

## Mémoire

**Auteur** : Wachtelaer, Vincent

**Promoteur(s)** : Abrahams, Pauline; 2770

**Faculté** : Faculté des Sciences

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

**Année académique** : 2023-2024

**URI/URL** : <http://hdl.handle.net/2268.2/20816>

---

### *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**

**ÉTUDE DU POTENTIEL DES SURFACES RÉFLÉCHISSANTES EN TANT QUE MESURE  
D'ADAPTATION DU BÂTI RÉSIDENTIEL BELGE EXPOSÉ AUX VAGUES  
DE CHALEUR INDUITES PAR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE**

**VINCENT WACHTELAER**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DES DIPLÔMES DE**

**MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT – FINALITÉ ÉNERGIES RENOUVELABLES ET  
BÂTIMENTS DURABLES (ULIÈGE)**

**MASTER EN DEVELOPPEMENT DURABLE – FINALITÉ ÉNERGIE-ENVIRONNEMENT (UNI.LU)**

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2023-2024**

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

**COMITÉ DE LECTURE :  
ELISABETH DAVIN  
GRATIEN KIKI  
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.

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

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : WACHTELAER Vincent  
vincent.wachtelaer@hotmail.com

## **ABSTRACT**

The combined effects of climate change and the urban heat island phenomenon are increasing the vulnerability of cities to overheating, directly threatening the comfort and health of residents. Addressing this issue requires two complementary responses: mitigation and adaptation. With Belgium aiming to renovate its entire housing stock by 2050, this could be a unique opportunity to integrate these two approaches. In this context, cool roofs could be an attractive adaptation option, as their effectiveness has already been widely demonstrated in hot climates. The purpose of this study is to assess their thermal and energy performance in Belgium's current and future climates using a succession of dynamic simulations performed with TRNSYS. At the same time, the contribution of occupant behavior is considered by simultaneously incorporating solar shading management and the free cooling provided by night-time ventilation. The results suggest that the ability of cool roofs to reduce overheating is rather limited compared with the passive behaviors. Moreover, the energy savings associated with the reduction of cooling loads in hot weather are insufficient to offset the increase of heating loads during colder months. Nevertheless, considering the effect of increased solar reflectivity on the urban heat island phenomenon could considerably improve the overall balance. Therefore, cool roofs should exclusively be considered as part of a broader strategy that includes passive measures and behavioral awareness to effectively adapt to the challenges of climate change.

## **RÉSUMÉ**

Le double effet du changement climatique et du phénomène d'îlot de chaleur urbain contribue à accroître la vulnérabilité des villes à la surchauffe, menaçant directement le confort et la santé des habitants. Face à ce constat, il existe deux réponses complémentaires : l'atténuation et l'adaptation. La Belgique ambitionne de rénover énergétiquement l'ensemble du parc résidentiel d'ici 2050, ce qui constitue une opportunité unique d'intégrer ces deux approches. Les toitures réfléchissantes, dont l'efficacité a déjà été largement démontrée dans les climats chauds, pourraient être une piste d'adaptation. Ce travail cherche à évaluer leur performance thermique et énergétique pour le climat belge actuel et futur au moyen d'une série de simulations dynamiques réalisées avec le logiciel TRNSYS. En parallèle, le rôle du comportement des occupants est considéré en incorporant simultanément une gestion des protections solaires et le recours à la ventilation nocturne. Les résultats suggèrent que la capacité de réduction de la surchauffe des toitures réfléchissantes est plutôt limitée par rapport aux comportements passifs. Par ailleurs, les gains énergétiques liés à la diminution des besoins en refroidissement ne parviennent pas à compenser l'augmentation des besoins en chauffage. Toutefois, la prise en compte de l'effet d'une augmentation de la réflectivité solaire sur le phénomène d'îlot de chaleur urbain pourrait considérablement améliorer le bilan global. Quoiqu'il en soit, l'adoption de pratiques thermiques adéquates sera essentielle pour limiter les impacts du changement climatique.

## REMERCIEMENTS

Ce travail de longue haleine n'aurait pu aboutir sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes, à commencer par ma promotrice, Mme Pauline Abrahams, dont les conseils avisés, la bienveillance et surtout la patience ont été appréciés à leur juste valeur.

Ensuite, je tiens à remercier M. Frank Scholzen d'avoir accepté d'être mon co-promoteur auprès de l'Université de Luxembourg, ainsi que Mmes Anne Wouters et Elisabeth Davin de l'équipe BEMS pour leur grande disponibilité et leur aide.

Cette équipe BEMS et, plus largement, l'Université de Liège qui, en me prêtant gracieusement l'un de ses ordinateurs et en me fournissant une licence d'exploitation pour le logiciel TRNSYS, auront véritablement permis à ce travail d'exister.

S'il est une personne sans qui je n'aurai certainement jamais été en mesure d'aller au bout, il s'agit sans aucun doute de ma chère maman dont le soutien indéfectible et les trop nombreuses questions sur mon état d'avancement m'ont permis de tenir le cap.

Dans un tout autre registre, la retenue dont a su faire preuve mon cher paternel, en ne posant pas trop de questions sur mon état d'avancement, aura également été très bénéfique pour la sérénité qu'elle m'a apporté dans la réalisation de ce travail.

Je tiens aussi à exprimer toute la reconnaissance que j'ai envers ma chère grande sœur pour son écoute, toujours attentive, qui m'aura été d'un grand réconfort et à son compagnon avec lequel ils cultivent ensemble de nombreuses qualités humaines.

Il me faut également rendre grâce à mon cher petit frère pour les relectures ponctuelles qu'il m'a gentiment accordées, encore que les interminables discussions qui suivaient la plupart du temps auront failli me faire reporter ce mémoire une fois de plus.

Au reste de ma famille et à mes amis, je tiens à dire toute ma gratitude pour les trop rares moments passés en leur compagnie qui m'auront permis, pendant quelques instants, de penser à autre chose qu'au bon fonctionnement de mes simulations.

Parmi ceux-ci, je souhaite particulièrement remercier mon cher ami Basile Colin qui m'a ouvert la voie et permis de gagner un temps précieux grâce au traitement des données météorologiques dont il s'est acquitté pour son propre mémoire.

A toutes ces personnes, je tiens à exprimer à nouveau mes sincères remerciements pour le rôle qu'elles ont eu, de manière consciente ou non, dans la réalisation de ce qui est, à ce jour, la tâche la plus exigeante qu'il m'ait été donné de réaliser.

A toutes ces personnes je tiens à dire merci, *infiniment*.

# Table des matières

<b>I. INTRODUCTION</b> .....	<b>10</b>
<b>II. CONTEXTUALISATION</b> .....	<b>11</b>
2.1. LES SCÉNARIOS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	11
2.2. LES NOTIONS D'ATTÉNUATION ET D'ADAPTATION.....	12
<b>III. PROBLÉMATIQUE</b> .....	<b>13</b>
<b>IV. ÉTAT DE L'ART</b> .....	<b>14</b>
4.1. UNE BRÈVE HISTOIRE .....	14
4.2. LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES .....	16
4.3. LES ASPECTS THERMIQUES ET ÉNERGÉTIQUES .....	19
<b>V. MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>22</b>
5.1. LE CAS D'ÉTUDE .....	24
5.1.1. Plans du bâtiment .....	24
5.1.2. Caractéristiques de l'enveloppe.....	26
5.1.3. Systèmes et équipements.....	29
5.2. LA MODÉLISATION 3D.....	30
5.3. L'ENCODAGE DES DONNÉES .....	32
5.3.1. Éléments constructifs.....	32
5.3.2. Régimes.....	36
a. Infiltration .....	36
b. Ventilation .....	36
c. Chauffage et refroidissement .....	37
d. Gains internes.....	38
5.3.3. Zones thermiques .....	39
5.4. LES PARAMÈTRES DE SIMULATION .....	40
5.4.1. Enveloppe du bâtiment.....	40
a. Réflectivité solaire .....	40
b. Niveau d'isolation .....	40
5.4.2. Mesures passives .....	41
a. Ventilation nocturne.....	41
b. Protections solaires .....	41

5.4.3. Données climatiques.....	42
5.5. L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION .....	44
<b>VI. RÉSULTATS .....</b>	<b>45</b>
6.1. LES PERSPECTIVES CLIMATIQUES .....	46
6.2. LES EFFETS THERMIQUES .....	49
6.2.1. Réflectivité solaire.....	49
6.2.2. Refroidissement actif .....	54
6.2.3. Mesures passives .....	55
6.2.4. Couplage de mesures.....	56
6.3. L'IMPACT SUR LA SURCHAUFFE .....	58
6.3.1. Changement climatique .....	58
6.3.2. Réflectivité solaire.....	60
6.3.3. Autres mesures .....	61
6.4. LE BILAN ÉNERGÉTIQUE .....	63
6.4.1. Changement climatique .....	63
6.4.2. Réflectivité solaire.....	64
6.4.3. Autres mesures .....	65
6.5. LE BILAN GLOBAL .....	66
<b>VII. DISCUSSION .....</b>	<b>68</b>
7.1. LES LIMITES DE L'ÉTUDE.....	68
7.2. LES PISTES DE RÉFLEXION .....	69
<b>VIII. CONCLUSION .....</b>	<b>71</b>
<b>IX. BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>72</b>
<b>X. ANNEXES .....</b>	<b>78</b>
ANNEXE I : IDENTIFIANTS ET PARAMÈTRES DES SIMULATIONS.....	78
ANNEXE II : TEMPÉRATURES OPÉRATIVES DU MODÈLE INITIAL POUR LA JOURNÉE LA PLUS CHAUDE .....	85
ANNEXE III : TEMPÉRATURES OPÉRATIVES DU MODÈLE Q-ZEN POUR LA JOURNÉE LA PLUS CHAUDE .....	89
ANNEXE IV : DEGRÉS-HEURES DE SURCHAUFFE AVEC UN SEUIL DE 26°C.....	93
ANNEXE V : DEGRÉS-HEURES DE SURCHAUFFE AVEC UN SEUIL DE 23°C.....	94

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : NOMBRE ANNUEL DE PUBLICATIONS POUR LA PÉRIODE 1950-2023 .....	14
FIGURE 2 : PRINCIPES DE BASE D'UNE SURFACE RADIATIVE RÉFRIGÉRANTE .....	17
FIGURE 3 : MÉTHODOLOGIE.....	23
FIGURE 4 : PLAN DU REZ-DE-CHAUSSÉE.....	24
FIGURE 5 : PLAN DU PREMIER ÉTAGE .....	25
FIGURE 6 : COUPE A-A' .....	26
FIGURE 7 : COUPE B-B' .....	27
FIGURE 8 : ÉLÉVATION NORD-EST. ....	28
FIGURE 9 : ÉLÉVATION SUD-OUEST.....	28
FIGURE 10 : VUES AXONOMÉTRIQUES DU MODÈLE AVEC PANNEAUX.....	30
FIGURE 11 : VUES AXONOMÉTRIQUES DES ZONES THERMIQUES. ....	31
FIGURE 12 : PROFIL DES GAINS INTERNES DUS AUX PERSONNES.....	38
FIGURE 13 : ENVIRONNEMENT DE SIMULATION. ....	44
FIGURE 14 : IDENTIFICATION DES SIMULATIONS.....	45
FIGURE 15 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES PAR RAPPORT À LA PÉRIODE 2001-2020 .....	46
FIGURE 16 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES MOYENNES MENSUELLES PAR RAPPORT À LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE .....	47
FIGURE 17 : RÉPARTITION HORAIRE DES TEMPÉRATURES .....	48
FIGURE 18 : ÉVOLUTION DU RAYONNEMENT GLOBAL MOYEN ANNUEL PAR RAPPORT À LA PÉRIODE 2001-2020.....	48
FIGURE 19 : PROFIL THERMIQUE DES SURFACES EXTÉRIEURES DE TOITURE AVEC PLUSIEURS VALEURS DE RÉFLECTIVITÉ SOLAIRE .....	49
FIGURE 20 : DÉVIATION DES TEMPÉRATURES SUPERFICIELLES EXTÉRIEURES ET INTÉRIEURES AVEC PLUSIEURS VALEURS DE RÉFLECTIVITÉ SOLAIRE PAR RAPPORT À LA RÉFLECTIVITÉ SOLAIRE DE RÉFÉRENCE .....	50
FIGURE 21 : DÉVIATION DES TEMPÉRATURES OPÉRATIVES ET SUPERFICIELLES INTÉRIEURES AVEC PLUSIEURS VALEURS DE RÉFLECTIVITÉ SOLAIRE PAR RAPPORT À LA RÉFLECTIVITÉ SOLAIRE DE RÉFÉRENCE .....	51
FIGURE 22 : ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE SUPERFICIELLE EXTÉRIEURE DE LA TOITURE DE L'EXTENSION AVEC DIFFÉRENTES VALEURS DE RÉFLECTIVITÉ SOLAIRE .....	52
FIGURE 23 : ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE SUPERFICIELLE EXTÉRIEURE DE L'EXTENSION SELON LA RÉFLECTIVITÉ SOLAIRE .....	52
FIGURE 24 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES OPÉRATIVES MOYENNES JOURNALIÈRES EN FONCTION DE LA RÉFLECTIVITÉ SOLAIRE .....	53
FIGURE 25 : ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE OPÉRATIVE DES ZONES EXTENSION ET CHAMBRE 2 AVEC ET SANS REFOUILLISSEMENT ...	54
FIGURE 26 : ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE OPÉRATIVE DES ZONES EXTENSION ET CHAMBRE 2 AVEC ET SANS MESURES PASSIVES ...	55
FIGURE 27 : DÉVIATION DE LA TEMPÉRATURE OPÉRATIVE DE LA ZONE EXTENSION PAR RAPPORT À LA TEMPÉRATURE OPÉRATIVE DE RÉFÉRENCE POUR DIFFÉRENTES MESURES .....	56

FIGURE 28 : DÉVIATION DE LA TEMPÉRATURE OPÉRATIVE DE LA ZONE CHAMBRE 2 PAR RAPPORT À LA TEMPÉRATURE OPÉRATIVE DE RÉFÉRENCE POUR DIFFÉRENTES MESURES .....	57
FIGURE 29 : ÉVOLUTION DES HEURES ET DES DEGRÉS-HEURES DE SURCHAUFFE ANNUELS AVEC UN SEUIL DE 26°C .....	58
FIGURE 30 : ÉVOLUTION DES HEURES ET DES DEGRÉS-HEURES DE SURCHAUFFE ANNUELS AVEC UN SEUIL DE 23°C .....	59
FIGURE 31 : BAISSÉ RELATIVE SUPPLÉMENTAIRE DES DEGRÉS-HEURES DE SURCHAUFFE POUR CHAQUE RÉFLECTIVITÉ SOLAIRE.....	60
FIGURE 32 : BAISSÉ RELATIVE DES DEGRÉS-HEURES DE SURCHAUFFE POUR CHAQUE MESURE AVEC UN SEUIL DE 26°C .....	61
FIGURE 33 : BAISSÉ RELATIVE DES DEGRÉS-HEURES DE SURCHAUFFE AVEC DIFFÉRENTES MESURES AVEC UN SEUIL DE 23°C.....	62
FIGURE 34 : ÉVOLUTION DES BESOINS ANNUELS NETS EN CHAUD ET EN FROID .....	63
FIGURE 35 : ÉVOLUTION RELATIVE DES BESOINS NETS EN CHAUD ET EN FROID POUR CHAQUE VALEUR DE RÉFLECTIVITÉ SOLAIRE .....	64
FIGURE 36 : ÉVOLUTION RELATIVE DES BESOINS NETS EN CHAUD ET EN FROID POUR CHAQUE MESURE .....	65

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : PROPRIÉTÉS DE DIFFÉRENTS REVÊTEMENTS DE TOITURE CERTIFIÉS PAR LE CRRC.....	18
TABLEAU 2 : PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DES PAROIS .....	32
TABLEAU 3 : COMPOSITION DES PAROIS .....	33
TABLEAU 4 : PROPRIÉTÉS DES OUVERTURES .....	35
TABLEAU 5 : DÉBITS DE VENTILATION.....	36
TABLEAU 6 : PROGRAMMATION DES SYSTÈMES DE CONDITIONNEMENT D’AIR .....	37
TABLEAU 7 : PROGRAMMATION DES GAINS INTERNES DUS AUX ÉQUIPEMENTS ET À L’ÉCLAIRAGE .....	39
TABLEAU 8 : DONNÉES DES ZONES THERMIQUES .....	39
TABLEAU 9 : PROPRIÉTÉS RADIATIVES DES SURFACES DE TOITURE .....	40
TABLEAU 10 : DÉBITS DE VENTILATION NOCTURNE .....	41
TABLEAU 11 : VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES.....	43
TABLEAU 12 : INDICES DE TEMPÉRATURE .....	47
TABLEAU 13 : RÉDUCTION DES DEGRÉS-HEURES DE SURCHAUFFE PAR POURCENT D’AUGMENTATION DES BESOINS GLOBAUX EN ÉNERGIE POUR UN SEUIL DE 26°C.....	66
TABLEAU 14 : RÉDUCTION DES DEGRÉS-HEURES DE SURCHAUFFE PAR POURCENT D’AUGMENTATION DES BESOINS GLOBAUX EN ÉNERGIE POUR UN SEUIL DE 23°C.....	67
TABLEAU 15 : IDENTIFIANTS ET PARAMÈTRES DES SIMULATIONS.....	78
TABLEAU 16 : TEMPÉRATURES OPÉRATIVES DES ZONES DU MODÈLE INITIAL POUR LA JOURNÉE LA PLUS CHAUDE .....	85
TABLEAU 17 : TEMPÉRATURES OPÉRATIVES DES ZONES DU MODÈLE Q-ZEN POUR LA JOURNÉE LA PLUS CHAUDE .....	89
TABLEAU 18 : DEGRÉS-HEURES DE SURCHAUFFE AVEC UN SEUIL DE 26°C .....	93
TABLEAU 19 : DEGRÉS-HEURES DE SURCHAUFFE AVEC UN SEUIL DE 26°C .....	94

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>BCC</b>	Beijing Climate Center
<b>BEMS</b>	Building Energy Monitoring and Simulation
<b>CSM</b>	Climate System Model
<b>CCNUCC</b>	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
<b>DHs</b>	Degrés-heures de surchauffe
<b>ECMWF</b>	European Centre for Medium-range Weather Forecasts
<b>EPDM</b>	Éthylène-propylène-diène monomère
<b>GES</b>	Gaz à effet de serre
<b>GIEC</b>	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
<b>HSP</b>	Hauteur sous plafond
<b>Hs</b>	Heures de surchauffe
<b>MIROC</b>	Model for Interdisciplinary Research on Climate
<b>MR</b>	Medium Resolution
<b>MPI</b>	Max Planck Institute
<b>OSB</b>	Oriented Strand Board
<b>PCI</b>	Pouvoir calorifique inférieur
<b>PEB</b>	Performance énergétique des bâtiments
<b>SSP</b>	Shared Socioeconomic Pathways
<b>PUR</b>	Polyuréthane
<b>Q-ZEN</b>	Quasi Zéro Energie
<b>R0</b>	Rez-de-chaussée
<b>R1</b>	Premier étage
<b>SRI</b>	Solar Reflectance Index
<b>TSE</b>	Température superficielle extérieure
<b>TSI</b>	Température superficielle intérieure
<b>TOP</b>	Température opérative

## TABLE DES UNITÉS

<b>°C</b>	degré Celsius	<b>kJ</b>	kilojoule
<b>Gt</b>	gigatonne	<b>kW</b>	kilowatt
<b>h</b>	heure	<b>kWc</b>	kilowatt crête
<b>°K</b>	degré Kelvin	<b>kWh</b>	kilowattheure
<b>kg</b>	kilogramme	<b>l</b>	litre
<b>Kh</b>	degré-heure	<b>m</b>	mètre

# I. Introduction

L'habitat a pour fonction principale d'assurer les conditions d'existence nécessaires à la survie et au bien-être des êtres humains dans un milieu défini. En tant que fait technique et social, il résulte tant de facteurs environnementaux, tels que le climat, la nature des sols ou le relief, que de facteurs socio-culturels, tels que la classe sociale, la structure familiale ou encore le système de croyances [1]. L'évolution de l'habitat des premiers abris aux logements contemporains fut déterminée par l'évolution conjointe de ces facteurs, mais ces mutations eurent généralement lieu sur le temps long. Or, s'il est un facteur dont le changement s'est opéré à un rythme anormalement élevé ces dernières décennies, il s'agit du climat. En effet, l'augmentation continue des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre est à l'origine d'un réchauffement planétaire sans précédent dans l'histoire de l'humanité. De sorte que le sixième rapport d'évaluation du GIEC semble confirmer que le seuil de 1,5°C de hausse de la température moyenne terrestre sera possiblement atteint dès 2030-2035 [2].

Actuellement, les effets de ce réchauffement se font déjà ressentir dans toutes les régions du monde, avec l'accentuation des extrêmes météorologiques, et les risques qui pèsent sur les systèmes écologiques et humains sont amenés à se multiplier si les politiques d'atténuation et d'adaptation ne sont pas renforcées [2]. En 2015, l'Accord de Paris était adopté par 196 parties sous la forme d'un traité international contraignant visant à limiter le réchauffement climatique à un niveau bien inférieur à un seuil de 2°C par rapport au niveau préindustriel en poursuivant les efforts pour limiter cette hausse à 1,5°C d'ici la fin du siècle [3]. De ce fait, chacune des parties est tenue depuis 2020 d'élaborer et de transmettre tous les cinq ans une contribution déterminée au niveau national à la CCNUCC. Par ailleurs, l'article 15 du règlement sur la gouvernance de l'union de l'énergie et de l'action pour le climat impose de soumettre une stratégie de développement à long terme à faibles émissions de gaz à effet de serre à la Commission européenne, bien que facultative auprès de la CCNUCC [4].

C'est dans ce contexte que la Région wallonne a mis au point sa stratégie de rénovation énergétique à long terme du bâtiment, dont les objectifs sont l'amélioration du confort et de la santé des habitants en portant une attention particulière aux personnes en situation de précarité, la réduction des impacts environnementaux liés à l'occupation des bâtiments et aux infrastructures, ainsi que la diminution de la dépendance énergétique de la région [5]. L'ambition est donc de faire tendre l'ensemble du parc résidentiel wallon – soit près de 1,7 millions de logements au 1<sup>er</sup> janvier 2019 – vers le label PEB A décarboné à l'horizon 2050. Pourtant, un logement considéré comme performant selon les normes actuelles ne sera pas forcément adapté aux conditions climatiques futures. Étant donné que la plupart des bâtiments actuels existeront toujours en 2050, de nombreuses questions se posent quant à la stratégie à adopter pour garantir à leurs occupants un confort durable.

## II. Contextualisation

### 2.1. Les scénarios du changement climatique

Tandis que les émissions cumulées de dioxyde de carbone produites par l'ensemble des activités humaines depuis l'avènement de l'ère industrielle jusqu'à aujourd'hui (soit sur la période 1850-2019) avoisineraient les 2390 milliards de tonnes (GtCO<sub>2</sub>), le budget carbone restant depuis 2023 pour ne pas dépasser les 1,5°C, 1,7°C ou 2°C de réchauffement planétaire moyen serait respectivement de 250, 600 et 1150 GtCO<sub>2</sub> [6]. Or, les émissions mondiales de gaz à effet de serre liées à la combustion d'énergies fossiles et aux activités industrielles (CO<sub>2</sub>-FFI) atteignent pas moins de 36,1 Gt en 2022 [7]. Actuellement, la hausse moyenne des températures de surface à l'échelle globale sur la décennie 2013-2022 s'élève à 1,14°C par rapport à la période 1850-1900, avec une augmentation de près de 1,65°C pour les terres et d'environ 0,93°C pour les océans [6]. En effet, le changement climatique n'étant pas homogène, toutes les régions du monde ne seront pas affectées de la même manière [8].

D'après l'édition 2023 du rapport de l'Organisation météorologique mondiale et du programme européen Copernicus sur l'état du climat européen, le continent se réchaufferait ainsi à un rythme deux fois plus soutenu que la moyenne mondiale, avec une élévation moyenne des températures de l'ordre de 2,3°C depuis la période préindustrielle [9]. En Belgique, les observations réalisées par l'Institut Royal Météorologique à Saint-Josse-ten-Noode depuis 1833, puis à Uccle à partir de 1886, témoignent d'une augmentation de 2,1°C à Bruxelles entre les trente premières années de mesure et les trente dernières (jusqu'en 2019), bien que la moyenne nationale soit plutôt estimée entre 1,8 et 1,9°C [10]. D'autre part, les projections montrent que le réchauffement devrait se poursuivre au moins jusqu'en 2050 et ce, dans tous les scénarios envisagés [11]. D'où l'importance de la prospective pour anticiper les impacts du changement climatique à long terme et développer des stratégies adéquates.

Les cinq trajectoires socio-économiques partagées (SSP) élaborées par la communauté scientifique constituent un cadre commun permettant d'évaluer l'orientation possible des sociétés humaines [12]. Chaque narratif est construit sur base d'hypothèses socio-économiques quantitatives, telles que la démographie, le développement économique et les progrès technologiques, et qualitatives, telles que la qualité des institutions, la stabilité politique ou la conscience environnementale [13]. Les trois scénarios utilisés dans le cadre de ce travail illustrent respectivement une trajectoire intermédiaires pour laquelle la trajectoire actuelle se poursuit (SSP2), une trajectoire où les états délaissent la coopération internationale au profit de réponses individuelles (SSP3) et une trajectoire pour laquelle le développement reste fondé sur les énergies fossiles (SSP5) [12]. Associée à différentes valeurs de forçage radiatif à l'horizon 2100 (de 1,9 à 8,5 W/m<sup>2</sup>) selon les niveaux d'émissions, la trajectoire empruntée déterminera le niveau de risque auquel les sociétés humaines seront finalement exposées.

## 2.2. Les notions d'atténuation et d'adaptation

Le GIEC définit le risque comme « *le potentiel de conséquences négatives pour les systèmes humains ou écologiques* » [traduction libre] en distinguant clairement les risques liés directement aux impacts du changement climatique de ceux induits par les réponses humaines à celui-ci [14]. Dans le domaine des risques naturels, le risque correspond au produit d'un aléa par la valeur des éléments à risque et par leur degré de vulnérabilité [15]. De manière générale, un aléa désigne un phénomène naturel ou d'origine anthropique « *susceptible d'occasionner des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques voire des pertes en vies humaines ou une dégradation de l'environnement* » [16]. Les caractéristiques d'un aléa sont l'intensité, la probabilité d'occurrence (*i.e.* la fréquence), la localisation et la temporalité qui désigne la durée de manifestation de l'aléa et son degré de soudaineté [17]. Cependant, un aléa ne constitue un risque que si l'élément exposé est menacé directement ou indirectement par cet aléa ; alors seulement, il devient un élément à risque.

La vulnérabilité au changement climatique se traduit par « *le degré auquel les éléments d'un système [...] sont affectés par les effets du changement climatique* » [16]. L'état de vulnérabilité est conditionné par le produit de l'exposition et de la sensibilité rapporté à la capacité d'adaptation [18]. Concernant l'exposition, elle se rapporte à « *la situation des personnes, des infrastructures, des logements, des capacités de production et d'autres biens humains tangibles situés dans des zones exposées aux aléas* » [traduction libre] [19]. La sensibilité au changement climatique correspond à « *la proportion dans laquelle un élément exposé [...] est susceptible d'être affecté, favorablement ou défavorablement, par la manifestation d'un aléa* » [16]. Enfin, la capacité d'adaptation (ou adaptabilité) est « *la capacité d'ajustement d'un système face au changement climatique [...] afin d'atténuer les effets potentiels, d'exploiter les opportunités, ou de faire face aux conséquences* » [20].

