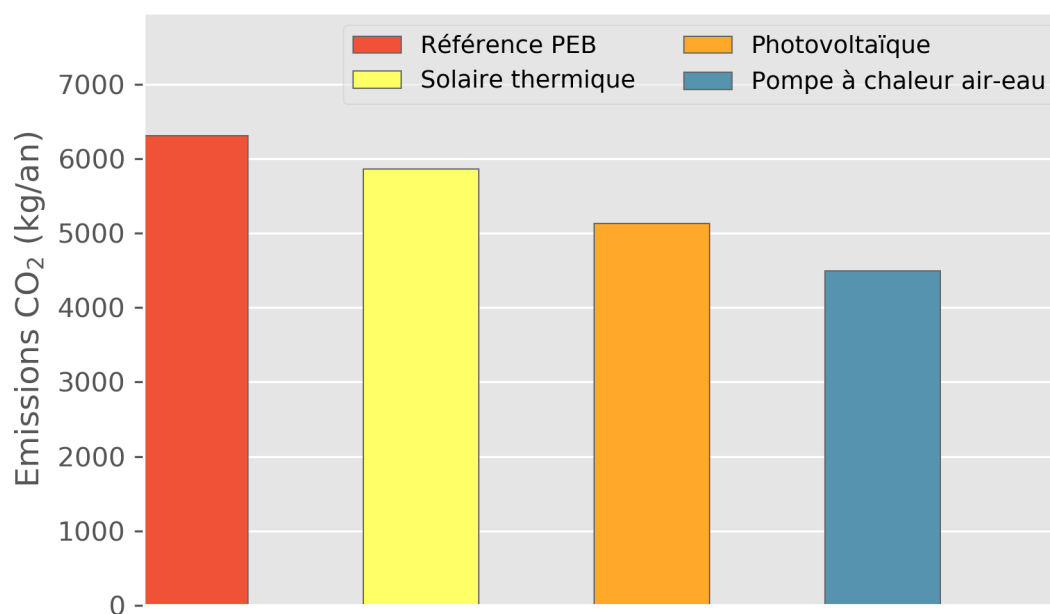


Plus la valeur obtenue pour la situation avec énergie renouvelable est inférieure à la valeur de référence, plus la consommation en énergie primaire économisée est importante.

8.2 Analyse environnementale

Technologies seules

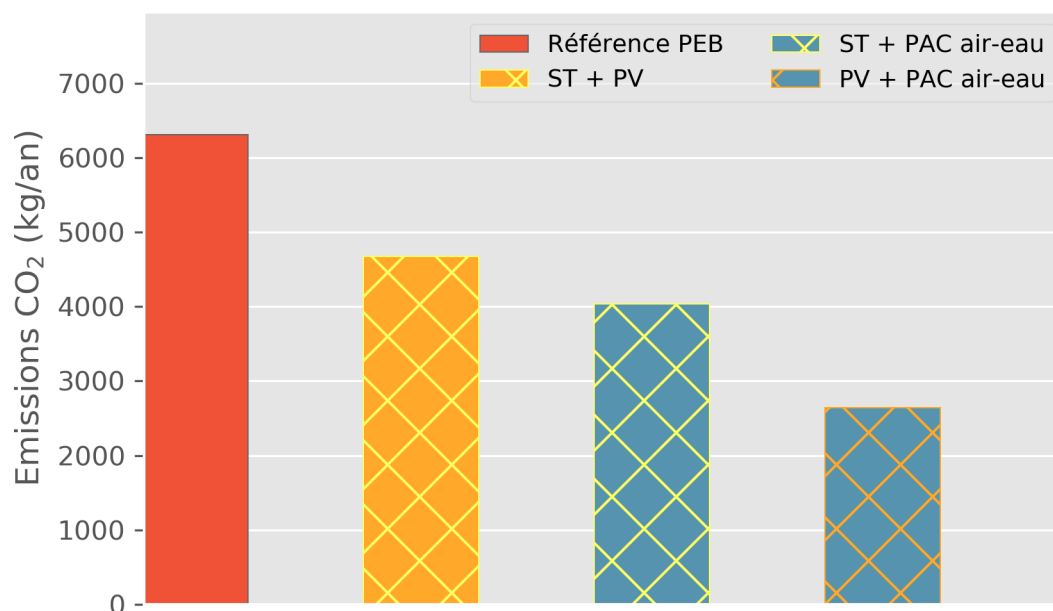
Les émissions annuelles de CO₂ pour le chauffage, l'ECS, le refroidissement, les auxiliaires, l'éclairage et l'électroménager sont illustrées pour chacune des technologies sur le graphique suivant.