Ainsi, il existe deux stratégies complémentaires permettant de réduire les risques imputables au changement climatique : l'atténuation et l'adaptation. La première stratégie consiste à diminuer les émissions de gaz à effet de serre afin de minimiser l'intensité et la fréquence des aléas, ce qui permet de limiter l'exposition. La seconde implique de réduire la vulnérabilité des populations en atténuant leur sensibilité et en renforçant leur capacité d'adaptation. Préalablement à l'élaboration d'un plan d'adaptation, la réalisation d'un diagnostic doit permettre « *d'évaluer qualitativement la vulnérabilité d'une organisation, d'une structure ou d'un territoire aux risques liés au changement climatique* » [16]. Les personnes les plus vulnérables sont généralement les plus modestes, car elles vivent souvent dans des zones plus exposées et disposent de peu de ressources pour se prémunir des effets d'un aléa ou se reconstruire après celui-ci [15]. En parallèle des politiques d'atténuation, la réduction des risques nécessite donc aussi la mise en place de politiques d'adaptation permettant de réduire les inégalités.

### III. Problématique

En Wallonie, le secteur résidentiel représente 27 % de la consommation finale d'énergie et 18 % des émissions de gaz à effet de serre liés à l'énergie, ce qui en fait le troisième secteur le plus émetteur derrière l'industrie et le transport [21]. L'amélioration de la performance énergétique des logements constitue donc un important levier d'atténuation du changement climatique. De fait, les logements certifiés entre 2010 et 2018 présentaient en moyenne un label PEB F [22]. En ambitionnant de porter cette valeur moyenne à un label PEB A, la Région wallonne inscrit la rénovation du parc de logements dans une stratégie plus large visant à réduire de 55 % les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990 et d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050, conformément aux engagements pris dans le cadre du Pacte vert [23]. Pour atteindre cet objectif, il serait nécessaire d'observer un rythme de rénovation énergétique profonde de 3 % par an en moyenne pendant trente ans [24]. Actuellement, le taux de rénovation énergétique profonde serait d'environ 0,2 % par an [5].

Si l'atténuation du changement climatique passe nécessairement par l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, ces derniers sont également des vecteurs de risque. En Belgique, la plupart de la population réside en ville ou dans les agglomérations périurbaines [25]. Ces zones artificialisées sont généralement plus chaude que les zones avoisinantes en raison d'une accumulation de chaleur plus importante [26]. Ce phénomène, appelé îlot de chaleur urbain, est exacerbé lors des épisodes de vagues de chaleur [27]. Or, ceux-ci sont amenés à se multiplier et à gagner en intensité à mesure que le climat se réchauffe, accentuant ainsi les risques sanitaires pesant sur les populations vulnérables telles que les jeunes enfants, les personnes âgées et les personnes souffrant de troubles cardiovasculaires [28]. Au-delà de l'inconfort généré, la hausse des températures liée aux îlots de chaleur urbains et renforcée par le changement climatique contribue ainsi à accroître la mortalité [29].

En tant qu'interface entre conditions météorologiques extérieures et environnement intérieur, un bâtiment doit permettre de limiter l'exposition de ses occupants aux fortes chaleurs. La rénovation d'un logement est un moment particulièrement propice à l'implémentation de mesures préventives pour lutter contre la surchauffe. Cependant, l'indicateur de surchauffe actuellement utilisé par la méthodologie PEB se base sur des moyennes mensuelles et néglige donc les vagues de chaleur, en plus de ne s'appliquer qu'aux bâtiments assimilés neufs ou rénovés [30]. Dès lors, il est nécessaire d'interroger la capacité des logements à faire face aux futures vagues de chaleur et de planifier dès à présent l'adaptation afin de réduire la vulnérabilité des occupants. Les toitures réfléchissantes pourraient être une piste d'adaptation abordable pour minimiser la surchauffe à l'échelle des bâtiments et des villes sans mobiliser d'énergie. Ce travail s'attachera donc à évaluer leur potentiel au travers d'un bâtiment résidentiel exposé aux conditions climatiques actuelles et futures en Belgique.

## IV. État de l'art

### 4.1. Une brève histoire

Les toitures réfléchissantes suscitent un intérêt grandissant, aussi bien dans la communauté scientifique qu'auprès du grand public. De telle sorte que le nombre de publications est passé d'un total de 89 pour la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle à 135 pour la seule année 2023 [voir Figure 1]. Le premier élan a lieu vers le milieu des années 2000, précédant l'entrée en vigueur du sixième volet de la réglementation californienne « Title 24 » établissant des normes strictes en matière d'efficacité énergétique et intégrant l'utilisation de surfaces réfléchissantes à la liste de recommandations, sans pour autant la rendre obligatoire [31]. La seconde impulsion survient au début des années 2010 lorsque Steven Chu, physicien et secrétaire à l'Énergie dans l'administration Obama, encourage leur utilisation [32]. Un troisième tournant pourrait s'être opéré aux environs de 2018, dans le sillage de la publication du rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C soulignant à nouveau la nécessité d'implémenter des politiques d'atténuation et d'adaptation [33].

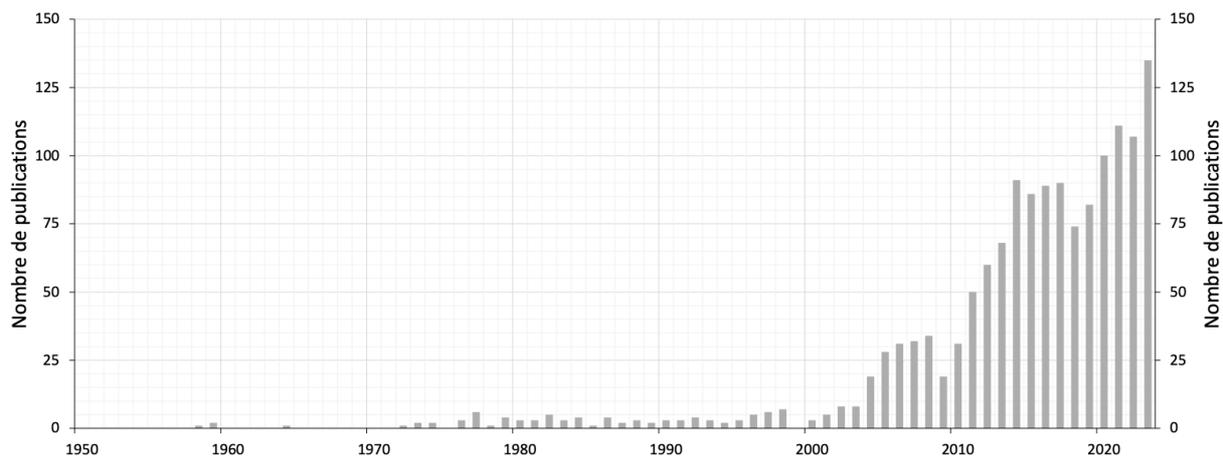


Figure 1 : nombre annuel de publications comportant simultanément les mots "cool" et "roofs" pour la période 1950-2023 tel qu'indexé dans la base de données Scopus au 25 mai 2024.

Les exemples d'habitat dont les parois sont assimilables à des surfaces réfléchissantes sont nombreux. Concernant leur utilisation pour des parois verticales, il est possible de citer la route des villages blancs en Andalousie, l'architecture ottomane de Berat et Safranbolu, le trullo apulien et la vallée italienne d'Itria, la rondavelle sud-africaine, l'architecture Hui dans la province chinoise de l'Anhui ou encore le village colombien de Guane et l'architecture coloniale. Plus proche, il y a la maison à colombage ainsi que la ferme brabançonne et plus récemment, le mouvement moderne. En toiture, les exemples sont moins fréquents et souvent réduits aux toits plats, aux dômes ou à certaines formes d'habitats nomades : le houch traditionnel djerbien, l'ancienne ville yéménite de Shibam, le ger mongol, le tipi des peuples autochtones nord-américains ou même l'igloo des peuples inuits. Néanmoins, l'exemple le plus emblématique reste l'yposkafa de Santoríni et l'architecture cycladique.

La plupart de ces exemples ont en commun d'appartenir aux registres de l'architecture traditionnelle et vernaculaire, caractérisés par l'emploi de ressources locales. Dès lors, il est difficile d'établir avec certitude l'origine de l'utilisation de ces matériaux à des fins explicites de conservation de la fraîcheur, car l'approche contemporaine consistant à additionner les couches constructives, répondant chacune à une contrainte particulière permettant d'assurer l'intégrité de l'ensemble, est assez récente [34]. Ainsi, l'archétype égéen des maisons blanchies à la chaux, fréquemment invoqué pour illustrer l'ancienneté supposée des surfaces réfléchissantes, se serait véritablement développé à partir des années 1930. D'abord pour des raisons sanitaires – les propriétés désinfectantes de la chaux permettant de lutter contre le choléra – et ensuite, car il permettait d'entretenir une image touristique portée par la vision idéalisée des architectes du mouvement moderne [35]. En réalité, l'utilisation spécifique de surfaces réfléchissantes naît probablement dans les années 1960 avec l'émergence des membranes de toiture en polychlorure de vinyle (PVC) ou en polyoléfine thermoplastique (TPO) [36].

Au milieu des années 1980, des chercheurs affiliés au département de l'Énergie américain cherchent à mesurer les potentielles économies d'énergie de tels revêtements [37]. Parmi ces chercheurs se trouvent ceux du Heat Island Group, rattaché au Lawrence Berkeley National Laboratory, dont les travaux préfigurent la création du Cool Roof Rating Council ou CRRC [38]. Fondé en 1998, ce dernier a pour objectif de développer des méthodes précises et crédibles pour évaluer les propriétés radiatives des revêtements de toiture et, depuis 2022, des revêtements muraux [39]. La première norme concernant l'utilisation de revêtements de toiture réfléchissants pour les bâtiments non résidentiels et les immeubles résidentiels de grande hauteur apparaît en 1999 avec la publication du Standard 90.1-1999, établi par l'American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers ou ASHRAE [40]. L'équivalent européen du CRRC, le European Cool Roof Council, est créé en 2011 dans le cadre du projet européen « Cool Roofs » visant à promouvoir de tels matériaux [41].

Aujourd'hui, l'idée a essaimé et de nombreuses initiatives ont vu le jour à travers le monde. Si l'utilisation du terme anglo-saxon « cool roof » et de ses variantes est très largement majoritaire, notamment pour des raisons commerciales, il existe une multitude d'autres appellations plus ou moins usitées. En français, l'absence de terminologie précise participe d'une confusion généralisée sur le terme à adopter, d'autant plus que la traduction littérale de « cool roof » désigne déjà un système d'isolation des toitures plates. De manière générale, les dénominations peuvent s'articuler autour de l'effet recherché (*e.g.* toiture fraîche), du fonctionnement (*e.g.* toiture réfléchissante) ou de l'aspect (*e.g.* toiture blanche). Cependant, il serait sans doute plus exact de désigner ces matériaux en tant que « surface à refroidissement radiatif » ou encore « surface radiative réfrigérante » afin d'englober l'ensemble des technologies existantes [42]. Le présent travail fera usage des différents termes en insistant particulièrement sur celui de « surface réfléchissante » qui reste sans doute le plus éloquent.

## 4.2. Les propriétés physiques

Après un voyage de près de 150 millions de kilomètres réalisé en un peu plus de huit minutes, le rayonnement solaire atteint la couche externe de l'atmosphère terrestre avec une densité de flux qui oscille autour de  $1361 \text{ W/m}^2$ , il s'agit de la constante solaire [43]. Le spectre électromagnétique du rayonnement solaire se situe principalement dans les domaines de l'ultraviolet, du visible et de l'infrarouge, contenant respectivement 5 %, 44 % et 50 % de l'énergie du flux solaire incident [38]. Avant d'atteindre la surface terrestre, les composantes de ce rayonnement interagissent avec les gaz et les particules constituant l'atmosphère et sont en partie réfléchies, absorbées ou diffusées. Finalement, l'irradiance solaire  $I_{sol}$  perçue par une surface perpendiculaire aux rayons est réduite à environ  $1000 \text{ W/m}^2$  au niveau de la mer lorsque les conditions sont optimales [44]. Le bilan thermique à l'équilibre d'une surface horizontale exposée au rayonnement solaire est exprimé par la relation (1) :

$$(1 - \rho_{sol}) I_{sol} = \varepsilon_{th} \sigma (T_{surf}^4 - T_{ciel}^4) + h_{ce} (T_{surf} - T_{air}) - \lambda \frac{dt}{dx} \quad (1)$$

Où :

- $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ] ;
- $T_{surf}$  = température superficielle de la surface considérée [K] ;
- $T_{ciel}$  = température du ciel [K] ;
- $h_{ce}$  = coefficient de convection extérieure [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ] ;
- $T_{air}$  = température de l'air [K] ;
- $\lambda$  = conductivité thermique de la surface considérée [ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ] ;
- $\frac{dt}{dx}$  = gradient de température de la couche superficielle pour la direction x considérée.

Le terme de gauche correspond au flux de chaleur absorbé par la surface, tandis que les trois termes à droite de l'égalité représentent respectivement le flux de chaleur rayonné par la surface, le flux de chaleur sortant dû à la convection entre la surface et l'air environnant et le flux de chaleur sortant par conduction au travers du matériau constituant la surface. La réflectivité solaire  $\rho_{sol}$  (ou albédo) exprime « la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire vers l'hémisphère où se situe la source solaire, intégré sur l'ensemble du spectre solaire, y compris les composantes de réflexion spéculaire et diffuse » [traduction libre] [38]. L'émissivité thermique  $\varepsilon_{th}$  définit la capacité relative d'une surface exposée au rayonnement solaire à réémettre la chaleur absorbée sous forme d'infrarouges par rapport à un corps noir ( $\varepsilon_{th} = 1$ ) qui serait soumis aux mêmes conditions [45]. Cette équation met en évidence que le comportement thermique d'une toiture fortement isolée, munie d'un revêtement réfléchissant et exposée au rayonnement solaire est principalement influencé par la réflectivité solaire et l'émissivité thermique ; la composante  $\lambda$  étant relativement moins importante.

Normalisée entre 0 et 1, la réflectivité solaire est largement dépendante du spectre solaire de référence employé pour son calcul [46]. Dans le cas d'une surface opaque, la somme de la réflectivité solaire et de l'absorptivité solaire  $\alpha_{sol}$  est égale à 1 [47]. Pendant la journée, lorsque le rayonnement solaire est le principal facteur déterminant la température de surface d'un revêtement de toiture, le coefficient de réflectivité solaire est le premier paramètre permettant de réduire cette température ; en revanche, la performance thermique du revêtement durant la nuit est largement dépendante du coefficient d'émissivité thermique qui contribue à dissiper la chaleur accumulée [45]. En somme, une surface réfléchissante se distingue d'une surface conventionnelle par ses propriétés radiatives particulières : une haute réflectivité solaire conjuguée à une émissivité thermique élevée permettant de limiter l'accumulation de chaleur au sein d'un bâtiment et dans son environnement [voir Figure 2].

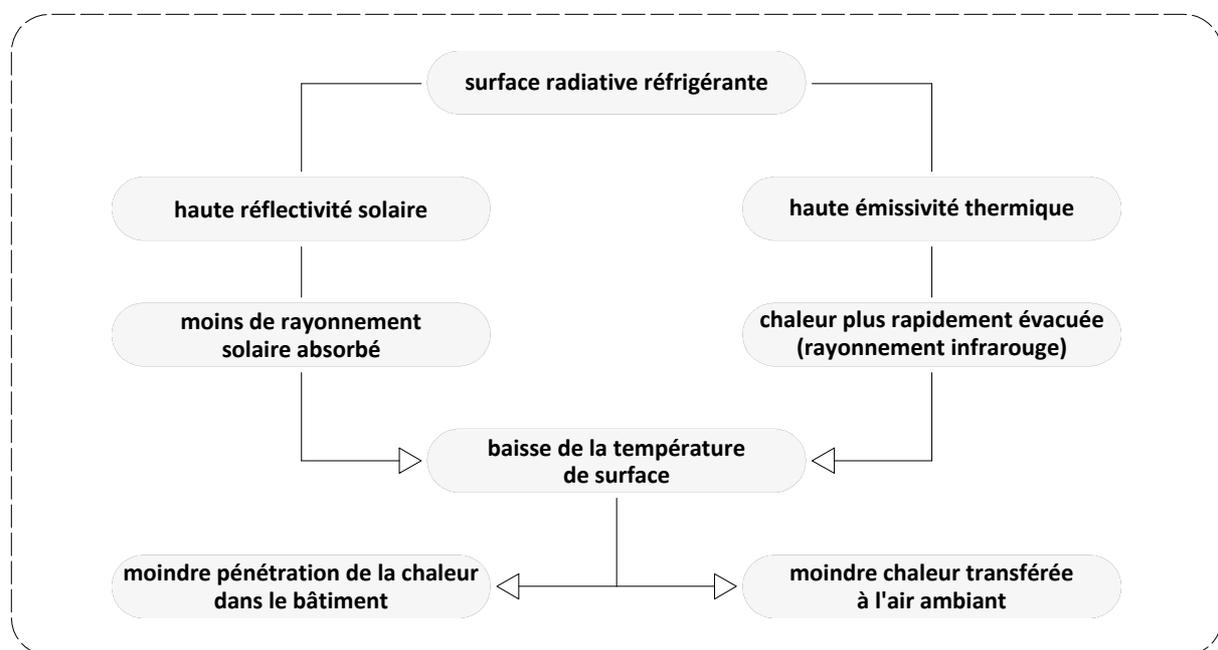


Figure 2 : principes de base d'une surface radiative réfrigérante. Reproduit d'après [48].

L'indice de réflectivité solaire (SRI) permet d'agréger les coefficients de ces deux propriétés en un indice unique témoignant du « *potentiel de refroidissement passif d'une surface plane par rapport à une surface noire de référence [avec  $\rho_{sol} = 0,05$  et  $\varepsilon_{th} = 0,90$ ], dont le SRI est égal à zéro, et à une surface blanche de référence [avec  $\rho_{sol} = 0,80$  et  $\varepsilon_{th} = 0,90$ ] dont le SRI est égal à 100* » [traduction libre] [45]. Déterminé en laboratoire en respectant les conditions normalisées définies par l'ASTM E1980-11(2019) « *Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Slope Opaque Surfaces* » – soit une irradiance solaire de  $1000 \text{ W/m}^2$ , une température du ciel de 300 K, une température de l'air de 310 K et un coefficient de convection extérieure correspondant à 5, 12 ou  $30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  selon que la vitesse du vent est considérée comme étant faible (jusqu'à 2 m/s), moyenne (entre 2 et 6 m/s) ou élevée (entre 6 et 10 m/s) [49] – le SRI est obtenu avec l'équation suivante (2) :

$$SRI = \frac{T_{noir} - T_{surf}}{T_{noir} - T_{blanc}} * 100 \quad (2)$$

Où :

- $T_{noir}$  = température de surface à l'équilibre d'un matériau noir de référence [K] ;
- $T_{surf}$  = température de surface à l'équilibre du matériau considéré [K] ;
- $T_{blanc}$  = température de surface à l'équilibre d'un matériau blanc de référence [K].

Si la plupart des revêtements conventionnels présentent un SRI situé entre 0 et 100, le développement de nouveaux matériaux permet d'obtenir des valeurs inférieures à 0 pour des surfaces aux propriétés réfléchissantes et émissives plus faibles que la surface noire de référence, voire supérieures à 100 pour les surfaces plus performantes que la surface blanche de référence [48]. Toutefois, le pouvoir réfléchissant des matériaux peut se détériorer dû à l'encrassement et aux phénomènes de météorisation, désignant l'ensemble des processus d'altération des matériaux [49]. Pour cette raison, les acteurs du secteur souhaitant faire certifier leurs produits doivent les soumettre à des tests afin de déterminer les valeurs de réflectivité solaire et d'émissivité thermique, ainsi que le SRI après trois ans d'exposition [voir Tableau 1]. Auparavant, ces tests étaient réalisés en conditions réelles, rendant la certification particulièrement laborieuse, mais la méthode définie par la norme ASTM D7897-18(2023) permet désormais de vieillir les matériaux en quelques jours seulement [50].

*Tableau 1 : propriétés de différents revêtements de toiture certifiés par le CRRC [51].*

Revêtement	Réflectivité solaire		Émissivité thermique		SRI	
	Initiale	3 ans	Initiale	3 ans	Initial	3 ans
Enduit ou étanchéité liquide de couleur blanche	de 0,57 à 0,94	de 0,46 à 0,86	de 0,79 à 0,95	de 0,82 à 0,97	de 68 à 119	de 54 à 108
Membrane EPDM de couleur noire	de 0,06 à 0,12	de 0,07 à 0,09	de 0,82 à 0,87	de 0,80 à 0,84	de -3 à 7	de -3 à 2
Membrane EPDM de couleur blanche	de 0,77 à 0,79	de 0,66 à 0,76	de 0,84 à 0,91	de 0,87 à 0,90	de 95 à 98	de 79 à 94
Membrane PVC de couleur blanche	de 0,77 à 0,87	de 0,63 à 0,78	de 0,86 à 0,89	de 0,82 à 0,91	de 95 à 110	de 75 à 96
Revêtement métallique de couleur noire	de 0,25 à 0,44	de 0,24 à 0,44	de 0,82 à 0,87	de 0,80 à 0,88	de 22 à 49	de 21 à 49
Revêtement métallique de couleur grise	de 0,20 à 0,69	de 0,23 à 0,65	de 0,19 à 0,96	de 0,10 à 0,98	de 20 à 63	de 19 à 51
Revêtement métallique de couleur blanche	de 0,40 à 0,77	de 0,39 à 0,74	de 0,82 à 0,87	de 0,82 à 0,87	de 45 à 95	de 42 à 91
Tuile de couleur noire	de 0,08 à 0,45	de 0,12 à 0,44	de 0,80 à 0,93	de 0,83 à 0,98	de 5 à 50	de 9 à 48
Tuile de couleur rouge	de 0,14 à 0,48	de 0,14 à 0,45	de 0,80 à 0,95	de 0,83 à 0,98	de 11 à 55	de 12 à 50
Tuile de couleur blanche	de 0,75 à 0,79	de 0,70 à 0,74	de 0,89 à 0,91	de 0,86 à 0,97	de 93 à 98	de 88 à 90

### 4.3. Les aspects thermiques et énergétiques

En comparant la réduction des températures de surface pour plusieurs valeurs de réflectivité solaire, Wang et *al.* se sont penchés sur la variabilité climatique à l'échelle mondiale de l'efficacité des toitures réfléchissantes [52]. Les simulations, utilisant les données de forçage radiatif de 1991 à 2010, sont réalisées avec la cinquième version du Community Land Model qui comprend un modèle urbain permettant d'obtenir les températures superficielles moyennes journalières, les rayonnements entrants et sortants pour différentes longueurs d'onde, ainsi que les flux de chaleur sensible et latente associés aux toitures conventionnelles et aux toitures munies de revêtements réfléchissants. Au-delà de l'impact minime de l'adoption massive de toitures réfléchissantes sur la température moyenne de surface globale, les résultats suggèrent que le potentiel de réduction des températures est supérieur pour les bâtiments dont la toiture a une capacité de rétention d'eau limitée et qui sont situés dans des zones avec un ensoleillement important, des vitesses de vent plus faibles et peu de précipitations.

Synnefa et *al.* ont cherché à évaluer les effets des surfaces réfléchissantes sur la consommation d'énergie et le confort thermique d'un pavillon résidentiel exposé aux conditions climatiques de 27 villes à travers le monde par l'intermédiaire de simulations dynamiques réalisées avec le logiciel TRNSYS [53]. Les résultats indiquent qu'une hausse de la réflectivité solaire de 0,40 et 0,65 entraînait une réduction de 18 à 93 % des besoins en froid et de 11 à 27 % de la puissance nominale nécessaire au refroidissement par rapport au modèle de référence, dont la réflectivité solaire initiale est de 0,20. En matière de confort, cela a permis une diminution de 9 à 100 % des heures d'inconfort avec une baisse de la température intérieure maximale de l'ordre de 1,2 à 3,3°C. En outre, les réductions de température les plus importantes concernaient les bâtiments peu isolés situés dans des zones où le refroidissement est prédominant. Cependant, aucune ville étudiée ne correspond au climat tempéré océanique caractéristique de la Belgique, catégorisée Cfb dans la classification de Köppen-Geiger [54].

Pour le climat poitevin, similaire à celui de la Belgique, Bozonnet et *al.* ont mesuré l'impact d'un revêtement réfléchissant sur le comportement thermique estival d'un duplex situé sous les combles et dépourvu de système de refroidissement en s'appuyant sur un suivi *in situ* assorti d'un modèle calibré sur TRNSYS [55]. L'habillage du toit plat asphalté avec une peinture blanche dont la réflectivité solaire vaut 0,88 et l'émissivité thermique 0,90 induit une baisse de 12,5°C de la température de surface extérieure moyenne et de 8,4°C de la température opérative moyenne des combles. Au sein du logement, la température opérative moyenne des pièces du niveau supérieur est réduite de 0,7°C par rapport au modèle de référence, dont la toiture et les combles sont respectivement isolés avec une couche de dix et de vingt centimètres de laine minérale, tandis que la baisse atteint près de 6°C dans le cas du modèle ne disposant pas d'isolation. Toutefois, cette étude a été réalisée sur la période du 1<sup>er</sup> juin au 30 août et ne permet donc pas d'évaluer la performance annuelle de tels revêtements.

Une étude de Pisello et Cotana s'est attachée à décrire l'incidence thermique annuelle de tuiles réfléchissantes (avec  $\rho_{sol} = 0,67$  et  $\varepsilon_{th} = 0,88$ ) par rapport à des tuiles standards (avec  $\rho_{sol} = 0,19$  et  $\varepsilon_{th} = 0,89$ ) pour le modèle d'une maison unifamiliale typique du bassin méditerranéen, calibrée sur le logiciel EnergyPlus et exposée aux conditions climatiques de quatre villes, dont Munich qui est caractérisée par un climat tempéré océanique [56]. La toiture dispose d'un coefficient de déperdition thermique U de  $1,14 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  et le reste du bâtiment présente également un niveau d'isolation assez faible. Le bâtiment est équipé d'une chaudière à gaz avec un coefficient de performance de 0,85 ; d'un système de climatisation multi-split avec un coefficient de performance de 3,47 ; et de ventilo-convecteurs. Les résultats montrent que les tuiles réfléchissantes génèrent une baisse de  $4,5^\circ\text{C}$  de la température moyenne des combles en juillet, permettant de s'affranchir du système de climatisation. En outre, l'impact de ces tuiles sur les températures intérieures est négligeable en période hivernale.

Kolokotroni et *al.* ont mené une étude expérimentale, couplée à un modèle calibré sur TRNSYS, portant sur les implications thermiques et énergétiques de l'application d'une peinture réfléchissante (avec  $\rho_{sol} = 0,60$  et  $\varepsilon_{th} = 0,88$ ) sur la toiture asphaltée (avec  $U = 0,60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  et  $\rho_{sol} = 0,10$ ) d'un bureau paysager situé au quatrième et dernier étage d'un immeuble londonien exposé à un climat tempéré océanique [57]. Le bâtiment est chauffé de manière centralisée et ventilé naturellement. Il apparaît que cette peinture induit une réduction de 18 et 38 % du nombre d'heures d'occupation pendant lesquelles la température opérative est supérieure à  $25$  et  $28^\circ\text{C}$  sur la période de mai à septembre. En parallèle, la consommation annuelle d'énergie a baissé de respectivement 0,6 et 4,3 % pour des taux de renouvellement d'air de quatre et deux volumes par heure. De plus, une analyse paramétrique montre que pour une réflectivité solaire constante de 0,70 et toutes choses égales par ailleurs, une diminution du niveau d'isolation engendre une hausse relative des économies d'énergie.

Afin de minimiser les besoins annuels en énergie, Piselli et *al.* ont entrepris de déterminer les niveaux d'isolation thermique et de réflectivité solaire optimaux à partir du modèle EnergyPlus d'un bureau de plain-pied fictif situé à Paris [58]. Le bâtiment est muni d'une pompe à chaleur air-air dimensionnée pour le refroidissement et d'une chaudière d'appoint avec une consigne inférieure de  $20^\circ\text{C}$  et supérieure de  $26^\circ\text{C}$ . La toiture présente initialement un coefficient U de  $0,25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  et une réflectivité solaire de 0,30. Ainsi, une réflectivité solaire de 0,80 associée à l'absence d'isolation a produit une hausse de 17 % des besoins en chaud et une baisse de 8 % des besoins en froid pour une diminution des besoins globaux de près de 1 %. Pour une réflectivité solaire de 0,80 toujours, une augmentation de l'isolation permet d'éliminer la pénalité de chauffage en faisant baisser les besoins globaux de 3 %. D'un point de vue strictement énergétique, la meilleure configuration associe une réflectivité solaire élevée à une enveloppe performante. Or, le gain étant marginal à partir d'un certain seuil d'isolation, l'optimum énergétique ne correspond pas nécessairement à l'optimum économique.

Les faibles gains obtenus des surfaces réfléchissantes impliquent que les occupants pourraient faire peser la balance énergétique dans un sens comme dans l'autre. Pisello et *al.* ont abordé cette question dans un article portant sur l'influence des habitants sur la réponse thermique et énergétique estivale d'un duplex situé dans les combles d'un bâtiment pérugin doté de tuiles réfléchissantes (avec  $\rho_{sol} = 0,73$ ) [59]. L'étude compare les données mesurées *in situ* à celles d'un double virtuel calibré sur EnergyPlus avec une réflectivité solaire de 0,45 pour les tuiles standards, un coefficient U de 1,22 W/m<sup>2</sup>.K pour la toiture et une consigne de refroidissement de 26°C. Les tuiles réfléchissantes génèrent ainsi une baisse de près de 40 % de la surchauffe de l'attique sur la période du 1<sup>er</sup> juin au 3 septembre (voire 83 % lorsqu'elles sont accompagnées de comportements adaptés) et une réduction de moitié de l'énergie primaire nécessaire au refroidissement pour le mois le plus chaud. La ventilation naturelle et les protections solaires ont été les mesures les plus efficaces pour limiter la surchauffe. Par contre, une utilisation intensive de l'éclairage et des équipements électriques pourrait réduire ces bénéfices.

Quoiqu'il en soit, la performance des revêtements réfléchissants sera obligatoirement affectée par le changement climatique étant donné leur durée de vie de 15 à 30 ans [60]. Dans ce contexte, Bamdad a étudié l'évolution de leur impact énergétique pour les conditions climatiques actuelles et futures de plusieurs villes australiennes jouissant d'un climat tempéré océanique et d'après les scénarios RCP4.5 et 8.5 [61]. Le cas d'étude, modélisé sur EnergyPlus, est un vaste pavillon résidentiel dont la toiture présente une réflectivité solaire initiale de 0,25 et pour laquelle deux coefficients U sont considérés ; soit 0,25 et 0,49 W/m<sup>2</sup>.K. Les résultats suggèrent que le bilan énergétique global pour une réflectivité solaire portée à 0,90 ne serait positif qu'à partir de l'horizon 2050 pour le modèle le plus isolé et vers 2070 pour le second, selon le scénario et la localisation. Il se pourrait également que la demande en froid surpasse celle en chaud dès 2070, dans le pire scénario. Enfin, il semblerait que le bilan global ne devienne positif qu'à partir du moment où les besoins en froid représentent environ 40 % de celui-ci.

En résumé, le potentiel de refroidissement des revêtements réfléchissants est supérieur dans les zones caractérisées par un ensoleillement élevé et des besoins en froid importants. L'augmentation de la réflectivité solaire permet de limiter sensiblement l'échauffement de surface et, par extension, de diminuer l'inconfort en réduisant les températures intérieures. La différence de température est particulièrement marquée dans les pièces situées sous la toiture et lorsque celle-ci est peu isolée. Bien que les pénalités de chauffe soient minimales en période hivernale, le bilan énergétique reste incertain en raison du poids relatif des besoins en chaud dans les climats tempérés. Les occupants peuvent considérablement améliorer le comportement thermique et énergétique d'un bâtiment en adoptant des gestes appropriés comme l'ajustement des températures, la pratique d'une ventilation naturelle et la gestion des protections solaires. Finalement, le changement climatique devrait contribuer à réduire les besoins en chaud et à augmenter les besoins en froid, améliorant donc le bilan énergétique.

## V. Méthodologie

Indépendamment du climat auquel ils sont exposés, l'aptitude des revêtements réfléchissants à réduire la température intérieure des bâtiments n'est plus à démontrer. Pourtant, le bien-fondé de leur utilisation dans les climats tempérés d'Europe de l'Ouest demeure incertain en raison d'un bilan énergétique global pénalisé par l'augmentation des besoins en chauffage. De fait, ceux-ci ne peuvent constituer une mesure adéquate d'adaptation au changement climatique que dans la mesure où ils permettent de réduire la consommation d'énergie et, par extension, les émissions de gaz à effet de serre, par rapport à une solution de refroidissement actif qui produirait un effet équivalent en matière de confort. D'autre part, l'efficacité énergétique de tels revêtements peut être significativement impactée par le comportement des habitants. L'objectif consistera donc à évaluer les performances thermiques et énergétiques des toitures réfléchissantes en intégrant le rôle des occupants dans le but de fournir des indications sur la pertinence de les mobiliser pour le climat actuel et les climats futurs.

L'étude sera réalisée au moyen de la dix-huitième version de TRNSYS (acronyme de TRAnSient SYstem Simulation tool), un outil de simulation dynamique développé par l'Université du Wisconsin fournissant des résultats plus détaillés que des calculs statiques, notamment en ce qui concerne la surchauffe, tout en s'affranchissant des contraintes inhérentes aux expérimentations en conditions réelles, telles que le budget ou la temporalité. A partir d'un modèle construit avec le plugin TRNSYS3D dans le logiciel de modélisation Google SketchUp™, l'interface graphique de TRNSYS (Simulation Studio) permet de produire, après l'encodage des caractéristiques du bâtiment dans TRNBuild, une série d'indicateurs qui serviront de base à l'analyse. Outre les indicateurs énergétiques (besoins annuels en chaud et en froid), des indicateurs de confort (heures de surchauffe, degrés-heures de surchauffe) et des indicateurs thermiques (températures opératives des différentes zones thermiques et températures superficielles intérieures et extérieures des toitures) seront mobilisés pour l'analyse.

Pour chaque scénario climatique et chaque horizon temporel, le coefficient de réflectivité solaire  $\rho_{sol}$  des pans de toiture du bâtiment est ajusté par incrément de 0,20 à partir de 0,10 – correspondant à la réflectivité solaire de tuiles noires, utilisée comme valeur de référence – jusqu'à 0,90 (tuiles sur lesquelles est appliqué un revêtement réfléchissant) en passant par 0,30 (tuiles rouges en terre cuite). Cette démarche est appliquée au bâtiment dans son état d'origine et après amélioration de l'enveloppe conformément aux exigences du standard Q-ZEN. Cette méthode est ensuite répliquée en intégrant la capacité des occupants à améliorer leur confort en ventilant intensivement la nuit et en utilisant des protections solaires. Un second modèle du bâtiment, intégrant l'ombrage généré par une installation photovoltaïque, doit permettre de comparer les effets thermiques et énergétiques de modules photovoltaïques avec ceux d'une toiture identique traitée avec un revêtement réfléchissant.

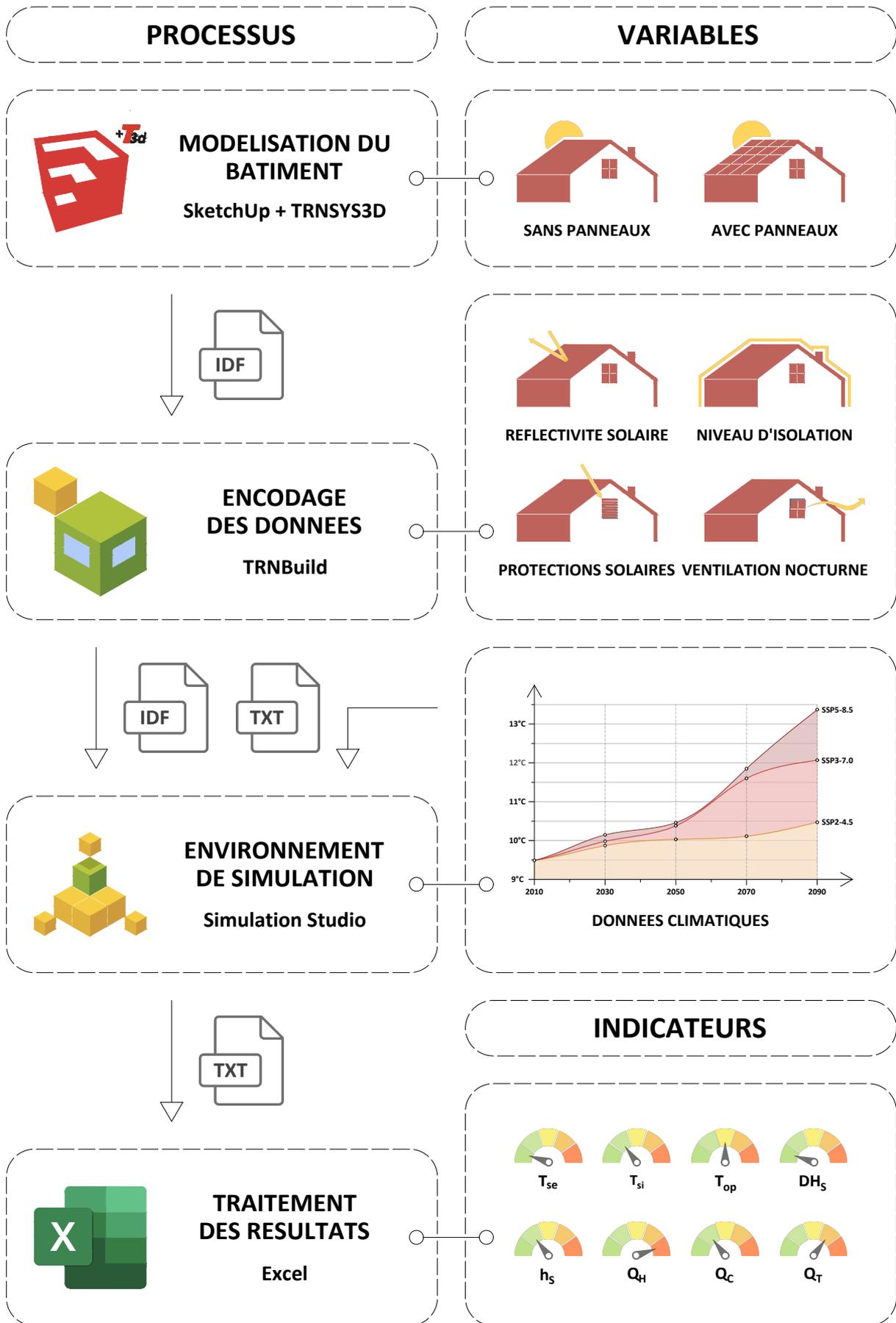


Figure 3 : méthodologie.

## 5.1. Le cas d'étude

### 5.1.1. Plans du bâtiment

Le bâtiment en question est une maison unifamiliale bordée par deux habitations, au nord-ouest et au sud-est, de typologie et de gabarit identiques. Le corps principal, datant des années 1920, est un volume rectangulaire surmonté de combles non aménagés et d'une toiture à double-versant. Parallèlement à la construction d'une extension de plain-pied au début des années 2000, la toiture a été isolée, les fenêtres remplacées et un plancher en béton s'est substitué au plancher d'origine. Le logement comporte deux niveaux répartis sur une surface de 152 m<sup>2</sup> : 83 m<sup>2</sup> au rez-de-chaussée et 69 m<sup>2</sup> à l'étage. Au rez-de-chaussée, le hall d'entrée constitue un sas permettant d'accéder à la cuisine, la cage d'escalier et la salle à manger. Cette dernière s'ouvre en enfilade sur le salon et l'extension, dont les grandes baies vitrées, exposées au sud-ouest, donnent sur un jardin arboré – également accessible par la chaufferie, à laquelle sont accolées les premières toilettes. Enfin, un escalier composé de deux volées de huit marches chacune permet d'accéder à l'étage supérieur, trois mètres plus haut.

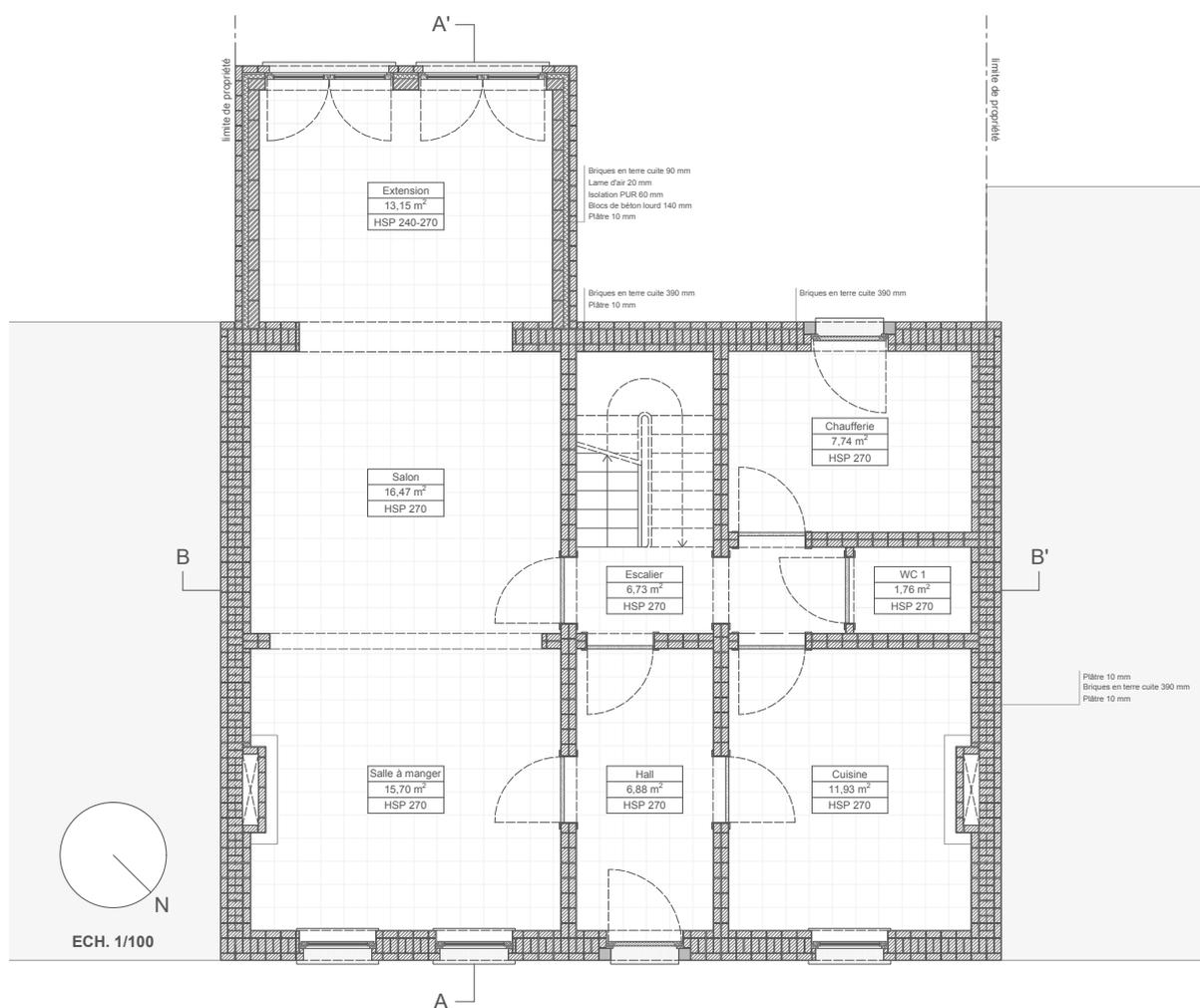


Figure 4 : plan du rez-de-chaussée.

Le plancher séparant les deux niveaux est constitué de voussettes en briques recouvertes par une chape de compression, un lattage et un parquet en bois massif ; le tout repose sur de poutres en bois de section carrée. Le premier étage, présentant une hauteur sous plafond plus faible, est organisé autour d'un palier distribuant sur les trois chambres, les secondes toilettes et la salle de bain. La plus grande pièce, la chambre parentale, dispose de trois fenêtres orientées nord-est et est parcourue par le conduit de cheminée de la salle à manger. Les deux autres chambres, situées de part et d'autre de la chambre parentale, sont celles des enfants. Moins spacieuses, la première est pourvue de deux ouvertures exposées au sud-ouest alors que la deuxième, traversée par le conduit de cheminée de la cuisine, ne dispose que d'une unique fenêtre orientée nord-est. La salle de bain, servant aussi de buanderie, ne dispose que d'une ouverture. L'ensemble des murs de partition intérieure, aussi bien au rez-de-chaussée qu'au premier étage, sont composés de briques et recouverts de plaques de plâtre. Sur le palier, une trappe au niveau du plafond permet d'accéder aux combles. Une série de bâtiments, en vis-à-vis au nord-est, portent ombre sur le bâtiment en début de matinée. A l'ouest, une extension occulte partiellement le soleil dans la chaufferie et la salle de bain en fin d'après-midi.

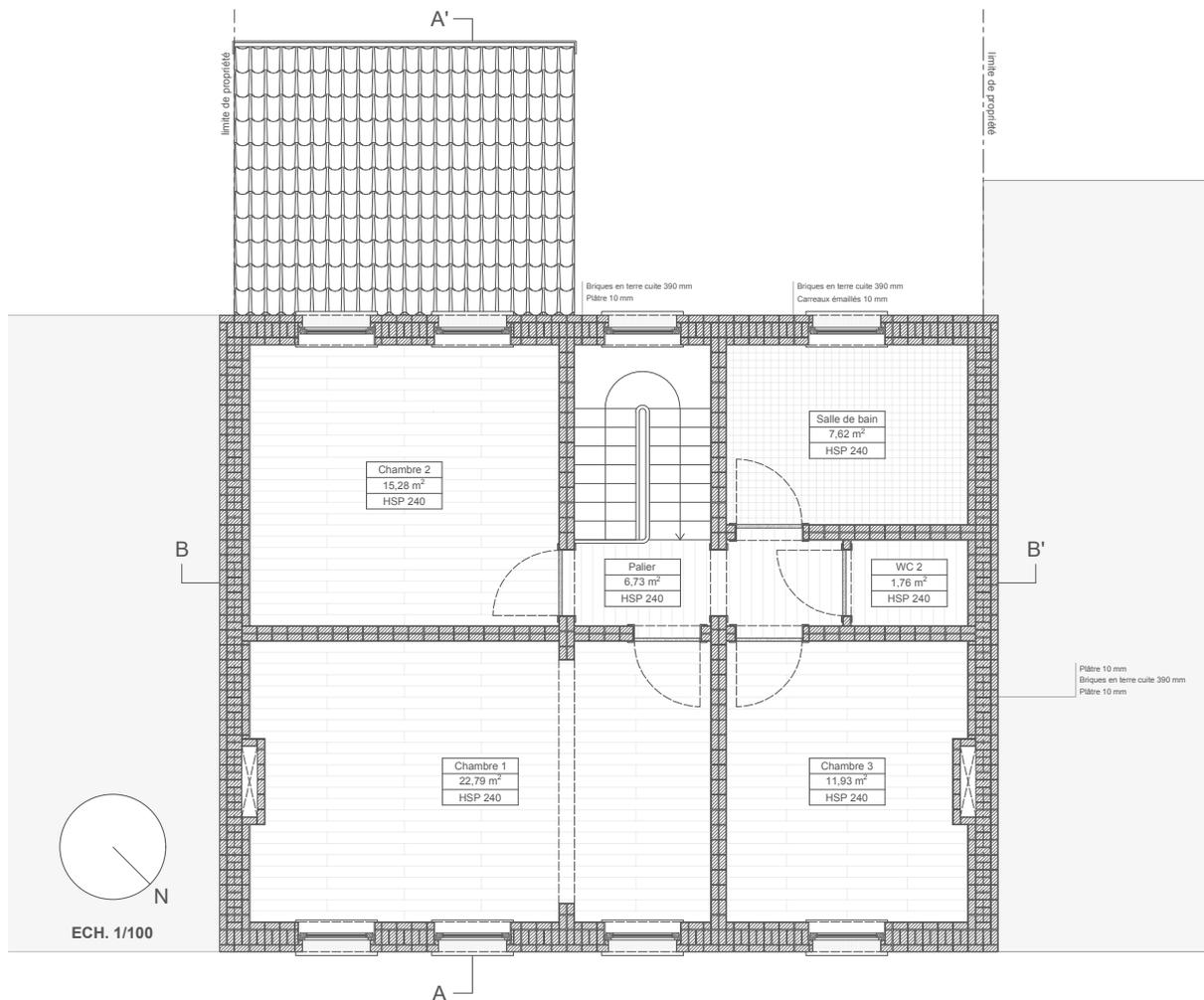


Figure 5 : plan du premier étage.

### 5.1.2. Caractéristiques de l'enveloppe

La volumétrie du bâtiment génère cinq pans de façade auxquelles s'ajoutent les deux murs mitoyens ainsi que trois pans de toiture pour une surface de déperdition de 346 m<sup>2</sup> et un volume protégé de 688 m<sup>3</sup>. La compacité volumique du bâtiment affiche une valeur de 1,99 mètre – valeur favorisée par la mitoyenneté des murs pignons, mais pénalisée par l'importante surface de toiture et la saillie que constitue l'extension. Au rez-de-chaussée, le plancher présente une surface d'environ 100 m<sup>2</sup>, dont 15 m<sup>2</sup> pour le plancher de l'extension. La façade nord-est, d'une superficie de 55 m<sup>2</sup>, est vitrée à hauteur de 16 %, soit un peu plus de 9 m<sup>2</sup>. La façade opposée, au sud-ouest, est caractérisée par une surface de 43 m<sup>2</sup>, dont 5 m<sup>2</sup> de vitrage, soit un ratio légèrement supérieur à 11 %. La paroi sud-ouest de l'extension comprend 7 m<sup>2</sup> d'ouvertures, représentant 62 % de la façade, pour une surface totale un peu au-dessus de 11 m<sup>2</sup>. Les murs aveugles de l'extension, orientés respectivement au nord-ouest et au sud-est, font chacun aux alentours de 9 m<sup>2</sup>. Les pans de toiture du volume principal couvrent 103 m<sup>2</sup> à eux deux, tandis que celui de l'annexe est légèrement inférieur à 16 m<sup>2</sup>. Pour finir, le bâtiment dispose d'une surface de plancher chauffé totale d'approximativement 183 m<sup>2</sup>.

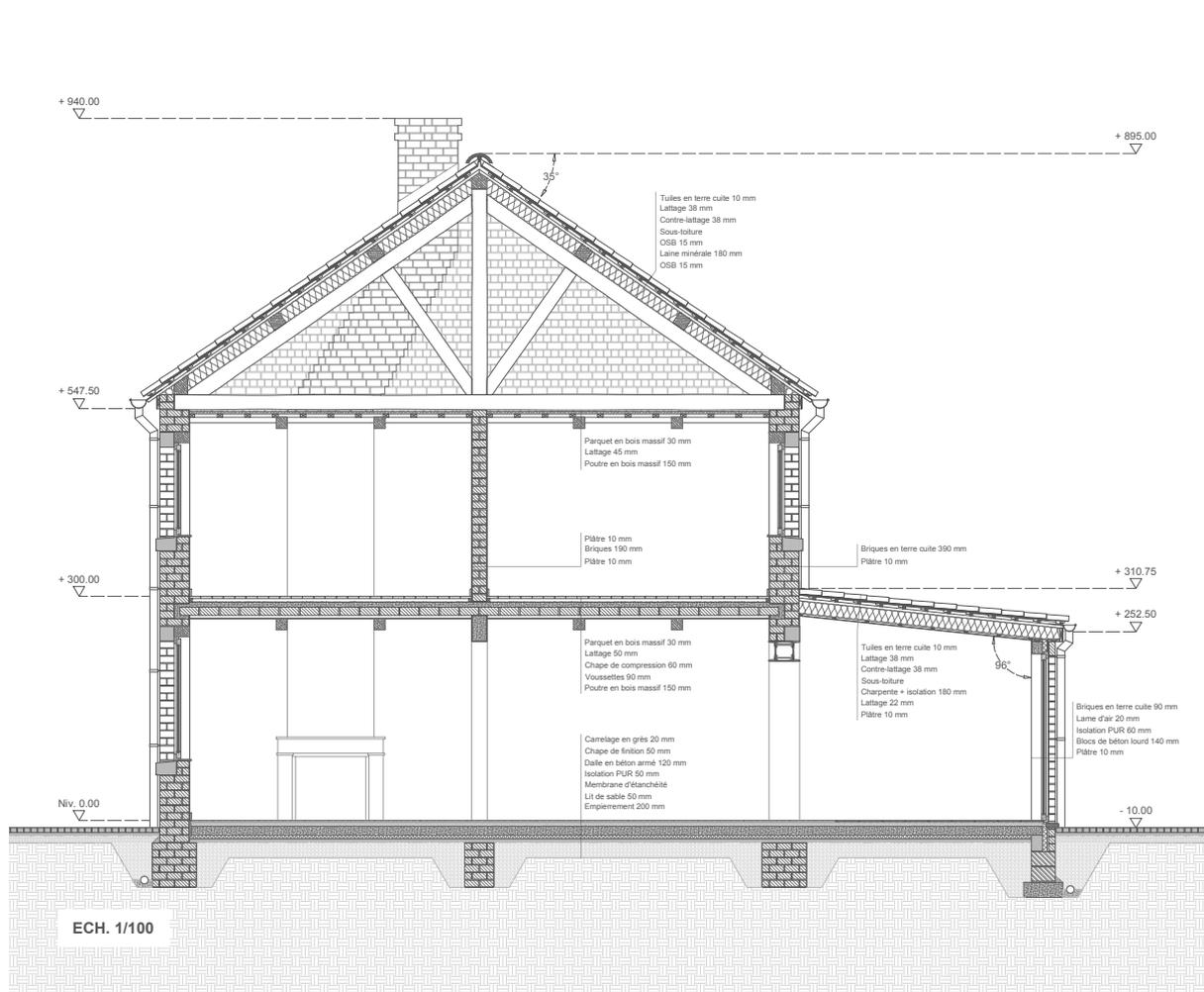
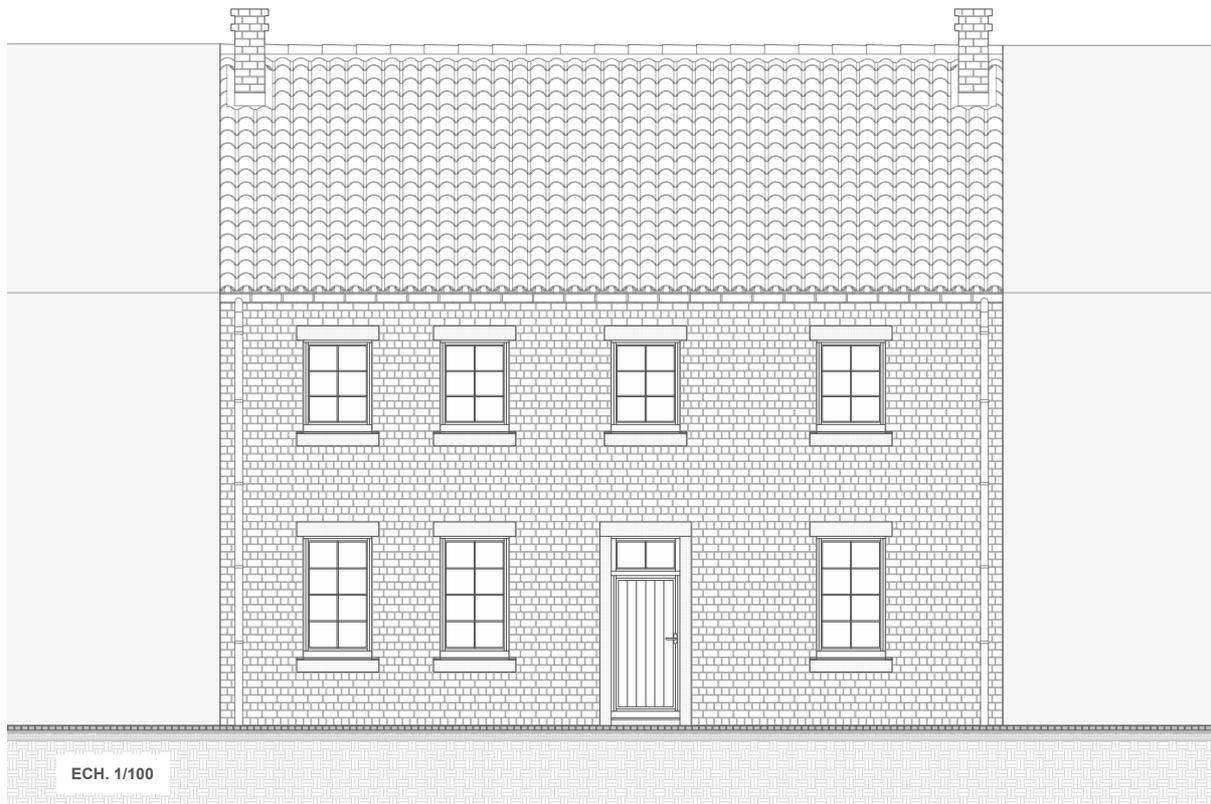


Figure 6 : coupe A-A'.