Plus l'écart entre la référence et le scénario avec énergie renouvelable est important, plus les émissions de CO₂ évitées sont importantes

Technologies combinées

Les émissions annuelles de CO₂ pour le chauffage, l'ECS, le refroidissement, les auxiliaires, l'éclairage et l'électroménager sont illustrées pour chacune des combinaisons de technologies choisies sur le graphique suivant.



Plus l'écart entre la référence et le scénario avec énergie renouvelable est important, plus les émissions de CO₂ évitées sont importantes

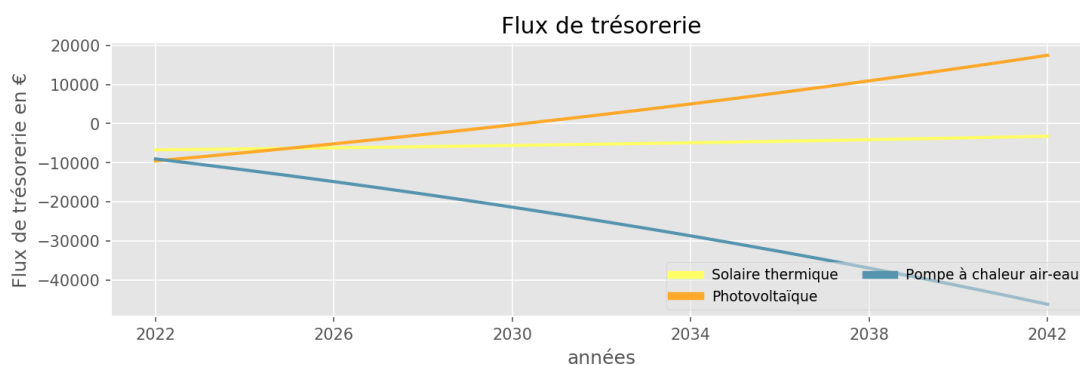
8.3 Analyse économique

Technologies seules

	Investissement (€ TVAC, subsides déduits)	Frais opérationnels (€ TVAC)	TRS (ans)	VAN (€) sur 20 ans	TRI (%)
Référence	3765	56	-	-	-
Solaire thermique	6725	34	supérieur à 20 ans	-4649	0.0
Solaire photovoltaïque	9552	72	8.2	6626	11.5
Pompe à chaleur air-eau	12793	128	supérieur à 20 ans	-31127	0

Le logiciel présente des **graphiques financiers relatifs**. Cela signifie que:

- lorsque le producteur de chaleur est remplacé (pompes à chaleur et biomasse), le coût d'investissement correspond à un surcoût: le coût de la technologie étudiée, moins celui de la technologie de référence
- lorsque le producteur de chaleur est conservé (solaire thermique et photovoltaïque), le coût d'investissement correspond uniquement à celui de la technologie étudiée