Le volume d'origine est ceint par des murs massifs de 39 centimètres d'épaisseur, appareillés debout, non isolés et enduits de plâtre à l'intérieur. L'extension est composée de murs creux en blocs de béton lourd dont la coulisse est partiellement remplie par des panneaux isolants en polyuréthane et protégée par une rangée de briques appareillées en panneresses. L'ensemble des fenêtres sont constituées de châssis en bois munis de double vitrage. A l'exception des deux baies vitrées de l'extension, toutes les fenêtres présentent des croisillons. Les linteaux et les seuils des ouvertures sont respectivement en pierre naturelle à l'extérieur et en bois à l'intérieur, tandis que les linteaux des baies vitrées sont en béton armé avec un parement de briques sur chant. Le nouveau plancher est constitué d'une dalle en béton armé isolée par cinq centimètres de polyuréthane et parachevée par un carrelage en grès posé sur une chape de finition. Les versants de toiture du volume principal, inclinés à 35°, sont constitués d'une charpente traditionnelle en bois sur laquelle reposent 18 centimètres de laine minérale posée en sarking et une couverture de tuiles canales en terre cuite rouges. La toiture de l'extension présente une composition similaire, mais présente une pente d'approximativement 6°.



Figure 7 : coupe B-B'.



*Figure 8 : élévation nord-est.*



*Figure 9 : élévation sud-ouest.*

### 5.1.3. Systèmes et équipements

La production centralisée de chaleur et sa distribution sont assurées par une chaudière à mazout d'une puissance de 20 kW et une série de radiateurs placés en allège – c'est-à-dire sous les fenêtres des espaces chauffés – ou contre un mur en ce qui concerne le salon, ne disposant pas de fenêtres, et l'extension qui nécessite une zone de dégagement pour l'ouverture des baies vitrées. Le système dispose respectivement d'un rendement de production ( $\eta_{production}$ ) de 85 %, de distribution ( $\eta_{distribution}$ ) de 90 %, d'émission ( $\eta_{émission}$ ) de 95 % et de régulation ( $\eta_{régulation}$ ) de 90 % pour un rendement global ( $\eta_{global}$ ) de 65 %. En considérant un pouvoir calorifique inférieur de 10 kWh par litre de combustible, le volume de mazout  $V_{comb.}$  consommé annuellement peut être déterminée à partir des besoins nets en chauffage avec la formule (3) ci-dessous. En multipliant le résultat par le coût unitaire (en euro par litre) ou par les émissions unitaires (en kg de CO<sub>2</sub> par litre), il est ensuite possible d'obtenir le coût annuel et les émissions de GES associés à la consommation du combustible.

$$V_{comb.} = \frac{Q_{net,ch.}}{\eta_{global} * PCI_{comb.}} \quad (3)$$

Où :

- $V_{comb.}$  = volume de mazout consommé annuellement [l/an] ;
- $Q_{net,ch.}$  = besoins annuels en énergie de chauffage [kWh/an] ;
- $\eta_{global}$  = rendement global du système [%] ;
- $Q_{net,ch.} / \eta_{global}$  = besoins annuels finaux en énergie de chauffage [kWh/an] ;
- $PCI_{comb.}$  = pouvoir calorifique inférieur du mazout [kWh/l].

La production d'eau chaude sanitaire, dont le stockage est permis par un ballon d'une capacité de 160 litres, est également prise en charge par la chaudière. Le système de ventilation correspond à un système C avec alimentation naturelle dans le séjour et les chambres et extraction mécanique dans les pièces humides, c'est-à-dire la cuisine, la chaufferie et les sanitaires. Le bâtiment ne comporte ni système de refroidissement ni installation photovoltaïque dans sa configuration initiale. En considérant que seuls les pans de toiture exposés au sud-ouest sont exploités pour une hypothétique installation photovoltaïque, qu'un module de dimension standard fait 1,65 m<sup>2</sup> (1,65 x 1,00 m) et que les distances réglementaires entre les limites de la toiture et l'installation sont respectées, le versant sud-ouest de la toiture du volume principal pourrait accueillir un total de vingt modules disposés en format paysage sur quatre rangées horizontales de cinq modules (27 m<sup>2</sup>). La toiture de l'extension, moins adaptée en raison de sa faible inclinaison et de l'ombrage généré par la maison voisine en début de matinée, pourrait théoriquement accueillir quatre modules organisés en deux rangées horizontales de deux modules (7 m<sup>2</sup>) avec un système de rails qui porterait l'inclinaison des panneaux à dix degrés.

## 5.2. La modélisation 3D

Les plans présentés aux sections qui précèdent ont permis d'élaborer un modèle tridimensionnel du bâtiment [voir Figure 10] au moyen du logiciel Google SketchUp™ et du plugin TRNSYS3D. Le zonage thermique correspond globalement aux différentes pièces de l'habitation, à l'exception de la chaufferie et des toilettes du rez-de-chaussée qui ont été rassemblées en une seule et unique zone, au même titre que la salle de bain et les toilettes du premier étage. Finalement, le modèle comporte un total de treize zones thermiques [voir Figure 11] : la salle à manger (*SAM*), le salon (*Salon*), l'extension (*Extension*), le hall d'entrée (*Hall*), la cage d'escalier (*Escalier*), la cuisine (*Cuisine*), la chaufferie et les toilettes attenantes (*Chaufferie*), la chambre parentale (*Chambre\_1*), une première chambre d'enfant (*Chambre\_2*), le palier du premier étage (*Palier*), la seconde chambre d'enfant (*Chambre\_3*), la salle de bain et les toilettes adjacentes (*SDB*) et les combles du bâtiment (*Combles*).

Les limites du modèle correspondent aux côtés extérieurs des parois, tandis que les murs de refend et les planchers intérieurs sont scindés en leur milieu. Au niveau des façades, une ligne de démarcation permet de dissocier les parties de parois à l'air libre de celles en contact avec le sol. Le plan horizontal entre les zones *Escalier* et *Palier*, correspondant à la trémie de l'escalier, est caractérisé en tant que « *virtual surface* ». Des conditions limites identiques sont assignées aux surfaces séparant des zones ayant les mêmes consignes de température, ainsi qu'aux murs mitoyens. Finalement, les « *shading group* » permettent de simuler l'ombre générée par les bâtiments voisins et les embrasures de fenêtre. Afin de comparer l'effet thermique des revêtements réfléchissants avec celui des panneaux photovoltaïques, montés avec une surimposition de dix centimètres, deux modèles distincts ont été réalisés : le modèle de base, sans panneaux, et un second modèle comportant deux « *shading group* » figurant l'ombre projetée par leur installation sur la toiture du volume principal et celle de l'extension.

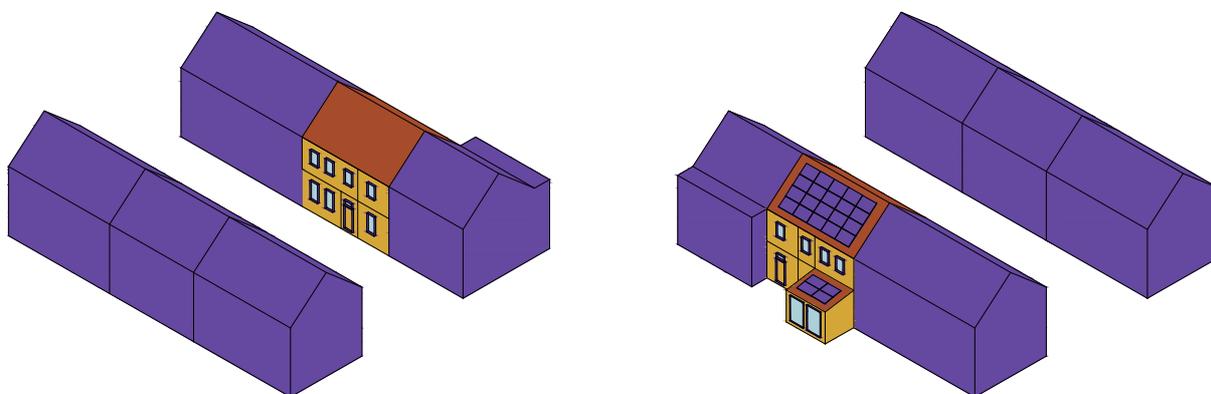
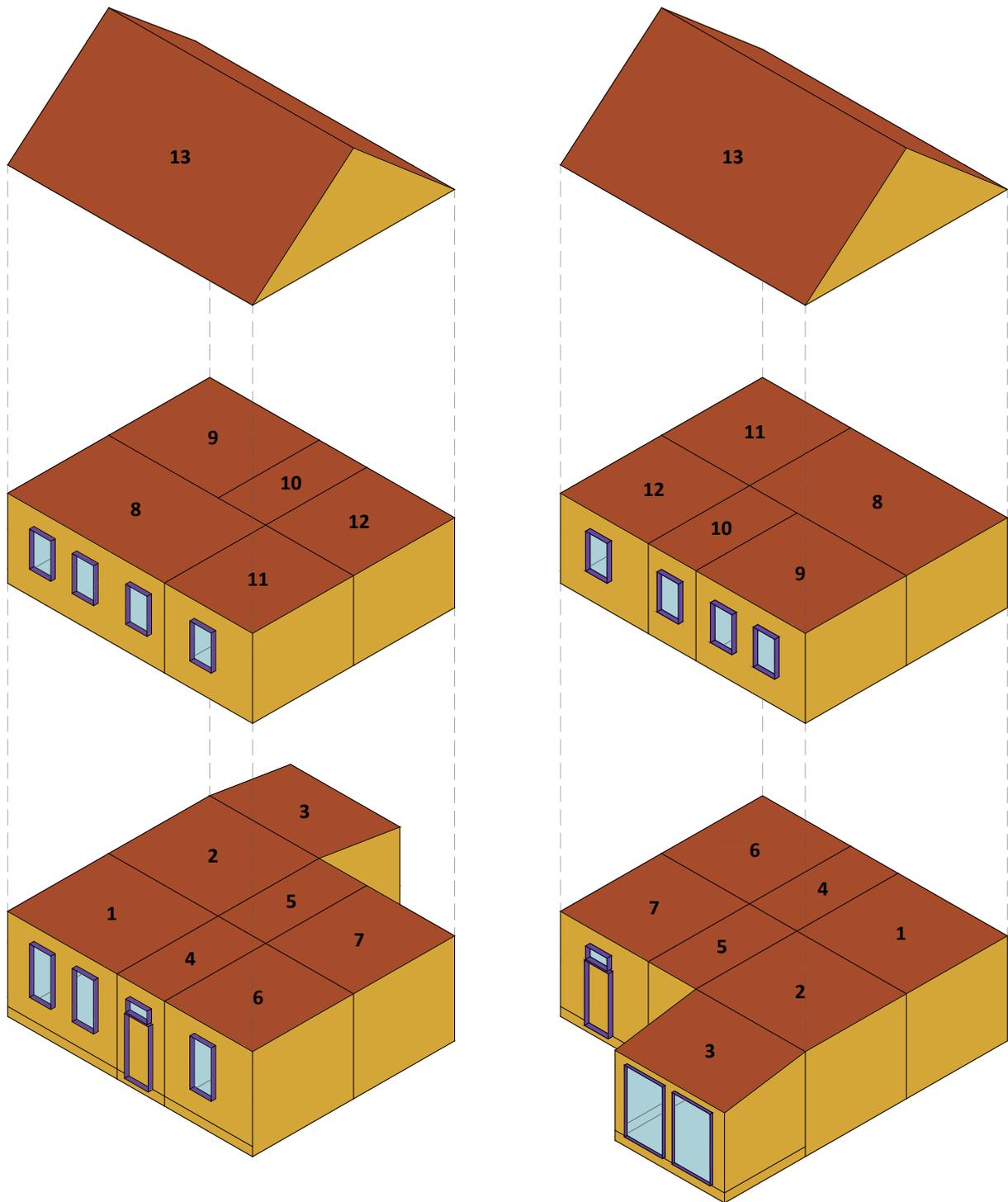


Figure 10 : vues axonométriques nord (à gauche) et sud (à droite) du modèle avec panneaux.



**LÉGENDE :**

<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #d4a017; border: 1px solid black;"></span> WALL / DOOR	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black;"></span> LIMITE	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4a017;"></span> 3 EXTENSION	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4a017;"></span> 7 CHAUFFERIE	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4a017;"></span> 11 CHAMBRE 3
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #a0522d; border: 1px solid black;"></span> CEILING / ROOF	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black;"></span> PROJECTION	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4a017;"></span> 4 HALL	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4a017;"></span> 8 CHAMBRE 1	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4a017;"></span> 12 SDB
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #add8e6; border: 1px solid black;"></span> WINDOW	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4a017;"></span> 1 SAM	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4a017;"></span> 5 ESCALIER	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4a017;"></span> 9 CHAMBRE 2	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4a017;"></span> 13 COMBLES
<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #483d8b; border: 1px solid black;"></span> SHADING GROUP	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4a017;"></span> 2 SALON	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4a017;"></span> 6 CUISINE	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: #d4a017;"></span> 10 PALIER	

Figure 11 : vues axonométriques nord (à gauche) et sud (à droite) des zones thermiques.

## 5.3. L'encodage des données

La modélisation terminée, le fichier « .idf » généré par TRNSYS3D est importé dans le logiciel TRNBuild afin d'encoder les données relatives aux aspects constructifs du bâtiment, au fonctionnement des systèmes de chauffage et de refroidissement, aux débits de ventilation ou encore aux gains internes dus aux occupants et aux équipements. En premier lieu, les éléments constructifs sont caractérisés et assignés aux parois correspondantes. Ensuite, des profils sont définis pour chaque zone thermique sur base des habitudes du ménage. Ces profils permettent de définir les heures de fonctionnement des systèmes, les consignes de température, ainsi que la fréquence et l'intensité des gains internes au sein de chaque zone. Pour finir, les sorties de températures de surface et de températures opératives relatives aux différentes zones thermiques sont définies dans l'onglet dédié.

### 5.3.1. Éléments constructifs

Le Tableau 2 ci-dessous reprend les propriétés des différents matériaux constitutifs des parois nécessaires pour le calcul des transferts thermiques, ces propriétés sont : la conductivité thermique, exprimant la capacité du matériau à transmettre la chaleur de proche en proche ; la capacité thermique massique, représentant la quantité d'énergie à apporter pour élever d'un degré la température d'un kilogramme de matériau ; ainsi que la masse volumique (ou densité) du matériau.

*Tableau 2 : propriétés des matériaux constitutifs des parois.*

Matériau	Conductivité [W/m.K]	Capacité [kJ/kg.K]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]
Élément structurel			
BLOC_BETON	1,45	1,00	1950
BRIQUE_ORIGINE	0,76	0,84	1950
DALLE_BETON	1,70	0,84	2243
Matériau d'isolation			
LAINE_MINERALE	0,044	1,03	30
PUR	0,035	1,40	30
Revêtement extérieur			
BRIQUE_EXTENSION	1,49	1,00	2050
CREPI	0,08	0,84	800
TUILE	0,84	0,80	1900
Finition intérieure			
BOIS_MASSIF	0,14	1,20	650
CARREAU_GRES	1,20	1,00	2000
CHAPE	1,30	0,84	2100
OSB	0,13	1,88	650
PLATRE	0,52	1,00	1100

Dans le Tableau 3 sont renseignées les données sur la composition des parois, leur épaisseur totale et leur coefficient de transmission thermique U, les coefficients de réflectivité solaire  $\rho_{sol}$  et d'émissivité thermique  $\varepsilon_{th}$  de référence des parois extérieures exposées au rayonnement solaire, ou encore les zones auxquelles sont assignées ces parois. L'indicatif 0 fait référence au bâtiment dans sa configuration initiale, tandis que l'indicatif 1 se réfère à la configuration conforme au standard Q-ZEN.

Tableau 3 : composition des parois.

Parois	Matériaux	Épaisseur [m]	Propriétés	Zone
<i>Paroi horizontale</i>				
0_PLANCHER_RO	CARREAU_GRES	0,02	U = 0,58 W/m <sup>2</sup> .K	Chaufferie
	CHAPE	0,06		Cuisine
	DALLE_BETON	0,12		Escalier
	PUR	0,05		Extension
	Total	0,25		Hall Salon SAM
1_PLANCHER_RO	CARREAU_GRES	0,02	U = 0,23 W/m <sup>2</sup> .K	Chaufferie
	CHAPE	0,06		Cuisine
	DALLE_BETON	0,12		Escalier
	PUR	0,14		Extension
	Total	0,34		Hall Salon SAM
PLANCHER_R1	BOIS_MASSIF	0,03	U = 1,81 W/m <sup>2</sup> .K	Chambre_1
	LAME_AIR	/		Chambre_2
	CHAPE	0,06		Chambre_3
	BRIQUE_ORIGINE	0,09		Chaufferie
	Total	0,18		Cuisine Hall Salon SAM SDB
PLANCHER_COMBLES	BOIS_MASSIF	0,03	U = 2,60 W/m <sup>2</sup> .K	Chambre_1
	Total	0,03		Chambre_2 Chambre_3 Combles Palier SDB
<i>Paroi verticale</i>				
0_MUR_EXTERIEUR	PLATRE	0,01	U = 2,22 W/m <sup>2</sup> .K $\rho_{sol} = 0,30$ $\varepsilon_{th} = 0,90$	Chambre_1
	BRIQUE_ORIGINE	0,39		Chambre_2
	Total	0,40		Chambre_3 Chaufferie

				Cuisine Escalier Hall Palier SAM SDB
1_MUR_EXTERIEUR	PLATRE	0,01	U = 0,23 W/m <sup>2</sup> .K $\rho_{sol} = 0,30$ $\varepsilon_{th} = 0,90$	Chambre_1 Chambre_2 Chambre_3 Chaufferie Cuisine Escalier Hall Palier SAM SDB
	BRIQUE_ORIGINE	0,19		
	PUR	0,11		
	CREPI	0,06		
	Total	0,56		
0_MUR_EXTENSION	PLATRE	0,01	U = 0,49 W/m <sup>2</sup> .K $\rho_{sol} = 0,30$ $\varepsilon_{th} = 0,90$	Extension
	BLOC_BETON	0,14		
	PUR	0,06		
	LAME_AIR	/		
	BRIQUE_EXTENSION	0,09		
	Total	0,30		
1_MUR_EXTENSION	PLATRE	0,01	U = 0,23 W/m <sup>2</sup> .K $\rho_{sol} = 0,30$ $\varepsilon_{th} = 0,90$	Extension
	BLOC_BETON	0,14		
	PUR	0,14		
	LAME_AIR	/		
	BRIQUE_EXTENSION	0,09		
	Total	0,38		
MUR_MITOYEN	PLATRE	0,01	U = 1,39 W/m <sup>2</sup> .K	Chambre_1 Chambre_2 Chambre_3 Chaufferie Combles Cuisine Salon SAM SDB
	BRIQUE_ORIGINE	0,39		
	PLATRE	0,01		
	Total	0,41		
MUR_REFEND	PLATRE	0,01	U = 2,18 W/m <sup>2</sup> .K	Chambre_1 Chambre_2 Chambre_3 Chaufferie Cuisine Escalier Hall Palier
	BRIQUE_ORIGINE	0,19		
	PLATRE	0,01		
	Total	0,21		

				Salon SAM SDB
0_PORTE	BOIS_MASSIF	0,04	U = 2,19 W/m <sup>2</sup> .K	Chaufferie
	Total	0,04	$\rho_{sol} = 0,60$ $\varepsilon_{th} = 0,5$	Hall
1_PORTE	BOIS_MASSIF	0,02	U = 0,63 W/m <sup>2</sup> .K	Chaufferie
	PUR	0,04	$\rho_{sol} = 0,60$	Hall
	BOIS_MASSIF	0,02	$\varepsilon_{th} = 0,5$	
	Total	0,08		
ENFILADE	LAME_AIR	/	U = 5,76 W/m <sup>2</sup> .K	Extension
	Total	/		Salon SAM
Paroi inclinée				
TOITURE_COMBLES	OSB	0,015	U = 0,22 W/m <sup>2</sup> .K	Combles
	LAINES_MINERALES	0,18	$\rho_{sol,ref.} = 0,10$	
	OSB	0,015	$\varepsilon_{th} = 0,90$	
	LAME_AIR	/		
	TUILE	0,01		
	Total	0,22		
TOITURE_EXTENSION	PLATRE	0,01	U = 0,22 W/m <sup>2</sup> .K	Extension
	OSB	0,015	$\rho_{sol,ref.} = 0,10$	
	LAINES_MINERALES	0,18	$\varepsilon_{th} = 0,90$	
	OSB	0,015		
	LAME_AIR	/		
	TUILE	0,01		
	Total	0,23		

Le Tableau 4 ci-dessous contient des informations relatives aux fenêtres et aux portes vitrées telles que leur identifiant dans TRNBuild, les coefficients de transmission thermique U des vitrages ( $U_g$ ), des châssis ( $U_f$ ) et de l'ensemble châssis-vitrage ( $U_w$ ), le facteur solaire g, ainsi que le pourcentage de châssis par rapport à la surface totale de la fenêtre. Encore une fois, l'indicatif 0 fait référence au bâtiment dans sa configuration initial et l'indicatif 1 à la configuration conforme au standard Q-ZEN.

Tableau 4 : propriétés des ouvertures.

Fenêtre	Identifiant	Valeur $U_g$ [W/m <sup>2</sup> .K]	Valeur $U_f$ [W/m <sup>2</sup> .K]	Valeur $U_w$ [W/m <sup>2</sup> .K]	Facteur g [%]	Châssis [%]
0_BAIE_VITREE	3200	1,69	1,93	2,07	66	35
1_BAIE_VITREE	7200	1,10	1,58	1,50	62	35
0_FENETRE_RO	3200	1,69	1,93	2,02	66	30
1_FENETRE_RO	7200	1,10	1,58	1,46	62	30
0_FENETRE_R1	3200	1,69	1,93	1,97	66	35
1_FENETRE_R1	7200	1,10	1,58	1,42	62	35
0_PORTE	3200	1,69	1,93	1,89	66	40
1_PORTE	7200	1,10	1,58	1,35	62	40

### 5.3.2. Régimes

#### a. Infiltration

Le taux d'infiltration  $n_{50}$  considéré pour l'ensemble des zones thermiques du bâtiment, indépendamment de leur aspect constructif, correspond à l'étanchéité moyenne de l'habitat belge [62] pour la situation initiale et à la valeur recommandée pour les bâtiments bas par la norme européenne EN 13779:2007, soit respectivement 8,7 et 2 renouvellements d'air par heure. Les valeurs encodées dans TRNBuild se rapportent aux taux moyens annuels de renouvellement d'air par infiltration  $\beta$  tenant compte du facteur moyen d'exposition au vent  $a$  et calculés avec la formule (4) :

$$\beta = \frac{n_{50}}{a} [h^{-1}] \quad (4)$$

Où :

- $\beta$  = taux moyen annuel de renouvellement d'air par infiltration [ $h^{-1}$ ] ;
- $n_{50}$  = taux de renouvellement d'air par infiltration pour un différentiel de 50 pascals [ $h^{-1}$ ] ;
- $a$  = facteur moyen d'exposition au vent = 25.

#### b. Ventilation

Le Tableau 5 ci-après répertorie les flux de ventilation déterminés pour chaque zone d'après les débits requis par la réglementation PEB concernant le secteur résidentiel et du schéma de ventilation du bâtiment. Au rez-de-chaussée, l'alimentation en air frais se fait par l'extension et la salle à manger, tandis qu'à l'étage, elle est assurée dans chaque chambre. L'air vicié est extrait dans les pièces humides (cuisine et salle de bain) et dans la chaufferie après avoir transité par le salon, le hall d'entrée, la cage d'escalier ou le palier. Les débits sont identiques dans chaque configuration et dépendent de l'occupation du bâtiment. Dans TRNBuild, seuls les flux d'alimentation en air frais sont encodés après que ceux-ci aient été préalablement convertis d'un débit volumique [ $m^3/h$ ] à un débit massique [ $kg/h$ ].

Tableau 5 : débits de ventilation.

Zone	Surface [ $m^2$ ]	Alimentation [ $m^3/h$ ]	Transfert [ $m^3/h$ ]	Transfert vers	Évacuation [ $m^3/h$ ]
Rez-de-chaussée					
Extension	13,15	112,5	112,5	Salon	-
Salon	16,50	-	85	Escalier	-
			27,5	SAM	
SAM	15,70	112,5	140	Hall	-
Escalier	6,75	-	130	Chaufferie	-
Hall	6,90	-	140	Cuisine	-
Chaufferie	11,95	-	-	-	130
Cuisine	11,95	-	-	-	140

Premier étage					
Chambre_1	22,80	75	75	Palier	-
Chambre_2	15,30	55	55	Palier	-
Chambre_3	11,95	45	45	Palier	-
Palier	6,75	-	130	SDB	-
			45	Escalier	
SDB	11,95	-	-	-	130
Bâtiment					
Total	-	400	-	-	400

### c. Chauffage et refroidissement

Pour chaque zone, la programmation des systèmes de chauffage et de refroidissement est calquée sur l'occupation de la maison par une famille fictive de quatre personnes : deux adultes travaillant à temps plein, ainsi que deux enfants scolarisés. Les consignes de températures renseignées dans TRNBuild sont fondées sur les conseils de l'Agence de la transition écologique (ADEME), préconisant :

- 19 à 21°C dans le séjour (salon, salle à manger, etc.) ;
- 17°C dans les espaces de nuit tels que les chambres ;
- 22°C dans la salle de bain lorsque celle-ci est occupée [63].

Pour le séjour – regroupant les zones *SAM*, *Salon* et *Extension* – et la cuisine, la consigne a été fixée à 19°C afin d'approcher les pratiques d'une famille soucieuse de sa consommation. A l'exception de la salle de bain, où elle est fixée à 17°C, une limite basse de 16°C est appliquée à l'ensemble des zones thermiques indépendamment de la durée d'inoccupation. Cette limite basse de 16°C correspond aussi à la consigne de chauffage permanente des espaces de circulation que constituent les zones *Hall*, *Escalier* et *Palier*. La consigne de température pour le refroidissement est quant à elle fixée à 26°C, toujours d'après les recommandations de l'ADEME [64]. La part radiative de tous les systèmes d'émission de chaleur est fixée à 30 %. Le Tableau 6 reprend la programmation hebdomadaire des systèmes de conditionnement d'air ; le chauffage pouvant être mobilisé à chaque plage horaire, tandis que le refroidissement actif est uniquement mobilisable pour les plages horaires qui sont en italique.

Tableau 6 : programmation des systèmes de conditionnement d'air.

Zone	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Séjour	06:30 - 07:30	06:30 - 07:30	06:30 - 07:30	06:30 - 07:30	06:30 - 07:30	08:00 - 22:00	08:00 - 22:00
	16:00 - 22:00	16:00 - 22:00	13:00 - 22:00	16:00 - 22:00	16:00 - 22:00		
Cuisine	06:30 - 07:30	06:30 - 07:30	06:30 - 07:30	06:30 - 07:30	06:30 - 07:30	08:00 - 21:00	08:00 - 21:00
	16:00 - 21:00	16:00 - 21:00	13:00 - 21:00	16:00 - 21:00	16:00 - 21:00		
Chambre_1	00:00 - 07:30	00:00 - 07:30	00:00 - 07:30	00:00 - 07:30	00:00 - 07:30	00:00 - 24:00	00:00 - 24:00
	18:00 - 24:00	18:00 - 24:00	18:00 - 24:00	18:00 - 24:00	18:00 - 24:00		
Chambre_2	00:00 - 07:30	00:00 - 07:30	00:00 - 07:30	00:00 - 07:30	00:00 - 07:30	00:00 - 24:00	00:00 - 24:00
	16:00 - 24:00	16:00 - 24:00	13:00 - 24:00	16:00 - 24:00	16:00 - 24:00		
Chambre_3	00:00 - 07:30	00:00 - 07:30	00:00 - 07:30	00:00 - 07:30	00:00 - 07:30	00:00 - 24:00	00:00 - 24:00
	16:00 - 24:00	16:00 - 24:00	13:00 - 24:00	16:00 - 24:00	16:00 - 24:00		
SDB	06:30 - 07:30	06:30 - 07:30	06:30 - 07:30	06:30 - 07:30	06:30 - 07:30	07:30 - 08:30	07:30 - 08:30

#### d. Gains internes

Une modélisation fine du comportement thermique du bâtiment nécessite de comptabiliser les gains internes dus aux personnes et aux différents systèmes en présence, d'autant plus lorsqu'il est question d'évaluer la surchauffe puisque faire abstraction de ces gains conduirait inévitablement à sous-estimer celle-ci. Afin de représenter de manière plausible les apports de chaleur engendrés par les habitants, des profils d'occupation ont été établis pour chaque zone thermique d'après l'emploi du temps supposé des occupants [voir Figure 12]. La puissance thermique libérée à chaque instant par un corps humain est fixée à 100 W avec 60 % de pertes par radiation et 40 % de pertes par convection.

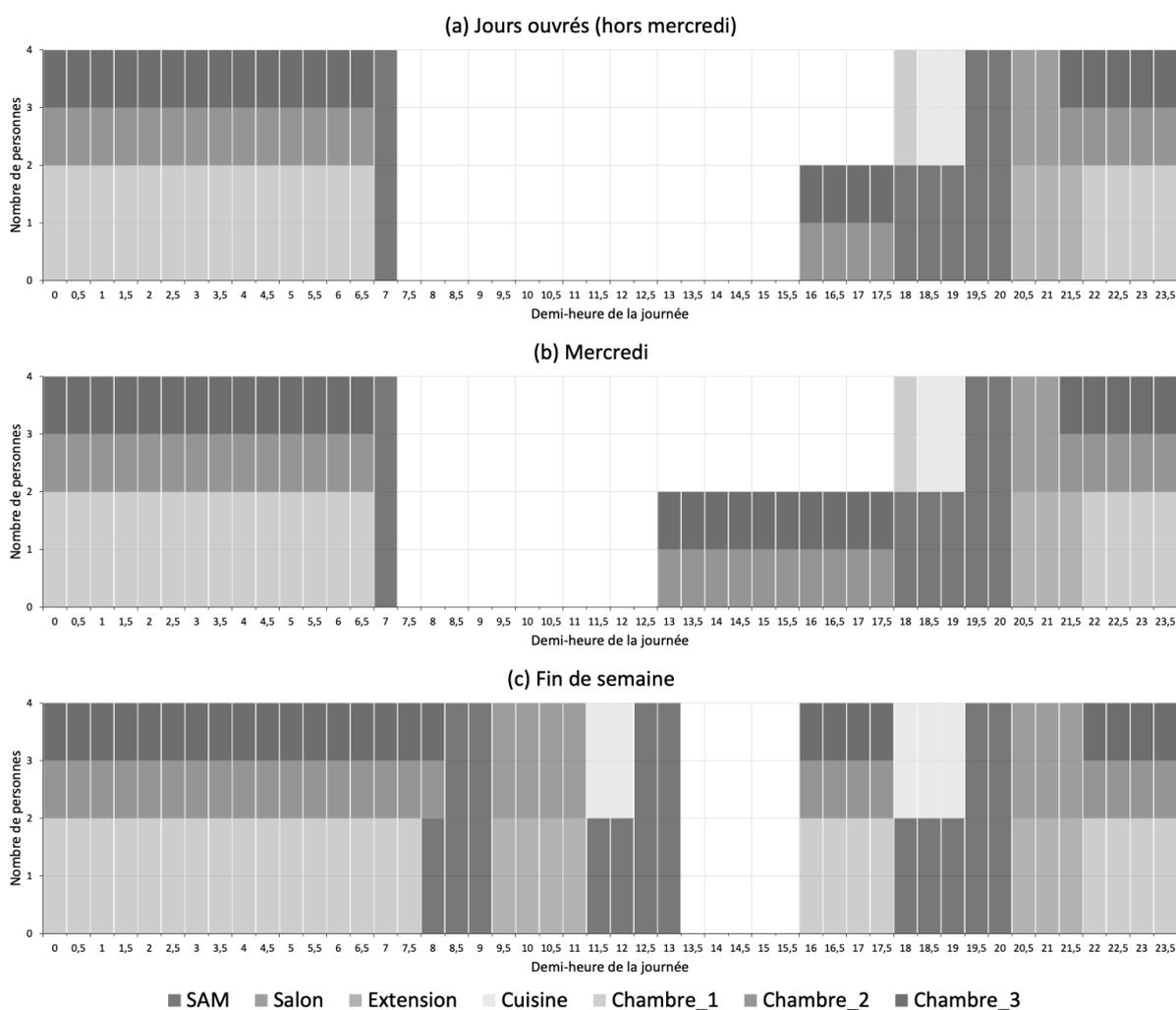


Figure 12 : profil des gains internes dus aux personnes pour (a) les jours ouvrés (hors mercredi), (b) le mercredi et (c) la fin de semaine.

Les gains internes liés à l'éclairage et aux équipements s'appuient sur la norme de la Société suisse des ingénieurs et des architectes pour une maison unifamiliale (SIA 2024), intégrée nativement dans TRNBuild, et dépendent de l'occupation [voir Tableau 7]. Ils valent respectivement 2,7 W/m<sup>2</sup> dont 70 % par radiation et 30 % par convection et 8 W/m<sup>2</sup> dont 20 % par radiation et 80 % par convection.

Un contrôle de l'éclairage artificiel selon la lumière naturelle permet de ne pas surestimer les gains de celui-ci, il est donc uniquement actif lorsque l'éclairement lumineux devient inférieur à 300 lux.

*Tableau 7 : programmation des gains internes dus aux équipements et à l'éclairage.*

Zone	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
SAM	07:00 - 07:30	07:00 - 07:30	07:00 - 07:30	07:00 - 07:30	07:00 - 07:30	08:00 - 09:30	08:00 - 09:30
	18:00 - 20:30	18:00 - 20:30	18:00 - 20:30	18:00 - 20:30	18:00 - 20:30	11:30 - 13:30 18:00 - 20:30	11:30 - 13:30 18:00 - 20:30
Salon	07:30 - 07:30	07:30 - 07:30	07:30 - 07:30	07:30 - 07:30	07:30 - 07:30	08:00 - 13:30	08:00 - 13:30
	18:00 - 21:30	18:00 - 21:30	18:00 - 21:30	18:00 - 21:30	18:00 - 21:30	18:00 - 22:00	18:00 - 22:00
Extension	20:30 - 21:30	20:30 - 21:30	20:30 - 21:30	20:30 - 21:30	20:30 - 21:30	09:30 - 11:30 20:30 - 22:00	09:30 - 11:30 20:30 - 22:00
	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	07:30 - 08:00	07:30 - 08:00
Chambre_1	18:00 - 18:30	18:00 - 18:30	18:00 - 18:30	18:00 - 18:30	18:00 - 18:30	16:00 - 18:00	16:00 - 18:00
	22:00 - 22:30	22:00 - 22:30	22:00 - 22:30	22:00 - 22:30	22:00 - 22:30	22:00 - 22:30	22:00 - 22:30
	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	08:00 - 08:30	08:00 - 08:30
Chambre_2	16:00 - 18:00	16:00 - 18:00	13:00 - 18:00	16:00 - 18:00	16:00 - 18:00	16:00 - 18:00	16:00 - 18:00
	21:30 - 22:00	21:30 - 22:00	21:30 - 22:00	21:30 - 22:00	21:30 - 22:00	22:00 - 22:30	22:00 - 22:30
	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	08:00 - 08:30	08:00 - 08:30
Chambre_3	16:00 - 18:00	16:00 - 18:00	13:00 - 18:00	16:00 - 18:00	16:00 - 18:00	16:00 - 18:00	16:00 - 18:00
	21:30 - 22:00	21:30 - 22:00	21:30 - 22:00	21:30 - 22:00	21:30 - 22:00	22:00 - 22:30	22:00 - 22:30
	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	06:30 - 07:00	08:00 - 08:30	08:00 - 08:30

### 5.3.3. Zones thermiques

Dans l'onglet « zone » de TRNBuild, le volume et la surface de chaque zone ont été ajustés pour intégrer l'épaisseur des parois, caractérisées par le logiciel en tant que surfaces ; de même, la valeur de la capacitance thermique a été corrigée pour qu'elle représente cinq fois le volume de la zone, ce qui permet de tenir compte de l'influence du contenu des pièces sur leur comportement thermique [voir Tableau 8]. Les valeurs initiales de température, soit les températures au premier pas de temps, sont définies en prenant 2024 comme année de référence : le 1<sup>er</sup> janvier tombant un lundi, elles correspondent à la température de consigne du chauffage à minuit dans la nuit de dimanche à lundi.

*Tableau 8 : données des zones thermiques.*

Zone	Volume [m <sup>3</sup> ]	Capacitance [kJ/K]	Surface [m <sup>2</sup> ]	Valeurs initiales [°C]
Chambre_1	54,70	273,50	22,79	17
Chambre_2	36,67	183,35	15,28	17
Chambre_3	28,63	143,15	11,93	17
Chaufferie	32,78	163,90	12,14	16
Combles	120,02	600,10	73,36	16
Cuisine	32,21	161,05	11,93	16
Escalier	18,17	90,85	6,73	16
Extension	32,90	164,50	13,15	16
Hall	18,58	92,90	6,88	16
Palier	16,15	80,75	6,73	16
Salon	44,47	222,35	16,47	16
SAM	42,39	211,95	15,70	16
SDB	28,63	143,15	11,93	17

## 5.4. Les paramètres de simulation

### 5.4.1. Enveloppe du bâtiment

#### a. Réflectivité solaire

Le coefficient de réflectivité solaire  $\rho_{sol}$  des toitures varie de 0,10 à 0,90 par incrément de 0,20 pour un coefficient d'émissivité thermique  $\varepsilon_{th}$  constant de 0,90 correspondant à la valeur approximée de la plupart des matériaux de couverture couramment utilisés [48]. Les valeurs encodées dans TRNBuild se rapportent aux valeurs du coefficient d'absorptivité solaire  $\alpha_{sol}$ . Le SRI de chacune de ces incréments, calculé d'après la norme ASTM E1980-11 [voir 4.2. Les propriétés physiques] pour un coefficient de convection extérieure moyen  $h_{ce}$  de 12 W/m<sup>2</sup>.K, est repris dans le Tableau 9 ci-après.

Tableau 9 : propriétés radiatives des surfaces de toiture.

Réflectivité solaire	Absorptivité solaire	Émissivité thermique	SRI
0,10	0,90	0,90	6,30
0,30	0,70	0,90	31,90
0,50	0,50	0,90	58,40
0,70	0,30	0,90	85,90
0,90	0,10	0,90	114,40

#### b. Niveau d'isolation

Les simulations sont réalisées pour deux modèles du bâtiment présentant respectivement le niveau d'isolation initial de l'habitation et un niveau d'isolation conforme aux exigences du standard Q-ZEN, imposant une consommation d'énergie pratiquement nulle pour toutes nouvelles constructions depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2021 [65]. La composition des parois du modèle d'origine a donc été ajustée dans le second modèle pour que le coefficient de transmission thermique U n'excède pas :

- 0,24 W/m<sup>2</sup>.K pour le plancher, les murs et les toitures [voir Tableau 3] ;
- 1,50 W/m<sup>2</sup>.K pour les fenêtres (ensemble châssis et vitrage) [voir Tableau 4] ;
- et 2,00 W/m<sup>2</sup>.K pour les portes [voir Tableau 3].

Les toitures du corps principal et de l'extension respectant déjà la valeur susmentionnée, aucune modification n'y ont été apportées. L'ajout d'isolant aux murs extérieurs (1\_MUR\_EXTERIEUR dans TRNBuild) étant incompatible avec le fonctionnement du Type56 pour le pas de temps utilisé, en raison d'une inertie trop importante, il a été nécessaire de réduire l'épaisseur du mur de 19 centimètres. Si le standard Q-ZEN prescrit une amélioration de l'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment, la valeur cible n'est pas précisée ; partant, la valeur recommandée par la norme européenne EN 13779:2007 a été utilisée [voir a. Infiltration]. Au final, les modifications apportées ont permis d'améliorer le niveau d'isolation thermique global de l'enveloppe en portant sa valeur de K62 à K20.

## 5.4.2. Mesures passives

### a. Ventilation nocturne

Afin de simuler une ventilation nocturne de l'habitation, le débit d'air neuf pouvant être fourni par les fenêtres est calculé selon les dimensions de l'ouvrant des fenêtres. La ventilation nocturne est uniquement pratiquée entre neuf heures et demie du soir et sept heures et demie du matin du 1<sup>er</sup> mai au 30 septembre – soit pendant les mois dont la température moyenne est supérieure à 10°C (normales de saison 1991-2020) pour l'ensemble de la Belgique [66] – dans la mesure où la température extérieure est supérieure à 16°C et inférieure à la température intérieure, ce qui doit permettre de limiter les pertes en chauffage. Le débit théorique d'air frais que peut fournir une fenêtre ouverte en oscillo-battant avec un basculement horizontal de dix centimètres est calculé tel que (5) :

$$\dot{Q}_{air} = A_{ouverture} * v_{air} * 3600 [m^3/h] \quad (5)$$

Où :

- $\dot{Q}_{air}$  = débit d'air frais d'une fenêtre en oscillo-battant [m<sup>3</sup>/h] ;
- $A_{ouverture}$  = aire d'ouverture d'une fenêtre en oscillo-battant [m<sup>2</sup>] ;
- $v_{air}$  = vitesse de l'air = 1 [m/s].

L'aire d'ouverture d'une fenêtre correspond à la somme des aires des deux passages latéraux et du passage supérieur de l'ouvrant. Au rez-de-chaussée, seules les baies de l'extension sont utilisées pour ventiler en raison du risque d'effraction que générerait l'ouverture des fenêtres de la salle-à-manger et de la cuisine, situées à rue. Lorsque les conditions sont réunies, les débits de ventilation de chacune des zones thermiques sont ajustés avec le débit théorique des ouvertures [voir Tableau 10].

Tableau 10 : débits de ventilation nocturne.

Zone [nom]	Ouverture(s) [nombre]	Dimensions [mm]	Aire d'ouverture [m <sup>2</sup> ]	Alimentation [m <sup>3</sup> /h]
Extension	2	740 x 2100	0,57	2045
Chambre_1	2	840 x 1090	0,39	1390
Chambre_2	2	840 x 1090	0,39	1390
Chambre_3	1	840 x 1090	0,19	695
Palier	1	840 x 1090	0,19	695
SDB	1	840 x 1090	0,19	695

### b. Protections solaires

Les protections solaires, disposant d'un facteur d'ombrage de 80 %, sont déployées pour toutes les fenêtres, hormis celles des portes du hall et de la chaufferie, lorsque l'irradiation globale  $I_{sol}$  excède 250 W/m<sup>2</sup> de la période du 1<sup>er</sup> mai au 30 septembre entre huit heures du matin et six heures du soir.

### 5.4.3. Données climatiques

La simulation dynamique du comportement thermique d'un bâtiment géographiquement et temporellement situé implique de disposer de données météorologiques de haute résolution spatiale et temporelle. Les données utilisées pour ce travail sont le fruit d'un article rédigé sous la direction de Sébastien Doutreloup, chercheur au sein du laboratoire de climatologie et topoclimatologie de l'Université de Liège, dans le cadre du projet de recherche OCCuPANT portant sur l'évaluation des mesures d'adaptation permettant de lutter contre les impacts sanitaires et énergétiques du changement climatique sur les bâtiments en Belgique [67]. Cet article détaille la descente d'échelle statistique d'un modèle du système Terre (ESM, pour Earth System Model) par l'intermédiaire du MAR (Modèle Atmosphérique Régional) afin de (re)construire les données météorologiques passées et futures, spatialement et temporellement continues et homogènes, de douze villes représentatives du climat belge selon les trajectoires socio-économiques partagées SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5 [68].

Les modèles du système Terre, notamment utilisés par le GIEC pour analyser l'évolution des conditions climatiques à l'échelle mondiale, fournissent des informations dont la résolution spatiale est relativement faible [69]. L'utilisation du MAR permet de générer les sorties horaires pour un domaine d'intégration – constitué de 10 800 (90 x 120) mailles carrées horizontales de cinq kilomètres de côté – centré sur la Belgique [68]. Les données météorologiques historiques sont obtenues en alimentant les bornes du MAR toutes les six heures avec la cinquième génération du modèle de réanalyse du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ERA5, pour ECMWF Reanalysis v5), présentant un maillage carré horizontal d'environ 31 kilomètres [68]. De même, les données projetées sont construites en forçant les limites latérales du MAR toutes les six heures avec trois ESM (respectivement BCC-CSM2-MR, MIROC6 et MPI-ESM1.2) qui représentent l'évolution de la variabilité moyenne et interannuelle des paramètres climatiques à long terme [68].

Ces trois modèles, issus de la trentaine que comporte la sixième mise à jour de la base de données du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP6, pour Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), ont été sélectionnés car ils présentent tout à tour un réchauffement inférieur (MPI-ESM1.2), proche (BCC-CSM2-MR) et supérieur (MIROC6) à la moyenne de l'ensemble des modèles de la base de données CMIP6 avec SSP5-8.5 pour scénario de référence et 2100 pour horizon temporel ; ce qui permet d'évaluer le niveau d'incertitude des ESM sans tous les réduire [68]. La stabilité de la circulation générale des ESM n'étant pas affecté par le niveau d'émissions de GES, l'évolution des température est fonction directe de ces émissions ; ce qui réduit aussi le temps de calcul puisque seul le scénario SSP5-8.5 doit être simulé, les autres scénarios étant contenus dans ce dernier de manière différée [68]. Ainsi, la température moyenne annuelle et la variabilité interannuelle de la période 2066-2085 pour le scénario SSP5-8.5 correspondent à la période 2081-2100 pour le scénario SSP3-7.0.

La compatibilité des projections climatiques avec la trajectoire des données historiques est vérifiée en comparant les moyenne et écart-type de température et de rayonnement solaire annuels et estivaux de MAR-ERA5 avec ceux des trois ESM à l'échelle du territoire belge et sur la période de chevauchement (1980-2014) [68]. Il en ressort qu'à l'exception de MAR-MIROC6, qui surestime la température et le rayonnement solaire de manière significative en été, tous les modèles sont relativement proches du climat moyen simulé par MAR-ERA5 [68]. Ensuite, une année météorologique typique (TMY, pour Typical Meteorological Year), soit une année construite sur une base horaire à partir des données de chaque mois représentatif de sa distribution sur une période de vingt ans, est reconstituée au format « .csv » pour chaque ville et scénario [68]. De cette manière, les données de la période 2021-2040 sont utilisées pour construire l'année météorologique typique 2030 ; les données de la période 2041-2060 le sont pour l'année météorologique typique 2050 ; et ainsi de suite.

A ce stade, les données ne sont pas encore exploitables dans Simulation Studio et nécessitent d'être formatées en fichier « .txt » afin de pouvoir être lues par le logiciel. Cette étape a été effectuée par Basile Colin lors de la réalisation de son mémoire portant sur l'évolution de la demande énergétique d'un bâtiment résidentiel wallon exposé au changement climatique, l'impact de ce dernier sur le confort thermique des habitants et l'évaluation de la résilience des différentes solutions proposées [70]. Les données utilisées correspondent aux données historiques et futures, produites par les modèles MAR-ERA5 et MAR-MPI, relatives à la ville d'Arlon pour les trajectoires socio-économiques partagées SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5 – trajectoires correspondant respectivement à un scénario d'émissions intermédiaire, élevé et très élevé. Le Tableau 11 reprend toutes les variables météorologiques contenues dans les fichiers « .txt ». Cependant, les seules variables réellement utiles pour mener les simulations seront la température sèche, l'humidité relative et le rayonnement global.

*Tableau 11 : variables météorologiques horaires des fichiers. Reproduit d'après [68].*

<b>Variable</b>	<b>Mesure</b>	<b>Unité(s)</b>
Température sèche	2 mètres au-dessus du sol	°C
Humidité relative	2 mètres au-dessus du sol	%
Rayonnement global	Sol (surface horizontale)	W/m <sup>2</sup>
Rayonnement diffus	Sol (surface horizontale)	W/m <sup>2</sup>
Rayonnement direct	Sol (surface horizontale)	W/m <sup>2</sup>
Vitesse du vent	10 mètres au-dessus du sol	m/s
Direction du vent	10 mètres au-dessus du sol	degré nord (azimut)
Température du point de rosée	2 mètres au-dessus du sol	°C
Pression atmosphérique	Sol	Pa
Nébulosité	Ensemble de la troposphère	dixième
Température du ciel	Ensemble de la troposphère	K
Humidité spécifique	2 mètres au-dessus du sol	kg/kg
Précipitations	Sol	mm

## 5.5. L'environnement de simulation

L'environnement de simulation [voir Figure 13] est implanté dans Simulation Studio, un outil de simulation dynamique permettant de modéliser des systèmes complexes. L'interface graphique est constituée de composants paramétrables (ou « Types ») reliés par des connecteurs qui fournissent les entrées et les sorties. Le Type56 correspond au modèle du bâtiment, importé au format « .idf » avec un azimuth de 225°. Les fichiers contenant les données météorologiques sont lus par le Type9e qui transmet directement la température sèche et le rayonnement global au Type56. Le Type16c interpole les données de rayonnement afin de renseigner l'angle zénithal du soleil au Type56, déterminant ainsi l'irradiation des surfaces à chaque pas de temps. La température fictive du ciel et la température du sol pour une profondeur déterminée sont respectivement fournies par le Type69b et le Type77. Les solveurs d'équation « Wizard Settings » et « Radiation Unit Converter » impriment la rotation au bâtiment, transmettent les températures aux limites du modèle et contrôlent le déploiement des protections solaires ainsi que la mise en œuvre de la ventilation nocturne. Un troisième solveur d'équation est utilisé pour convertir les unités, mais également pour quantifier les besoins totaux en énergie et la surchauffe qui sont ensuite intégrés par le Type24. Pour finir, les résultats sont transmis au Type25c afin de générer un fichier au format « .txt » qui puisse être importé puis traité dans Excel.

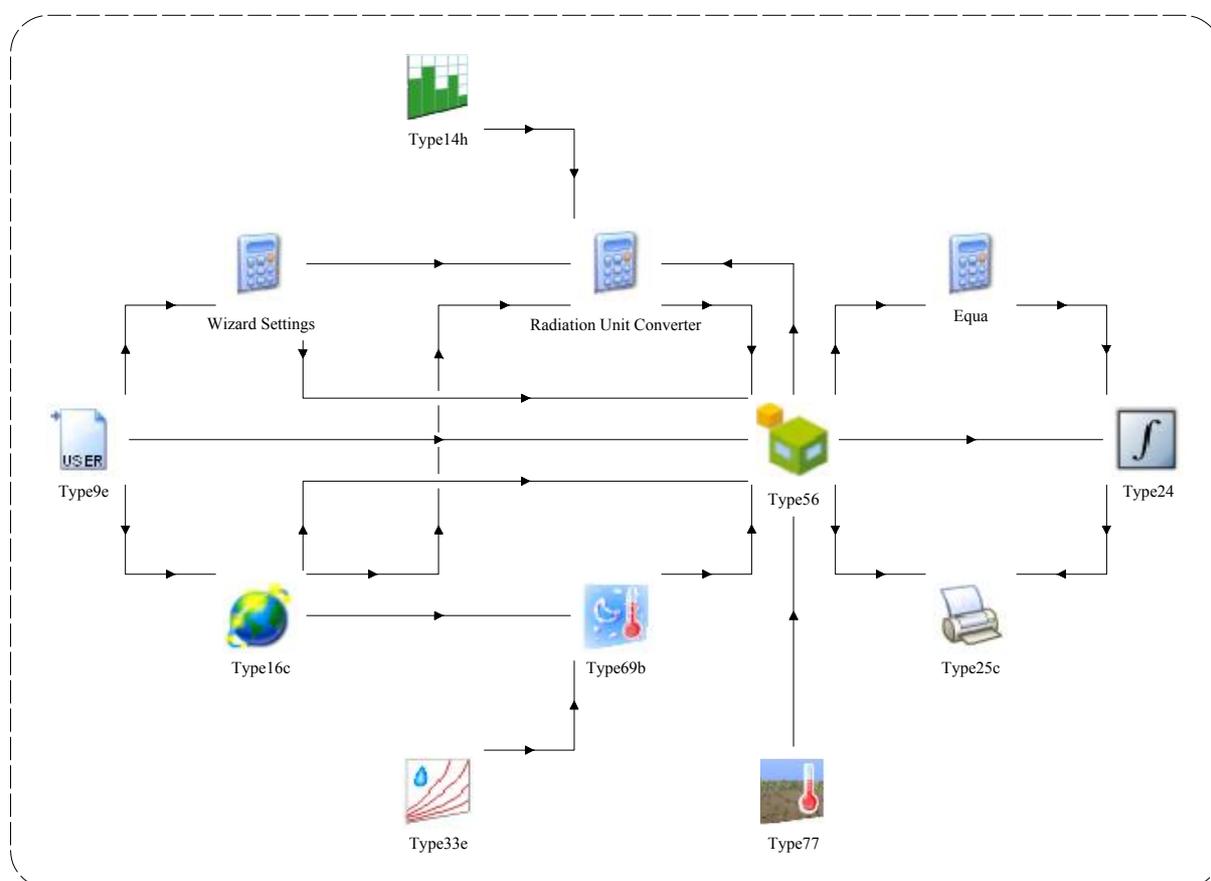


Figure 13 : environnement de simulation.

## VI. Résultats

En premier lieu, il convient de préciser que les résultats relatifs au modèle pourvu de panneaux photovoltaïques ne seront pas présentés en raison de leur caractère aberrant. De fait, il s'avère que la présence des panneaux engendre une légère diminution des besoins en chauffage et ce, malgré l'ombrage produit sur les toitures et la baisse des gains solaires qui aurait dû s'ensuivre. Développé par Marion D. E. Hiller et intégré nativement dans TRNSYS depuis la dix-septième version [71], TRNSHD est initialement conçu pour effectuer les calculs liés à l'obstruction du rayonnement due aux surfaces extérieures et à sa distribution interne pour une configuration géométrique donnée [72]. Finalement, il semblerait que TRNSHD néglige la réduction de l'irradiation solaire pour les surfaces opaques [73], ce qui n'explique tout de même pas la diminution des besoins en chauffage. Pour pallier cela, il aurait été envisageable de modéliser des zones, contiguës aux toitures, qui soient fortement ventilées [73].