Technologies combinées

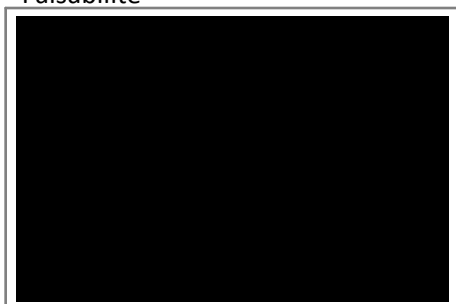
	Investissement (€ TVAC, subsides déduits)	Frais opérationnels (€ TVAC)	TRS (ans)	VAN (€) sur 20 ans	TRI (%)
Référence	3765	56	-	-	-
ST + PV	16276	-105	11.9	1976	6.3
Pompe à chaleur air-eau + ST	19517	-162	supérieur à 20 ans	-35776	0
Pompe à chaleur air-eau + PV	27006	-235	supérieur à 20 ans	-19968	0.0

9. Conclusions de l'auteur de l'étude quant au choix des technologies qu'il propose de retenir

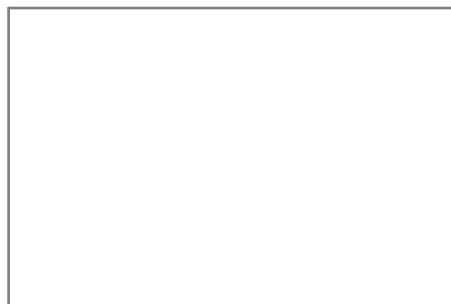
Sur base des différentes technologies étudiées, les conclusions de l'auteur de l'étude de faisabilité sont les suivantes:

Une installation photovoltaïque semble intéressante, elle peut être couple avec une PAC.

Signature de l'auteur de l'Etude de Faisabilité



Signature du déclarant PEB



10. Annexes

Hypothèses propres au bâtiment	Valeurs de la base de données	Valeurs utilisateur	Justification
Besoin net en chauffage (kWh)	18600		

Rendement d'émission du système de chauffage individuel	0.89		
Rendement d'émission du système de chauffage collectif	0.85		
Estimation du coût du système d'émission (hydraulique) (€)	0.00		
Estimation du coût du système de distribution hydraulique (€)	0.00		
Rendement de distribution du système de chauffage (dans le volume protégé)	1.00		
Rendement de distribution du système de chauffage (hors volume protégé)	0.95		
Rendement de stockage du chauffage (dans le volume protégé)	1.00		
Rendement de stockage du chauffage (hors volume protégé)	0.97		
Paramètres financiers généraux			
Période d'évaluation pour le résidentiel (années)	20		
Période d'évaluation pour le non-résidentiel (années)	20		
Taux d'actualisation pour le résidentiel (-)	5.0		
Taux d'actualisation pour le non-résidentiel (-)	6.5		
Taux d'inflation applicable à tous les coûts hors énergie (-)	2.0		
Evolution du prix de l'électricité (-)	3.0		
Evolution du prix de l'électricité injectée sur le réseau (-)	3.0		
Evolution du prix du gaz (-)	3.0		
Evolution du prix du propane (-)	3.0		

Evolution du prix du pellet (-)	3.0		
Evolution du prix du mazout (-)	3.0		
Prix de l'énergie			
Prix de l'électricité (€ HTVA/kWh)	0.2181		
Prix de l'électricité injectée sur le réseau (€ HTVA/kWh)	0.0450		
Prix du gaz (€ HTVA/kWh)	0.0537		
Prix du propane (€ HTVA/kWh)	0.0570		
Prix du pellet (€ HTVA/kWh)	0.0421		
Prix du mazout (€ HTVA/l)	0.6109		
Facteurs de conversion en kWh			
Facteur de conversion en kWh pour le mazout (kWh/l)	10.78		
Coefficients d'émission de CO₂			
Emissions de CO ₂ liée à la production d'électricité (kg CO ₂ /kWh _p)	0.111		
Emissions de CO ₂ liée à la combustion du gaz naturel (kg CO ₂ /kWh _p)	0.182		
Emissions de CO ₂ liée à la combustion du propane (kg CO ₂ /kWh _p)	0.221		
Emissions de CO ₂ liées à la combustion du mazout (kg CO ₂ /kWh _p)	0.252		
Emissions de CO ₂ liées à la combustion de pellets (kg CO ₂ /kWh _p)	0.011		
Facteurs de conversion en énergie primaire			
Facteur de conversion en énergie primaire pour l'électricité (-)	2.5		
Facteur de conversion en énergie primaire pour le gaz naturel (-)	1.0		