Afin de simplifier le référencement des simulations, chacune d'elles s'est vu attribuer un identifiant permettant d'en assimiler rapidement les paramètres [voir Figure 14]. Par ailleurs, elles ont toutes été réalisées deux fois : une première fois sans utilisation du refroidissement actif et une seconde fois avec celui-ci. La liste complète des simulations et des paramètres utilisés reste consultable en annexe [voir Annexe I]. Après avoir présenté les perspectives climatiques, les résultats seront approfondis du point de vue thermique puis énergétique pour ensuite dresser un bilan global du potentiel dont témoignent les surfaces réfléchissantes par rapport aux solutions de refroidissement actif et passif. Les analyses reposeront sur les données horaires disponibles pour : la température superficielle extérieure et intérieure de chaque pan de toiture ; la température opérative des zones thermiques ; les heures de surchauffe ; les degrés-heures de surchauffe ; ainsi que les besoins en chaud et en froid.

	S	# <sub>1</sub>	x	_	# <sub>2</sub>	# <sub>3</sub>	# <sub>4</sub>	*
<b>S</b> Série	S = indicatif (invariable)				<b>#<sub>2</sub></b> Niveau d'isolation	0 = configuration initiale 1 = configuration Q-ZEN		
<b>#<sub>1</sub></b> Période de référence	1 = TMY 2010 (2001-2020) 3 = TMY 2030 (2021-2040) 5 = TMY 2050 (2041-2060) 7 = TMY 2070 (2061-2080) 9 = TMY 2090 (2081-2100)				<b>#<sub>3</sub></b> Réflectivité solaire	1 = réflectivité de 0,10 3 = réflectivité de 0,30 5 = réflectivité de 0,50 7 = réflectivité de 0,70 9 = réflectivité de 0,90		
<b>x</b> Scénario	a = scénario SSP2-4.5 b = scénario SSP3-7.0 c = scénario SSP5-8.5				<b>#<sub>4</sub></b> Mesures passives	0 = sans mesures passives 1 = avec mesures passives		
<b>_</b> Tiret bas	_ = séparateur (invariable)				<b>*</b> Astérisque	* = refroidissement actif		
<b>&gt;</b> Exemple : S3b_071	Modèle dans la configuration initiale avec une réflectivité solaire de 0,70 et mesures passives, sans refroidissement actif, pour la période 2021-2040 et le scénario SSP3-7.0							

Figure 14 : identification des simulations.

## 6.1. Les perspectives climatiques

D'après les données issues du modèle MAR-ERA5, la température moyenne annuelle à Arlon s'élèverait à 9,49°C pour la période 2001-2020. En l'absence de données historiques disponibles pour celle-ci, il est difficile d'évaluer l'augmentation de température par rapport à la période préindustrielle. Toutefois, cette valeur de 9,49°C et la trajectoire des différents scénarios présentés sont à mettre en perspective avec une augmentation de la température moyenne annuelle en Belgique qui serait déjà comprise entre 1,8 et 1,9°C pour la période 1990-2019 par rapport à la période 1880-1909 [10]. La Figure 15 représente l'évolution des températures moyennes annuelles des scénarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5 et leur tendance jusqu'en 2100 par rapport à la période 2001-2020. Bien que tous les scénarios témoignent d'un réchauffement, l'ampleur de celui-ci varie fortement avec une hausse située entre 0,54 et 0,98°C à l'horizon 2050 et de 0,98°C en 2100 pour le scénario le moins défavorable (SSP2-4.5) à 3,88°C dans le cas du scénario le plus pessimiste (SSP5-8.5).

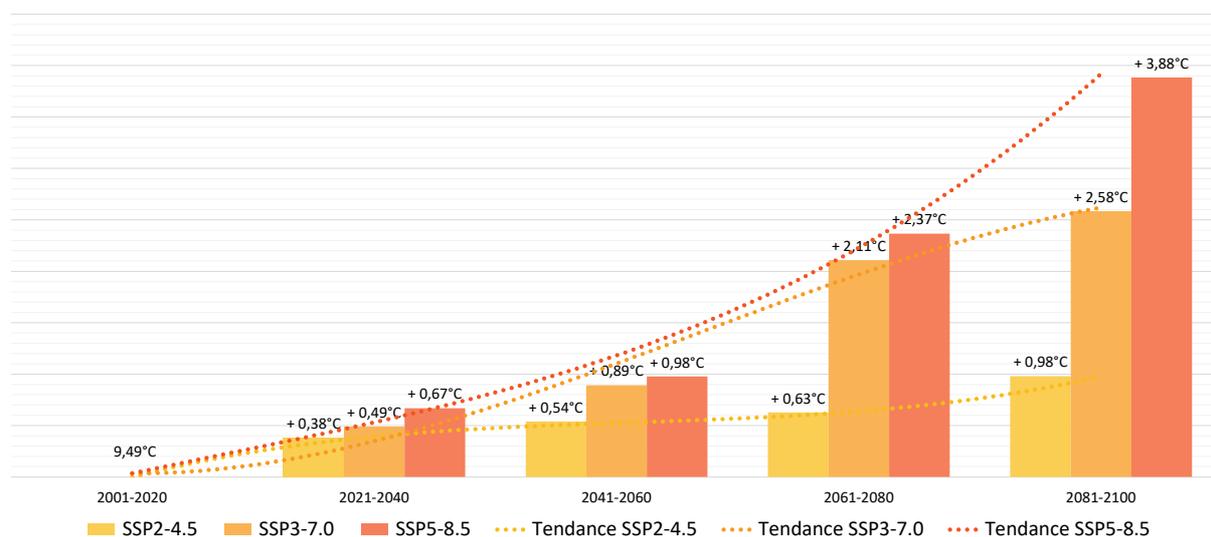


Figure 15 : évolution des températures moyennes annuelles par rapport à la période 2001-2020.

En outre, les trois scénarios affichent une progression des températures non linéaire caractérisée par un accroissement notable entre la période de référence et la période 2021-2040 suivi d'un ralentissement avec une hausse maximum de 0,40°C (SSP3-7.0) pour la période 2041-2060 par rapport à la période précédente. A l'inverse, l'intervalle 2050-2070 semble constituer un point de bascule pour les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5 marqués par une augmentation des températures atteignant 1,22°C pour le premier et jusqu'à 1,39°C pour le second, dont la courbe de tendance paraît emprunter une trajectoire exponentielle. Avec une hausse de 1,51°C vers la fin du siècle, le scénario SSP5-8.5 connaît la plus forte accélération, là où la courbe de tendance du scénario SSP3-7.0 subit une inflexion et le scénario SSP2-4.5 un léger regain de croissance. Ainsi, le rythme auquel évolue la température moyenne annuelle diffère selon la période, mais également selon le mois de l'année [voir Figure 16].

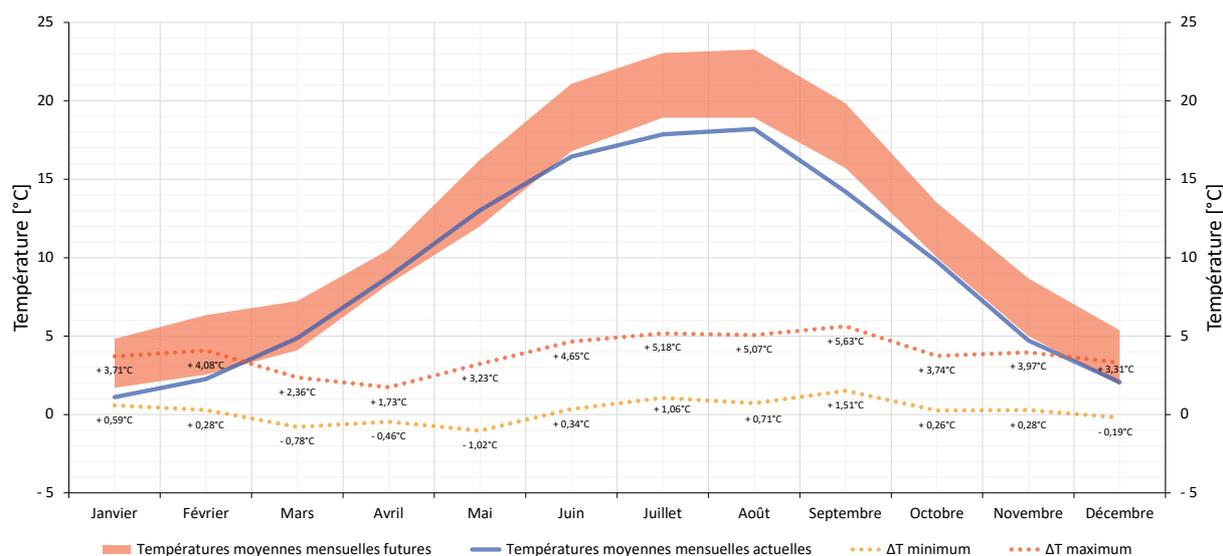


Figure 16 : évolution des températures moyennes mensuelles par rapport à la période de référence.

Le changement climatique étant évalué sur de longues périodes, il est possible que la température moyenne d'un mois futur soit plus basse que la température moyenne mensuelle actuelle, comme c'est le cas pour la plupart des séries entre mars et mai. De même, il arrive que les scénarios se croisent tel le mois de juillet de la série 3a qui est en moyenne plus chaud de 0,31 et 0,20°C par rapport aux séries 3b et 3c. Globalement, l'augmentation des températures est surtout marquée en période estivale avec une élévation pouvant atteindre 5,63°C en septembre. L'observation des indices de température [voir Tableau 12] permet de constater une forte augmentation des jours de printemps et d'été conjuguée à une multiplication des jours de chaleur. Cette tendance est très probablement sous-estimée puisque l'utilisation la construction d'années météorologiques typiques a tendance à occulter les événements météorologiques extrêmes que sont les vagues de chaleur. En parallèle, il semblerait que les hivers deviennent plus doux avec une baisse progressive des jours d'hiver et de gel.

Tableau 12 : indices de température.

Indice	S1	S3a	S3b	S3c	S5a	S5b	S5c	S7a	S7b	S7c	S9a	S9b	S9c
Jours de printemps <sup>1</sup>	81	94	90	89	94	87	91	87	126	122	89	123	140
Jours d'été <sup>2</sup>	24	24	31	38	28	38	38	36	55	55	39	61	83
Jours de chaleur <sup>3</sup>	1	7	7	6	5	13	11	8	16	13	11	22	32
Jours d'hiver <sup>4</sup>	17	10	15	12	9	12	9	16	4	5	11	4	0
Jour de gel <sup>5</sup>	70	59	60	56	53	54	55	62	41	39	59	33	22
Jour de gel sévère <sup>6</sup>	2	0	1	4	4	2	6	0	0	0	7	0	0

<sup>1</sup> Nombre de jours où la température maximale égale ou dépasse 20°C.

<sup>2</sup> Nombre de jours où la température maximale égale ou dépasse 25°C.

<sup>3</sup> Nombre de jours où la température maximale égale ou dépasse 30°C.

<sup>4</sup> Nombre de jours où la température maximale est inférieure à 0°C.

<sup>5</sup> Nombre de jours où la température minimale est inférieure à 0°C.

<sup>6</sup> Nombre de jours où la température minimale est inférieure à -10°C.

L'observation de la répartition horaire des températures sur une année rend l'accroissement des températures chaudes au détriment des températures froides d'autant plus visible [voir Figure 17]. La fréquence des températures supérieures à 25°C passe ainsi de 160 heures par an pour la période de référence à une fréquence située entre 243 et 342 heures par an d'ici 2050 et de 350 à 871 heures par an en 2100, selon le scénario. Initialement de 968, le nombre d'heures où la température est inférieure à 0°C serait de 615 à 652 heures par an en 2050, voire de 179 à 652 heures pour la période 2081-2100.

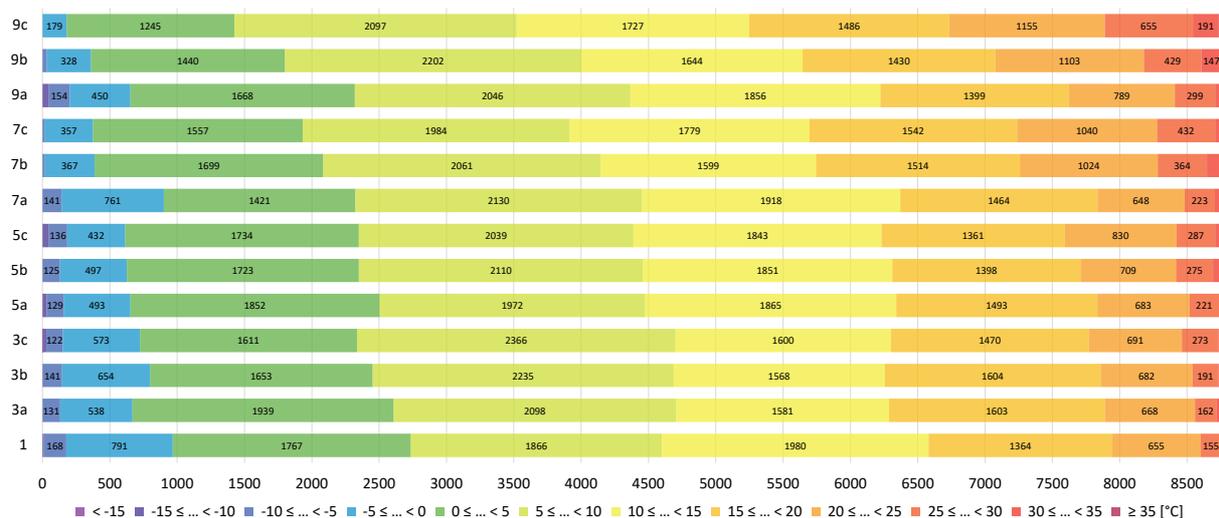


Figure 17 : répartition horaire des températures.

En tout état de cause, l'évolution des températures devrait engendrer une diminution des besoins en chauffage assortie d'une augmentation des besoins en refroidissement. Concernant l'évolution des moyennes annuelles de rayonnement solaire global, il n'y a pas de réelle tendance identifiable si ce n'est qu'elle semble fluctuer de manière vaguement périodique [voir Figure 18]. L'absence de corrélation entre le rayonnement global et la variation des températures ne fait que mettre en évidence le rôle des émissions d'origine anthropique dans le réchauffement global du système Terre.

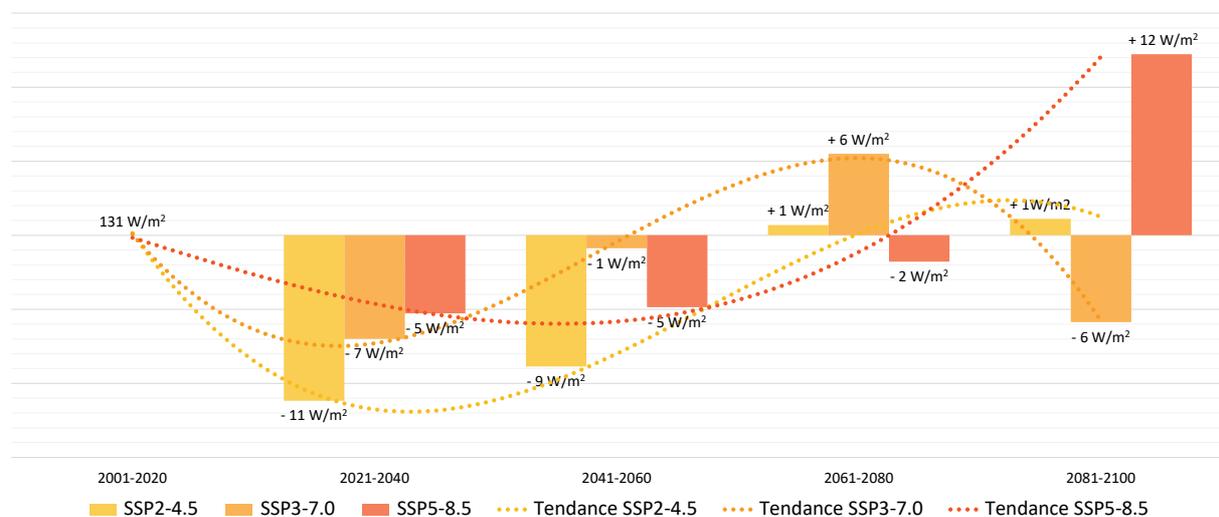


Figure 18 : évolution du rayonnement global moyen annuel par rapport à la période 2001-2020.

## 6.2. Les effets thermiques

### 6.2.1. Réflectivité solaire

La Figure 19 représente l'évolution des températures superficielles extérieures des trois surfaces de toiture du modèle non isolé pour la réflectivité solaire d'une toiture noire (010), rouge (030) et réfléchissante (090) lors des journées dont la température moyenne est la plus froide (10/01 de la série 5a) et la plus chaude (07/07 de la série 9c), tous scénarios confondus. En l'absence de rayonnement solaire, la réflectivité solaire n'a pratiquement aucun effet sur les températures de surface extérieures. En journée, une réflectivité solaire élevée permet d'écrêter les pics de températures de surface dont l'allure générale se rapproche alors de la température extérieure. Plus le rayonnement solaire est important plus l'effet est marqué : lors de la journée la plus froide, la différence maximale est de 12°C pour le versant sud-ouest de la toiture principale entre les valeurs de réflectivité solaire les plus éloignées et près de 28°C pour la toiture de l'extension lors de la journée la plus chaude. Naturellement, les plus importants différentiels de température sont systématiquement observés lorsque le rayonnement solaire incident approche l'angle optimal pour une surface donnée.

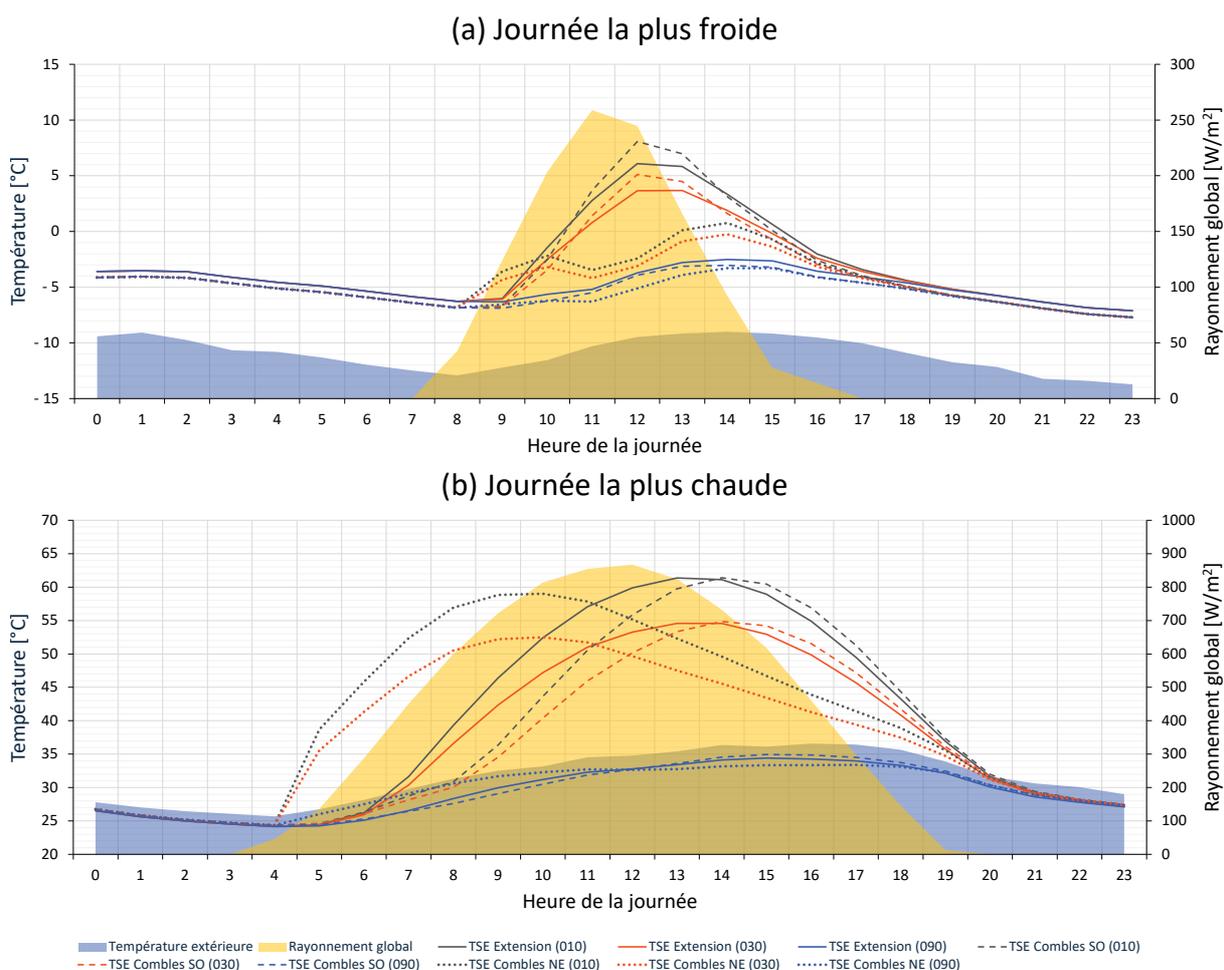
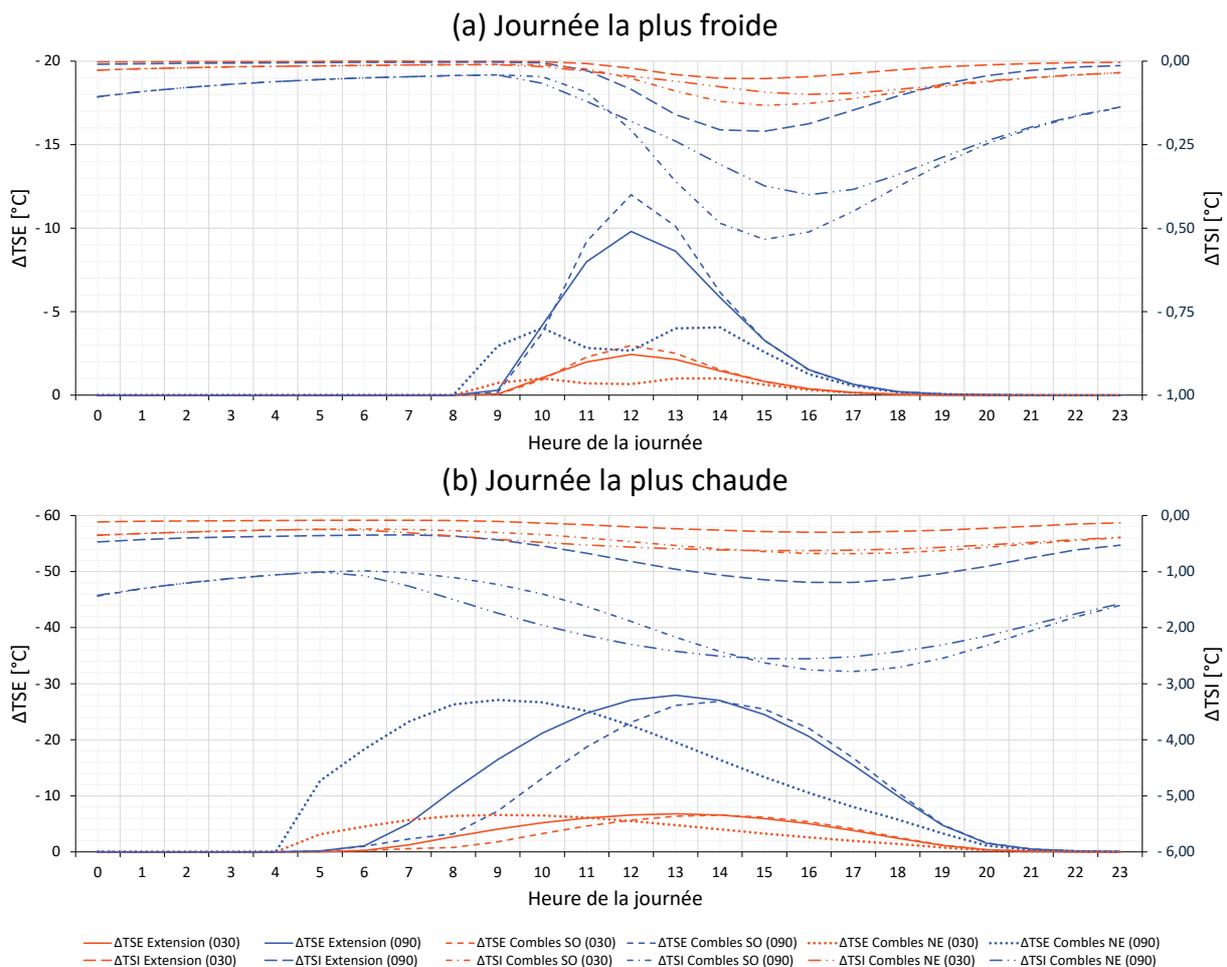


Figure 19 : profil thermique des surfaces extérieures de toiture du modèle non isolé avec plusieurs valeurs de réflectivité solaire pour (a) la journée la plus froide et (b) la journée la plus chaude.

Pour les deux mêmes journées, la Figure 20 illustre les différentiels de températures superficielles extérieures et intérieures des surfaces de toiture rouges (030) et réfléchissantes (090) du modèle non isolé par rapport à la toiture de référence (010). Afin d'améliorer la lisibilité des graphiques en évitant le chevauchement des courbes, les valeurs de l'axe représentant les différentiels de température de surface extérieure (à gauche) sont affichées en ordre inverse par rapport à celles de l'axe représentant les différentiels de température de surface intérieure (à droite). Au-delà d'un déphasage d'environ trois heures entre l'extérieur et l'intérieur en raison de l'isolation de la toiture, il apparaît que les ordres de grandeur ne sont pas du tout semblables avec un différentiel maximum de température superficielle intérieure de 0,53°C pendant la journée la plus froide et de 2,78°C concernant la journée la plus chaude ; à chaque fois pour le versant sud-ouest de la toiture du volume principal qui est la surface de toiture la plus exposée. Pour les températures de surface intérieures, les effets résiduels de la journée précédente sont encore visibles plus de douze heures après les pics de température avec une baisse de la température alors comprise entre 0,01 et 0,11°C pour la journée la plus froide et située entre 0,47 et 1,43°C lors de la journée la plus chaude et pour la réflectivité solaire la plus élevée.



**Figure 20 : déviation des températures superficielles extérieures et intérieures du modèle non isolé avec plusieurs valeurs de réflectivité solaire par rapport à la réflectivité solaire de référence pour (a) la journée la plus froide et (b) la journée la plus chaude.**

La Figure 21 compare cette fois les différentiels de températures opératives et superficielles intérieures des surfaces des toitures rouges (030) et réfléchissantes (090) du modèle non isolé par rapport à la toiture de référence (010). Malgré leur compacité pratiquement identique, les combles connaissent une réduction de leur température opérative bien plus importante que l'extension. Pour cause, l'entièreté des parois des combles exposées au rayonnement solaire disposent d'une réflectivité solaire élevée là où la toiture de l'extension ne constitue qu'un tiers des parois exposées. De plus, la température opérative au sein de l'extension demeure largement influencée par les gains internes dus aux baies vitrées. Lors de la journée la plus froide, la température opérative des combles peut diminuer jusqu'à 0,32°C, tandis que la réduction n'excède pas 0,03°C dans toutes les autres zones pour la valeur de réflectivité solaire la plus élevée ; au cours de la journée la plus chaude, cette baisse atteint 2,15°C pour les combles et 0,54°C pour l'extension. Bien qu'elles ne soient pas directement situées sous une surface de toiture, les autres zones bénéficient également d'une atténuation notable des températures opératives avec une baisse maximale de l'ordre de 0,70°C pour les trois chambres, 0,37°C pour le salon et 0,24°C pour la salle-à-manger. Toutefois, les températures opératives moyennes journalières restent particulièrement élevées avec des valeurs qui oscillent autour de 29°C.

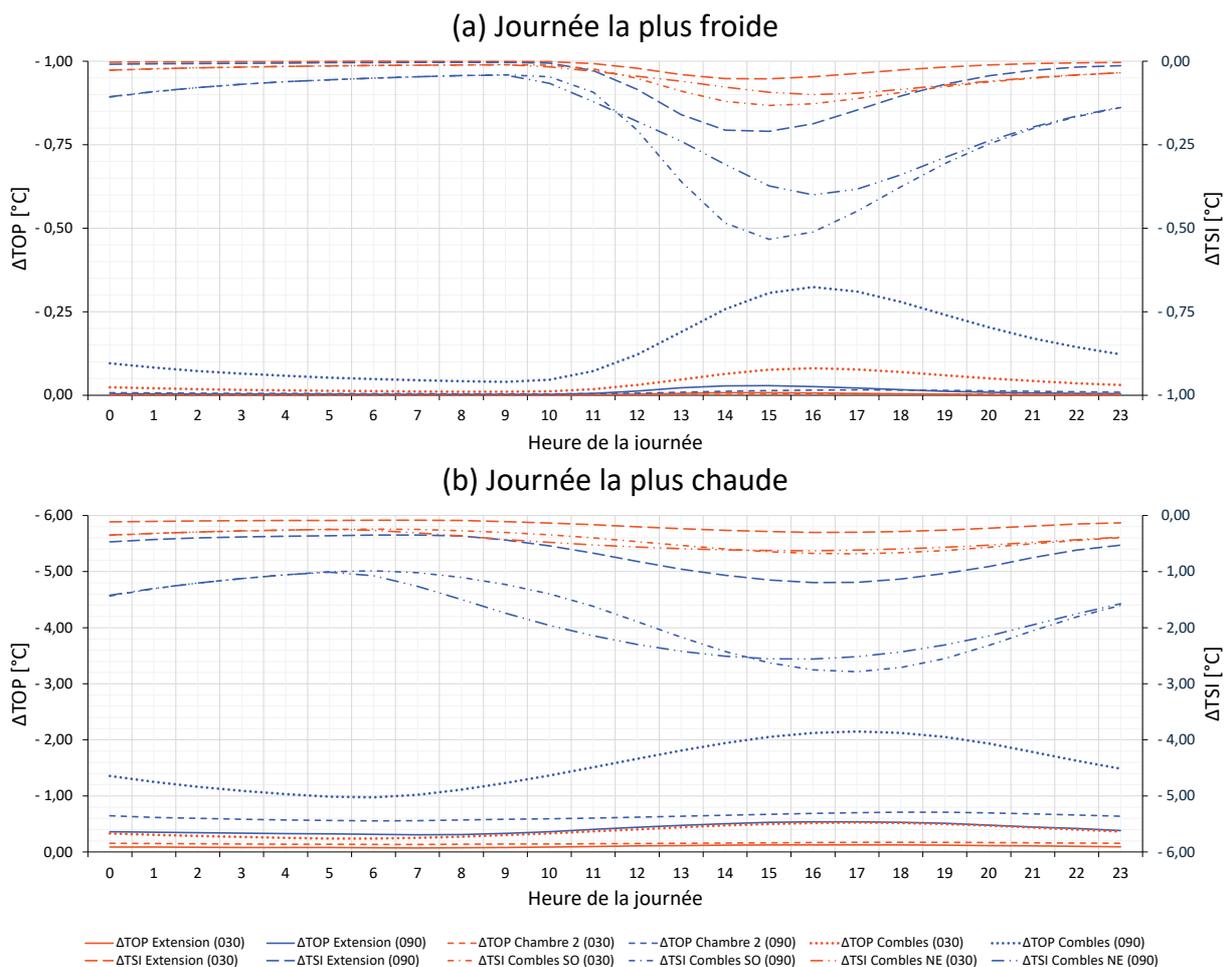


Figure 21 : déviation des températures opératives et superficielles intérieures par rapport à la réflectivité solaire de référence pour (a) la journée la plus froide et (b) la journée la plus chaude.

Plusieurs simulations additionnelles ont été réalisées dans le but d'établir plus précisément le comportement thermique des surfaces de toiture et des zones thermiques pour différentes valeurs de réflectivité solaire et observer ce qu'il advenait en utilisant des valeurs extrêmes. La Figure 22 illustre donc l'évolution de la température superficielle extérieure de la toiture de l'extension, parallèlement au rayonnement solaire global, lors de la journée la plus chaude pour toutes les valeurs de réflectivité solaire entre zéro et un avec une incrémentation de dix pourcent entre chaque valeur.

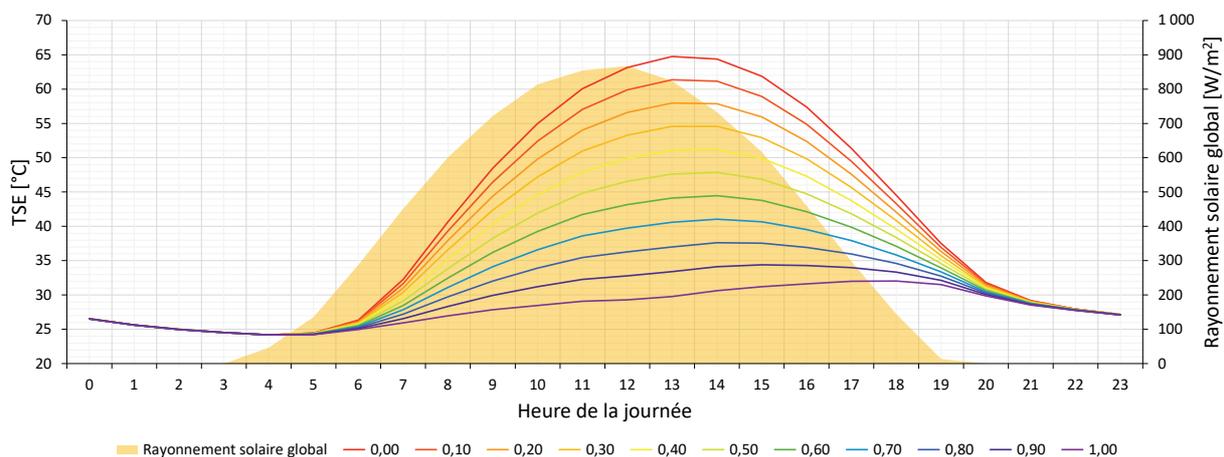


Figure 22 : évolution de la température superficielle extérieure de la toiture de l'extension du modèle initial avec différentes valeurs de réflectivité solaire lors de la journée la plus chaude.

Il semble que l'écart de température entre deux valeurs de réflectivité solaire consécutives soit constant à chaque instant. Afin de vérifier cela, la température superficielle extérieure est représentée avec l'indice de réflectivité solaire en abscisse pour toutes les heures impaires entre 5 heures et 21 heures [voir Figure 23]. Ce graphique souligne la relation linéaire entre le différentiel de température de surface extérieure de la toiture de l'extension et son niveau de réflectivité solaire ; ce qui se vérifie également pour la température superficielle intérieure et la température opérative dans chaque zone.

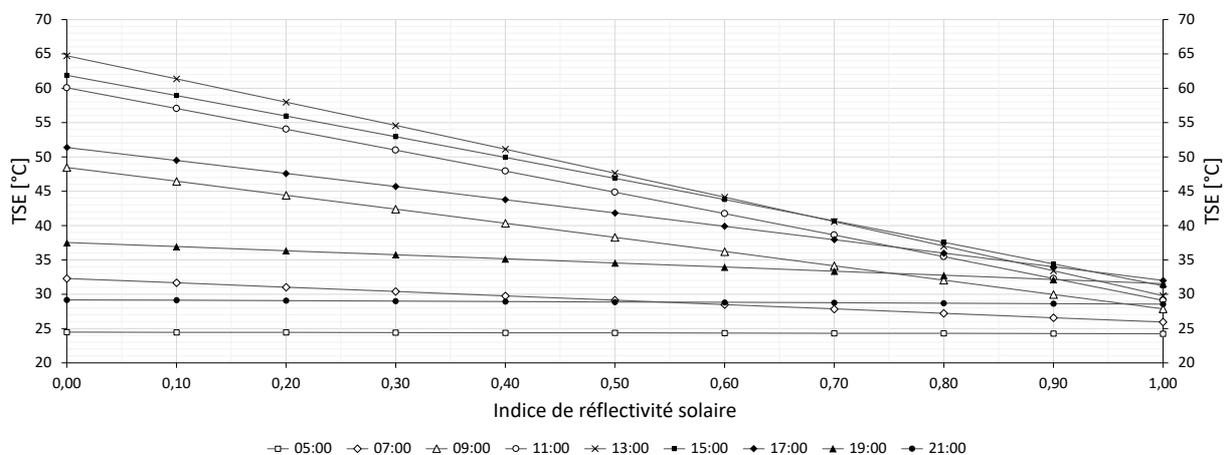
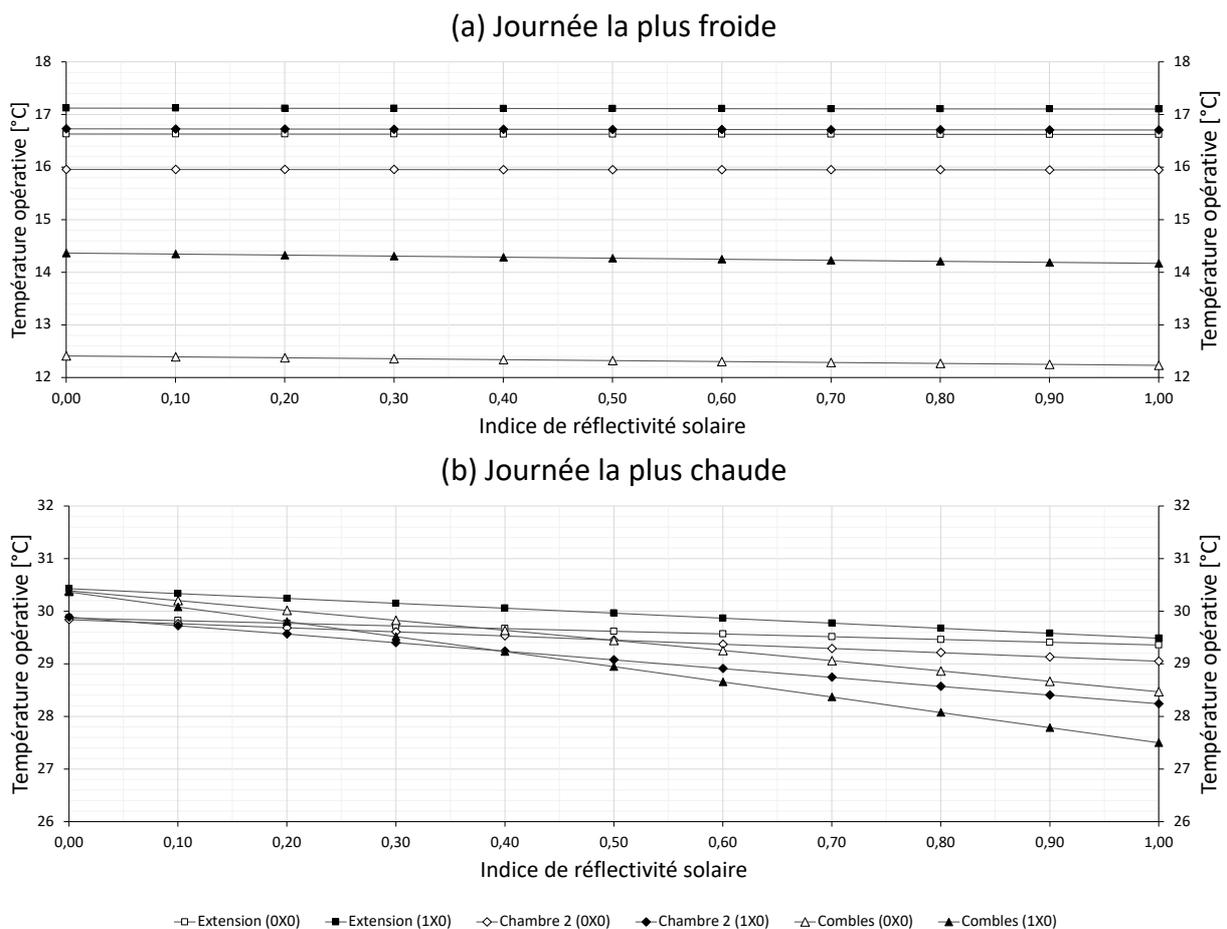


Figure 23 : évolution de la température superficielle extérieure de l'extension du modèle initial lors de la journée la plus chaude en fonction de l'indice de réflectivité solaire.

Il y a assez peu de raisons de penser que l'impact de la réflectivité solaire sur les températures opératives du modèle Q-ZEN soit plus important que celui du modèle non isolé étant donné que la composition des toitures ne varie pas. Pourtant, la Figure 24 – comparant les températures opératives moyennes journalières en fonction de la réflectivité solaire – semble indiquer le contraire. Si les différentiels sont trop ténus pour être visibles lors de la journée la plus froide, les températures opératives de toutes les zones baissent tout de même plus rapidement, à mesure que la réflectivité solaire augmente, au sein du modèle Q-ZEN que dans la configuration initiale ; ce qui s'explique probablement par la meilleure inertie thermique du modèle Q-ZEN qui, conjuguée à une moindre pénétration de la chaleur dans le bâtiment, permet de prolonger les effets résiduels de la baisse des températures. Ainsi, les températures opératives des zones *Chambre 2* et *Extension* des deux modèles, sensiblement identiques pour la réflectivité solaire de référence, deviennent rapidement inférieures dans la configuration Q-ZEN lors de la journée la plus chaude. Quant à la température opérative de l'extension, elle reste légèrement supérieure au modèle non isolé car le rythme de diminution, bien que plus élevé, ne parvient pas à rattraper la différence de température initiale entre les deux modèles. Quoiqu'il en soit, le modèle Q-ZEN restera probablement davantage exposé à la surchauffe.



**Figure 24 : évolution des températures opératives moyennes journalières en fonction de la réflectivité solaire pour le modèle initial et le modèle Q-ZEN lors de (a) la journée la plus froide et (b) la journée la plus chaude.**

## 6.2.2. Refroidissement actif

L'introduction d'un système de refroidissement actif avec une consigne de 26°C constitue une solution bien plus efficace que les surfaces réfléchissantes, indépendamment du modèle considéré [voir Figure 25]. La journée la plus chaude correspondant à un samedi, le refroidissement fonctionne en permanence dans la zone *Chambre 2*, tandis qu'il opère uniquement entre huit heures du matin et dix heures du soir au sein de la zone *Extension*. Bien qu'il permette de réduire de quatre à cinq degrés la température opérative des deux zones lors du pic de température et de maintenir une température opérative moyenne journalière de deux à trois degrés inférieures aux températures de référence selon le modèle, le système de refroidissement ne parvient pas à endiguer la surchauffe, mais réduit tout de même fortement l'intensité de cette dernière. La capacité du modèle Q-ZEN à réduire les transferts de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur lui permet globalement de préserver un environnement intérieur légèrement plus frais que le modèle initial, exception faite de la zone *Extension* dont les gains excessifs générés par les parois vitrées sont plus difficiles à résorber. Une diminution de la consigne de refroidissement permettrait d'éliminer entièrement la surchauffe, mais cela se ferait au détriment de la consommation énergétique globale qui augmenterait en proportion.

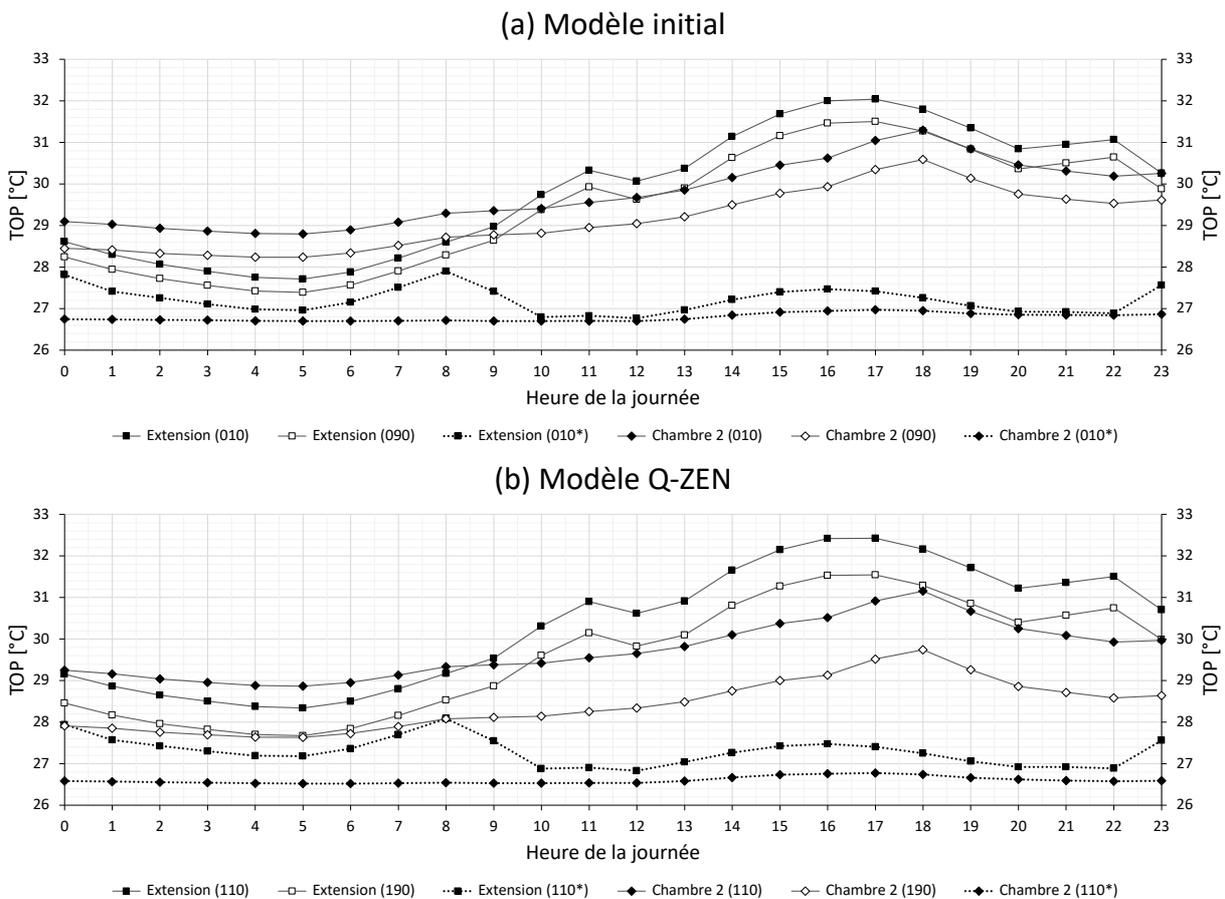


Figure 25 : évolution de la température opérative des zones *Extension* et *Chambre 2* avec et sans refroidissement actif lors de la journée la plus chaude pour (a) le modèle initial et (b) le modèle Q-ZEN.

### 6.2.3. Mesures passives

L'implémentation de mesures passives représente également un moyen efficace de réduire l'intensité de la surchauffe, comme le montre la Figure 26. Leur effet sur les températures intérieures est particulièrement marqué en début de journée où elles permettent même de contenir la surchauffe de la zone *Extension* pendant plus de trois heures pour le modèle initial et pendant respectivement sept et dix heures pour les zones *Extension* et *Chambre 2* en ce qui concerne le modèle Q-ZEN. Les températures extérieures étant particulièrement élevées, ne passant que brièvement sous le seuil des 26°C entre trois heures et quatre heures du matin, la ventilation ne permet pas un refroidissement aussi important que ce qu'elle permettrait lorsque les températures nocturnes sont plus modérées. Les protections solaires sont déployées entre huit heures du matin et cinq heures du soir mais pourraient l'être plus tôt étant donné que l'irradiation globale excède déjà 250 W/m<sup>2</sup> à six heures du matin. Pourtant, la mise en œuvre combinée de ces deux mesures de refroidissement passif témoigne d'un potentiel significativement plus important qu'une augmentation de la réflectivité solaire, mais permet aussi d'obtenir de meilleurs résultats que le refroidissement actif en matière de températures opératives moyennes journalières au sein de la plupart des zones du modèle Q-ZEN [voir Annexe III].

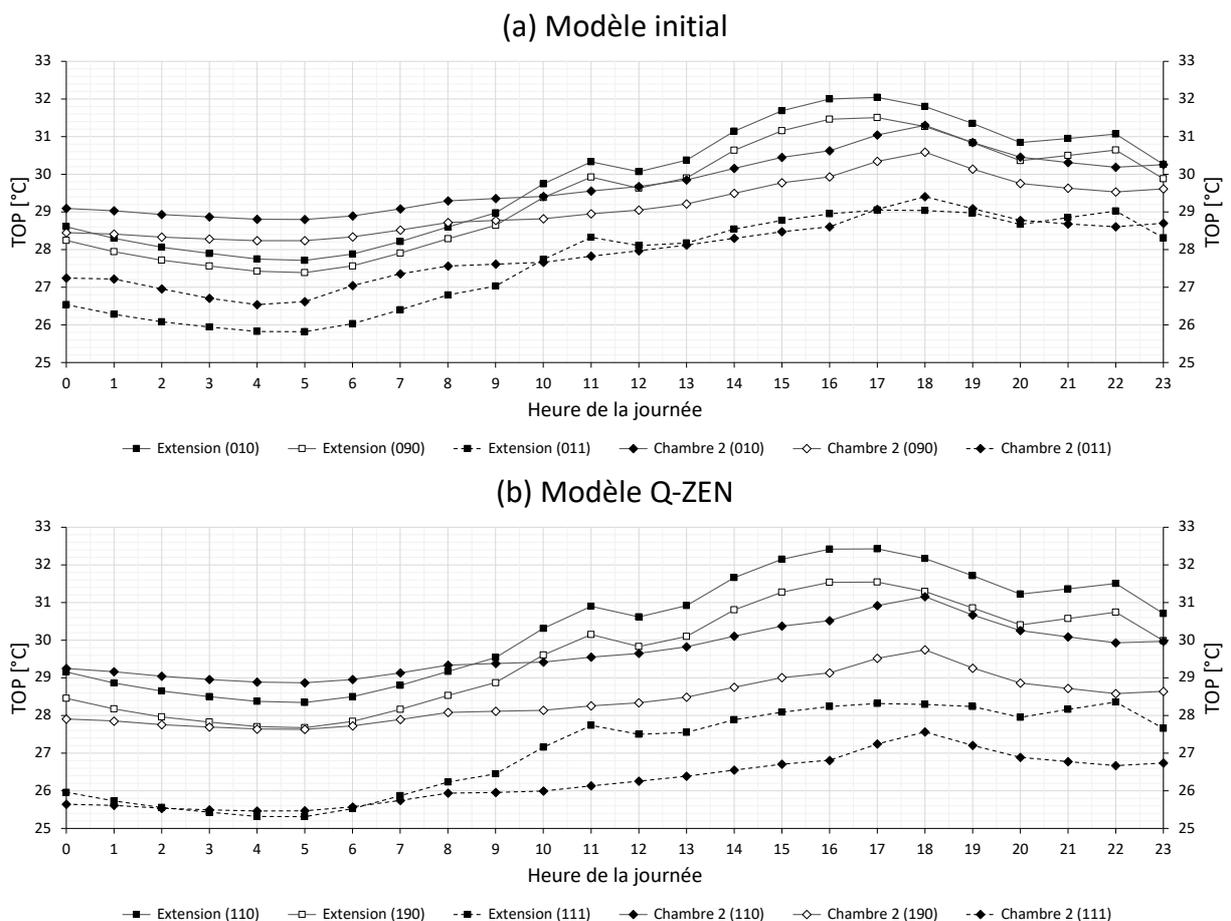


Figure 26 : évolution de la température opérative des zones *Extension* et *Chambre 2* avec et sans mesures passives lors de la journée la plus chaude pour (a) le modèle initial et (b) le modèle Q-ZEN.

## 6.2.4. Couplage de mesures

Bien évidemment, les différentes mesures de refroidissement actives et passives étudiées ne sont pas forcément incompatibles entre elles. La Figure 27 illustre le différentiel de température opérative de la zone *Extension* des deux modèles par rapport à leur température de référence respective lors de la journée la plus chaude avec une réflectivité solaire de 0,90 ; uniquement le refroidissement actif ; une réflectivité solaire de 0,90 et un refroidissement actif ; uniquement les mesures passives ; une réflectivité solaire de 0,90 avec mesures passives ; un refroidissement actif associé aux mesures passives ; et enfin, une réflectivité solaire de 0,90 conjuguée au refroidissement actif et aux mesures passives. La courbe rouge représente l'écart entre la température opérative de référence et le seuil de surchauffe, ce qui signifie que les mesures dont la courbe dépasse celle-ci permettent de limiter la surchauffe. Encore une fois, il apparaît clairement qu'une réflectivité solaire élevée n'a qu'un effet marginal sur les températures opératives. En revanche, elle semble constituer un complément intéressant aux mesures passives en ce qu'ensemble, elles permettent pratiquement d'atteindre un refroidissement équivalent au refroidissement actif lors du pic de température pour le modèle Q-ZEN.

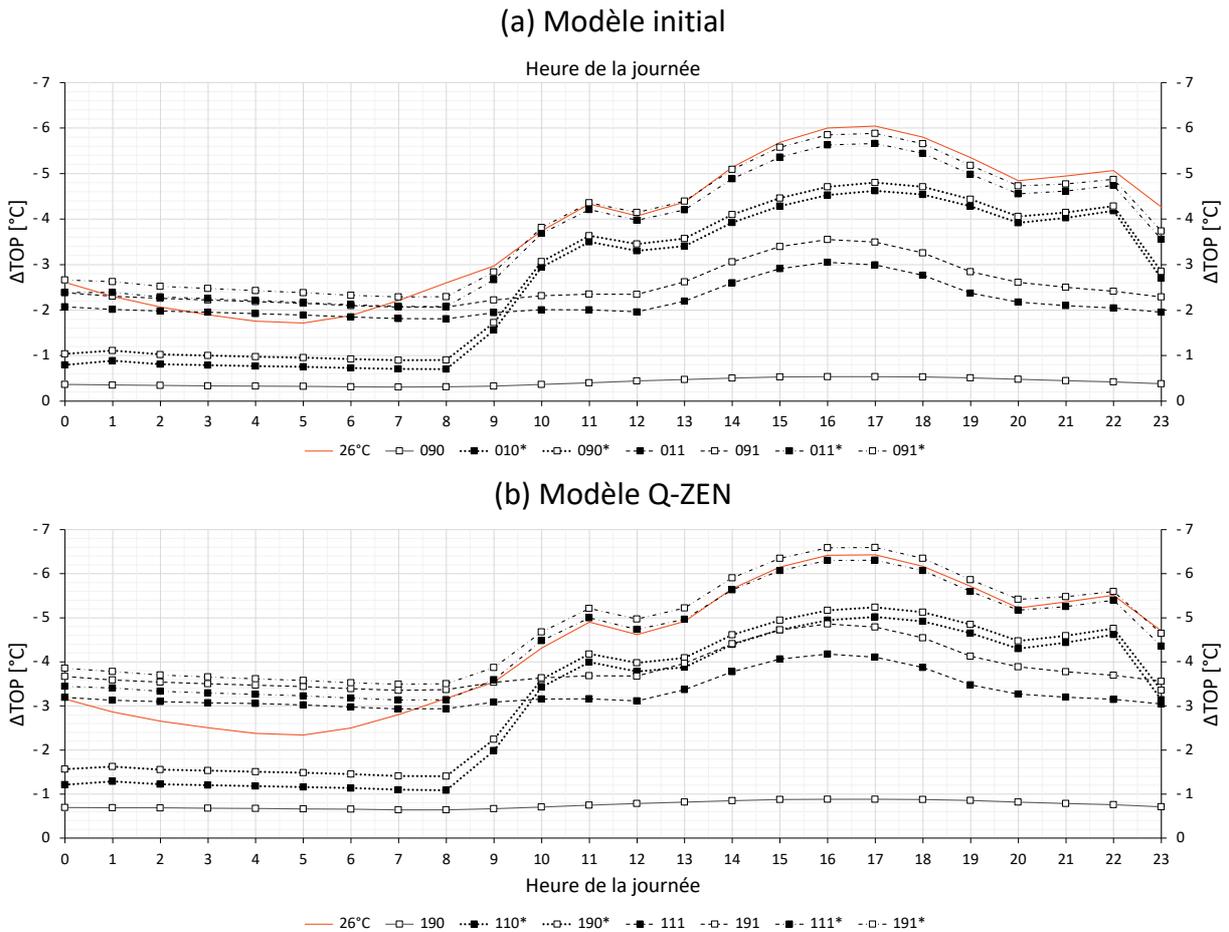
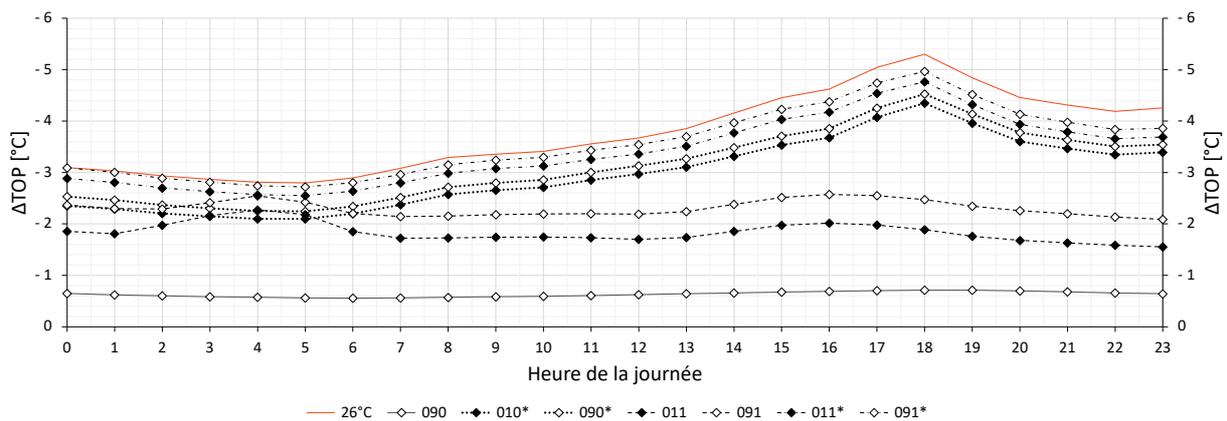


Figure 27 : déviation de la température opérative de la zone *Extension* par rapport à la température opérative de référence pour différentes mesures lors de la journée la plus chaude pour (a) le modèle initial et (b) le modèle Q-ZEN.