Facteur de conversion en énergie primaire pour le propane (-)	1.0		
Facteur de conversion en énergie primaire pour le mazout (-)	1.0		
Facteur de conversion en énergie primaire pour la biomasse (pellets) (-)	1.0		
Solaire thermique			
Surface brute de capteur (m ²)	2.5		
Rendement de production du capteur solaire thermique plan vitré (-)	0.5		
Hauteur angulaire du soleil pour éviter l'ombrage entre deux rangées de capteurs (°)	20		
Coût de maintenance (% du coût d'investissement)	0.5		
Durée de vie du système solaire thermique dans le résidentiel (ans)	20		
Durée de vie du système solaire thermique dans le tertiaire (ans)			
Photovoltaïque			
Irradiation solaire moyenne sur une surface orientée sud et inclinée à 35° (kWh/m ² .an)	1166		
Seuil de puissance en-dessous duquel le principe de compensation s'applique (kWc)	10.0		
Taille d'un module PV standard (m ²)	1.60		
Ratio de performance du système PV (-)	82.0		
Hauteur angulaire du soleil pour éviter l'ombrage entre deux rangées de panneaux (°)	17.0		
Inclinaison par défaut considérée pour un toit plat (°)	15.0		

Coût de maintenance (% du coût d'investissement)	0.8		
Durée de vie du système solaire photovoltaïque dans le résidentiel (ans)	20		
Durée de vie du système solaire photovoltaïque dans le tertiaire (ans)	25		
Pompe à chaleur sol-eau			
Coût de maintenance d'une PAC sol (eau glycolée)-eau dans le résidentiel (% du coût d'investissement)	0.5		
Coût de maintenance d'une PAC sol (eau glycolée)-eau dans le tertiaire (% du coût d'investissement)	0.5		
Durée de vie d'une PAC sol (eau glycolée)-eau dans le résidentiel (ans)	20		
Durée de vie d'une PAC sol (eau glycolée)-eau dans le tertiaire (ans)	20		
COP _{test} dans les conditions B0/W35	4.30		
COP dans les conditions B0/W45	3.50		
COP dans les conditions B0/W55	2.80		
Pompe à chaleur air-eau			
Coût de maintenance d'une PAC air-eau dans le résidentiel (% du coût d'investissement)	1.0		
Coût de maintenance d'une PAC air-eau dans le tertiaire (% du coût d'investissement)	1.0		
Durée de vie d'une PAC air-eau dans le résidentiel (ans)	20		
Durée de vie d'une PAC air-eau dans le tertiaire (ans)	20		
COP _{test} dans les conditions A2/W35	3.10		

COP dans les conditions A2/W45	2.60		
COP dans les conditions A2/W55	1.68		
Pompe à chaleur air-air			
Coût de maintenance d'une PAC air-air dans le résidentiel (% du coût d'investissement)	1.0		
Coût de maintenance d'une PAC air-air dans le tertiaire (% du coût d'investissement)	1.0		
Durée de vie d'une PAC air-air dans le résidentiel (ans)	20		
Durée de vie d'une PAC air-air dans le tertiaire (ans)	20		
COP dans les conditions A2/A20	3.20		
Biomasse			
Coût de maintenance (% du coût d'investissement)	1.5		
Durée de vie d'une chaudière à pellets dans le résidentiel (ans)	20		
Durée de vie d'un poêle à pellets dans le résidentiel (ans)	20		
Durée de vie d'une chaudière à pellets dans le tertiaire (ans)	25		
Durée de vie d'un poêle à pellets dans le tertiaire (ans)	25		
Rendement de production (PCS) de la chaudière à pellets pour le chauffage (-)	0.92		
Rendement de production (PCS) du poêle à pellets pour le chauffage (-)	0.70		