D'autre part, l'implémentation d'un système de refroidissement actif semble limiter fortement l'efficacité des surfaces réfléchissantes par rapport aux modèles qui n'en disposent pas. De manière attendue, le modèle le plus performant thermiquement est celui pour lequel l'ensemble des mesures sont appliquées, mais l'effet supplémentaire apporté par les surfaces réfléchissantes pourrait tout aussi bien être compensé par un ajustement à la baisse de la consigne de refroidissement qui entraînerait une consommation énergétique additionnelle proportionnelle à l'augmentation du bilan énergétique global généré par une réflectivité solaire élevée voire, plus vraisemblablement, qui permettrait de réduire cette consommation énergétique globale. Quoiqu'il en soit, le déploiement de surfaces réfléchissantes ne présente qu'assez peu d'intérêt s'il n'est pas accompagné par des comportements adaptés de la part des usagers du bâtiment. De la même façon, l'utilisation d'un système de refroidissement actif s'avère bien plus efficace lorsqu'elle est complétée par ces mêmes comportements. Les différentes remarques formulées précédemment restent entièrement valables pour la zone *Chambre 2* [voir Figure 28], mais aussi pour les autres zones thermiques, dont l'évolution des températures opératives lors de la journée la plus chaude demeure consultable en Annexe II et III.

(a) Modèle initial



(b) Modèle Q-ZEN

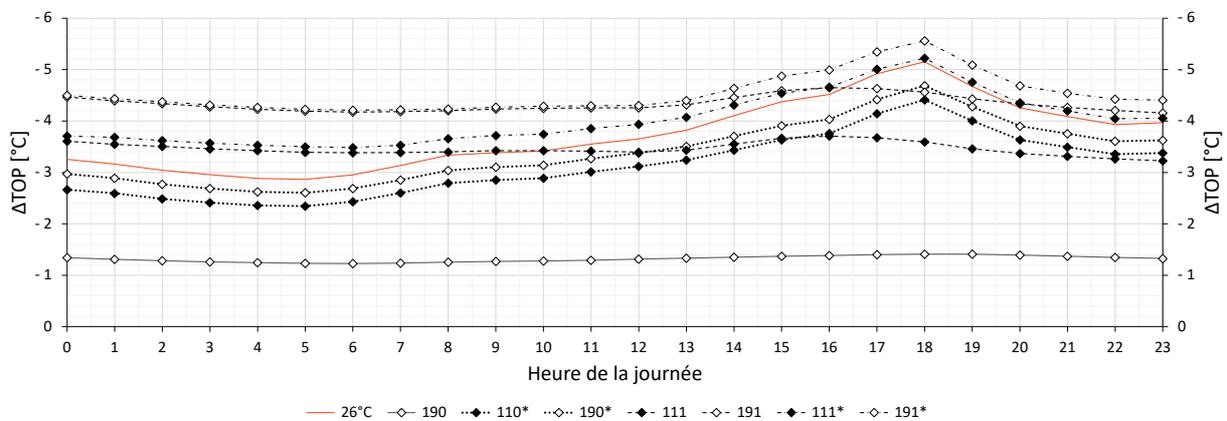


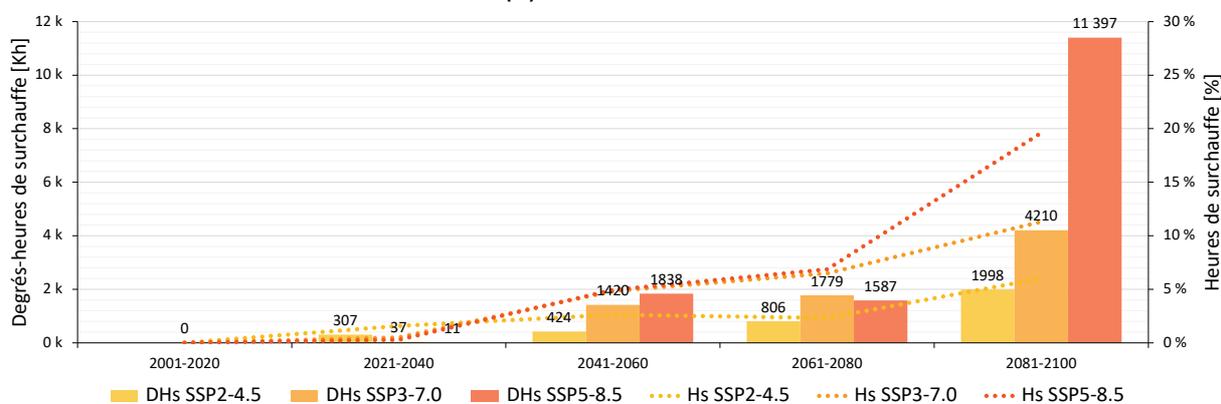
Figure 28 : déviation de la température opérative de la zone *Chambre 2* par rapport à la température opérative de référence pour différentes mesures lors de la journée la plus chaude pour (a) le modèle initial et (b) le modèle Q-ZEN.

## 6.3. L'impact sur la surchauffe

### 6.3.1. Changement climatique

L'analyse des perspectives climatiques [voir Section 6.1.] a mis en évidence un accroissement des températures dont l'amplitude et le rythme variait selon le scénario d'émissions. La trajectoire empruntée jouera donc un rôle déterminant dans l'accentuation du risque de surchauffe. Les degrés-heures de surchauffe sont un bon indicateur de risque, car ils permettent d'évaluer l'intensité de la surchauffe là où les heures de surchauffe n'en révèlent que l'étendue. La Figure 29 rapporte l'évolution annuelle des deux pour le modèle initial et le modèle Q-ZEN selon chaque scénario et avec un seuil de dépassement fixé à 26°C. Indépendamment du niveau d'isolation, le bâtiment ne subit aucune surchauffe avec les données climatiques actuelles. Celle-ci fait son apparition lors de la période 2021-2040 pour les deux modèles et dans tous les scénarios, mais elle se limite à quelques heures sur l'année. Si les périodes 2041-2060 et 2061-2080 commencent à présenter des niveaux de surchauffe non négligeables, ce n'est rien en comparaison de l'horizon 2100 pour lequel elle atteindrait des proportions démesurées avec près d'une heure sur dix-sept de surchauffe pour le modèle initial et pratiquement une heure sur onze dans le cas du modèle Q-ZEN pour le scénario le moins défavorable.

(a) Modèle initial



(b) Modèle Q-ZEN

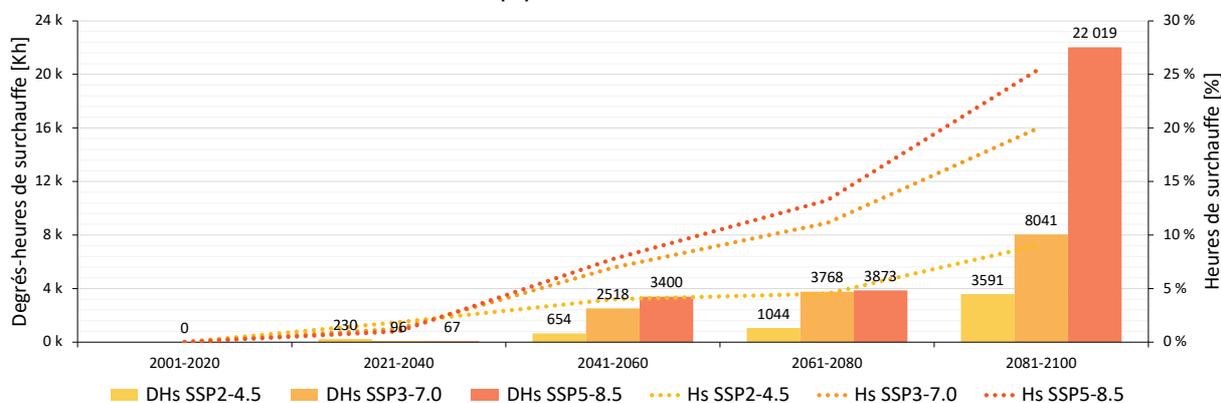
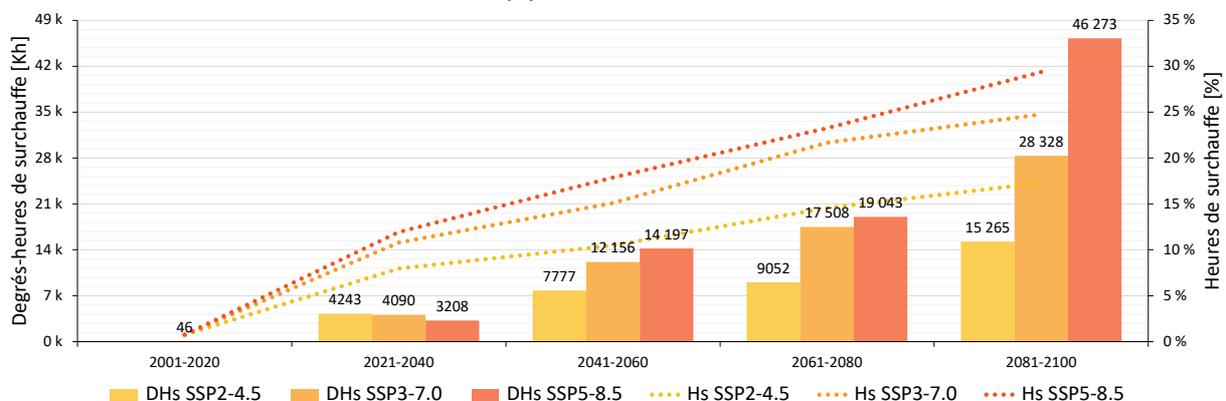


Figure 29 : évolution des heures et des degrés-heures de surchauffe annuels de chaque scénario avec un seuil de 26°C pour (a) le modèle initial et (b) le modèle Q-ZEN.

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2014, la réglementation PEB impose que les bâtiments résidentiels neufs ou assimilés respectent un critère de surchauffe fixée à 6500 degrés-heures pour une température de référence de 23°C, bien qu'il soit recommandé de rester sous le seuil de 1000 Kh à partir duquel le risque de surchauffe est déjà bien présent [74]. Au-delà de cette limite de 6500 Kh, le bâtiment présente un risque de surchauffe trop important et le projet doit alors être modifié afin d'échapper à une amende administrative. Contrairement à TRNSYS, le logiciel PEB fonctionne de manière statique ; il est donc hasardeux d'évaluer des données issues de simulations dynamiques sur base d'un critère pensé pour des calculs statiques – d'autant plus que la méthode PEB néglige un certain nombre de facteurs et se base uniquement sur les moyennes mensuelles des charges thermiques [30]. Malgré les nombreuses limites que cela comporte, il reste intéressant de considérer le risque de surchauffe d'après le seuil déterminé par la réglementation en vigueur. La Figure 30 démontre que les deux modèles respectent largement ce critère de surchauffe pour la période de référence, mais que le modèle conforme au standard Q-ZEN n'y répondrait plus dès la période 2021-2040 ; tandis que le modèle initial excèderait la limite à partir de la période 2041-2060. Par ailleurs, la proportion annuelle d'heures de surchauffe croît rapidement entre la période de référence et la période consécutive, avec près de 8 % pour le modèle initial, voire plus de 18 % pour le modèle Q-ZEN dans le scénario SSP2-4.5.

(a) Modèle initial



(b) Modèle Q-ZEN

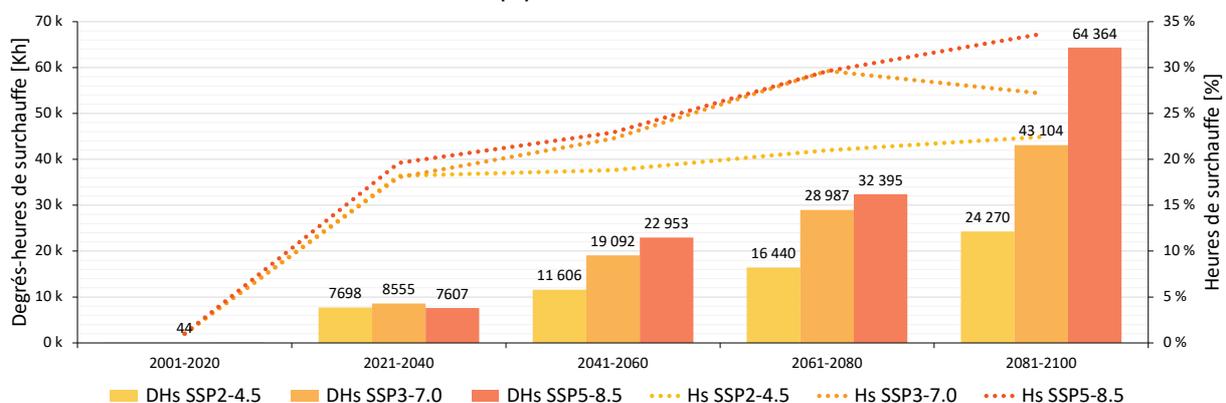
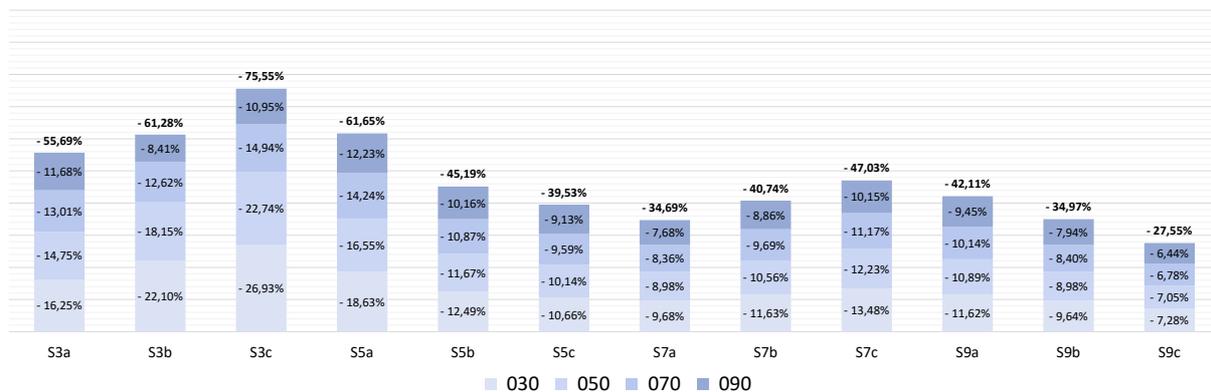


Figure 30 : évolution des heures et des degrés-heures de surchauffe annuels de chaque scénario avec un seuil de 23°C pour (a) le modèle initial et (b) le modèle Q-ZEN.

### 6.3.2. Réflectivité solaire

La partie consacrée à l'évaluation du comportement thermique du modèle selon l'indice de réflectivité solaire des toitures [voir Section 6.2.1.] a démontré que la réduction des températures intérieures au sein du bâtiment est d'autant plus importante que la réflectivité solaire est élevée, que l'enveloppe est isolée thermiquement et que le chaleur est intense. Partant de ce dernier constat, l'efficacité des toitures réfléchissantes en matière de réduction des degrés-heures de surchauffe devrait augmenter à mesure que le climat se réchauffe. Si cette supposition se vérifie pour la réduction des degrés-heures de surchauffe en valeur absolue, ce n'est pas le cas pour leur diminution relative dont la tendance est à la baisse [voir Figure 31]. Pour cause, la diminution des températures opératives induite par une réflectivité solaire élevée demeure marginal par rapport à l'intensification de la surchauffe. De fait, le changement climatique génère une hausse des heures de surchauffe de haute intensité, c'est-à-dire largement supérieures à 26°C, que les surfaces réfléchissantes parviennent de moins en moins à canaliser. En parallèle, le refroidissement supplémentaire apporté par chaque incrémentation de réflectivité solaire est de plus en plus faible, probablement car le nombre d'heures de surchauffe de basse intensité qu'il est possible d'atténuer diminue quand la réflectivité augmente.

(a) Modèle initial



(b) Modèle Q-ZEN



Figure 31 : baisse relative supplémentaire des degrés-heures de surchauffe de chaque réflectivité solaire d'après la réflectivité solaire de référence pour (a) le modèle initial et (b) le modèle Q-ZEN.

### 6.3.3. Autres mesures

La Figure 32 compare, pour chacune des séries, la baisse relative des degrés-heures de surchauffe apportée par toutes les mesures par rapport à l'absence de mesures pour le modèle initial et le modèle Q-ZEN. Conformément aux observations des sections 6.2.2 et 6.2.4, l'implémentation de mesures passives s'avère la mesure unique la plus efficace pour réduire la surchauffe. Contrairement aux surfaces réfléchissantes, l'efficacité du refroidissement actif et des mesures passives reste relativement stable dans le temps malgré l'accentuation de la surchauffe ; d'autant plus lorsqu'il s'agit du modèle Q-ZEN. En moyenne, la valeur de réflectivité solaire maximale, le refroidissement actif et les mesures passives permettent de réduire de respectivement 47, 70 et 94 % les degrés-heures de surchauffe du modèle initial et de 71, 75 et près de 100 % pour le modèle Q-ZEN. La présence simultanée du refroidissement actif et des surfaces réfléchissantes génère en moyenne une réduction supplémentaire des degrés-heures de surchauffe de 15 % pour le modèle initial et de 19 % pour le modèle Q-ZEN par rapport à la seule présence du refroidissement actif. A quelques exceptions près, le couplage des mesures passives avec le refroidissement actif, les surfaces réfléchissantes ou les deux ne procure pas une réduction de la surchauffe beaucoup plus élevée que les seules mesures passives.

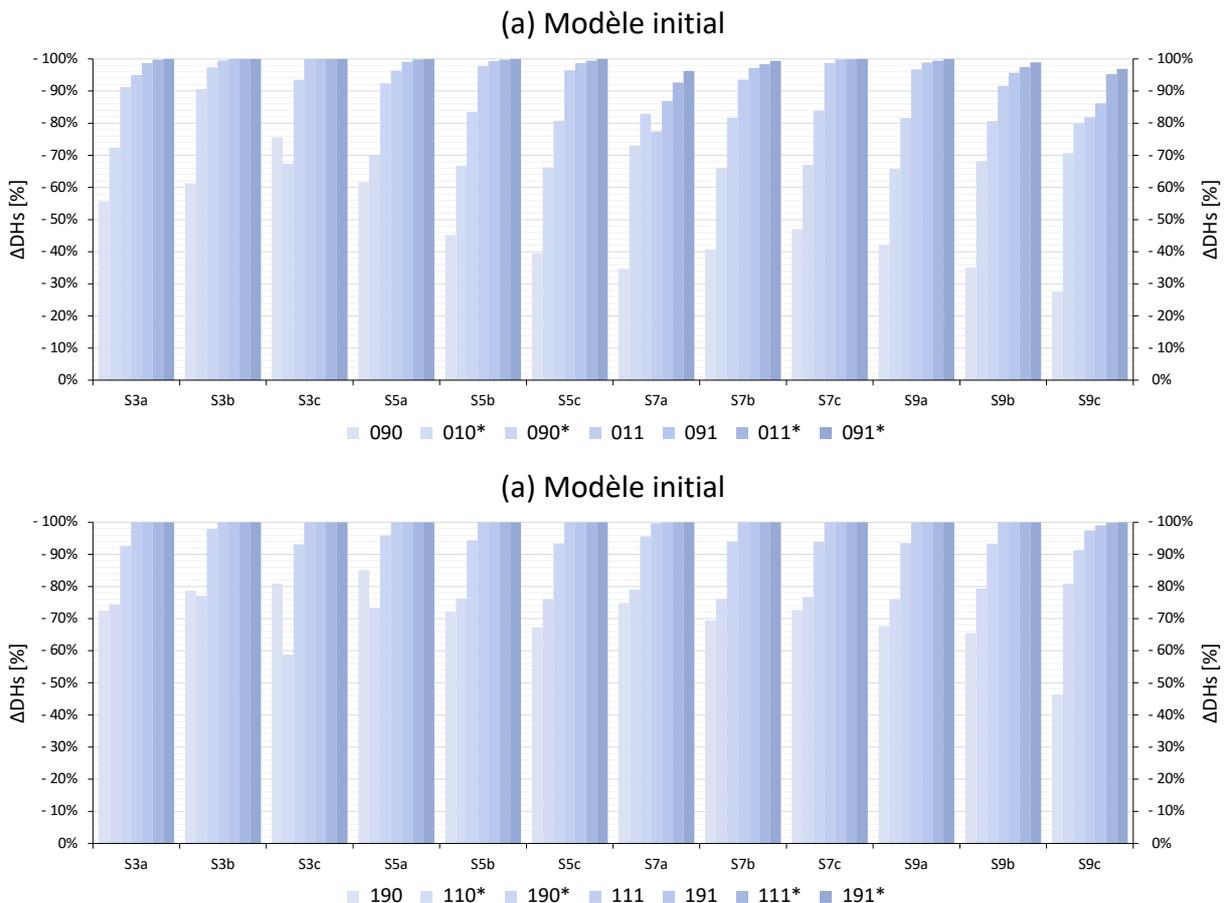
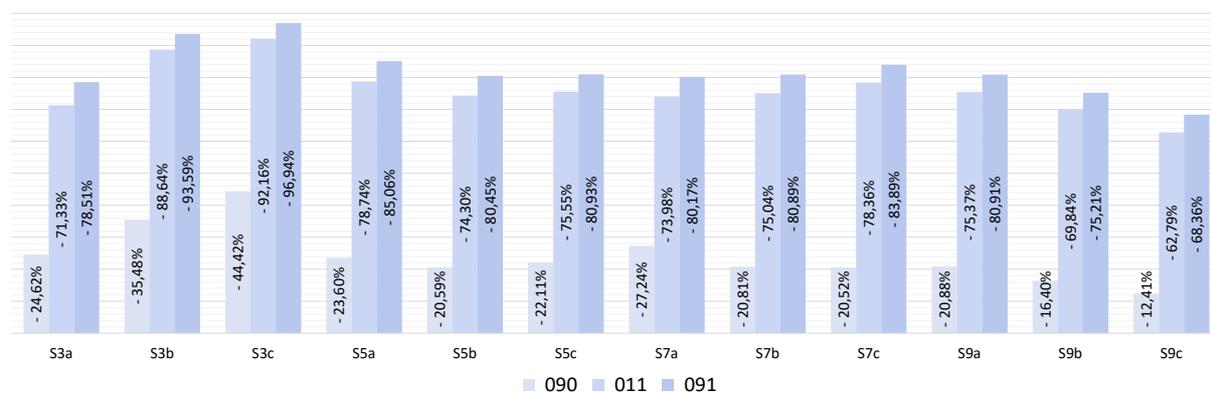


Figure 32 : baisse relative des degrés-heures de surchauffe pour chaque mesure par rapport au modèle de référence et avec un seuil de 26°C pour (a) le modèle initial et (b) le modèle Q-ZEN.

Dans l'ensemble, les mesures étudiées permettent de substantiellement réduire l'intensité et la fréquence de la surchauffe pour un seuil de dépassement fixé à 26°C, mais qu'en est-il lorsque celui-ci est réduit à 23°C comme le dispose la réglementation PEB ? En comparant la diminution relative des degrés-heures de surchauffe du modèle initial et du modèle Q-ZEN avec différentes mesures par rapport à leur configuration de référence respective, la Figure 33 apporte une réponse partielle à cette question. En effet, les modèles avec refroidissement actif n'y sont pas représentés étant donné que le système a été programmé pour fonctionner avec une température de consigne de 26°C. Il apparaît que la faculté des surfaces réfléchissantes à atténuer la surchauffe est réduite de 24 % pour le modèle initial et d'un peu plus de 43 % pour le modèle Q-ZEN. Dans le cas du modèle initial, les mesures passives sont en moyenne 17 % moins efficace pour limiter la chaleur excédentaire que lorsque le seuil était établi à 26°C, mais elles parviennent tout de même à en éliminer les trois-quarts ; proportion qui s'élève à près de 94 % en moyenne pour le modèle Q-ZEN. Concernant la limite supérieure de 6500 degrés-heures de surchauffe, les surfaces réfléchissantes permettent de l'observer jusqu'à la série 5a incluse pour les deux modèles là où les mesures passives, avec ou sans surfaces réfléchissantes, s'y conforment jusqu'à la série 9a comprise pour le modèle initial voire la série 9b pour le modèle Q-ZEN.

(a) Modèle initial



(b) Modèle Q-ZEN

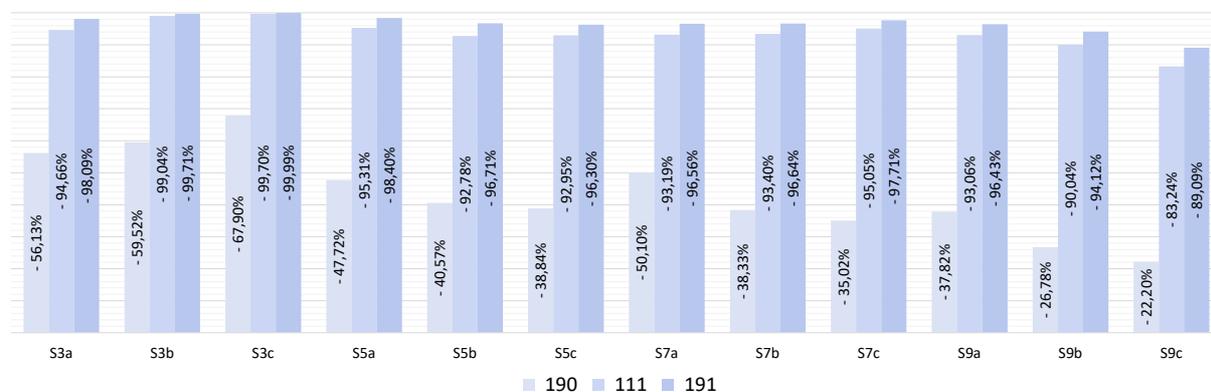


Figure 33 : baisse relative des degrés-heures de surchauffe avec différentes mesures par rapport au modèle de référence et avec un seuil de 23°C pour (a) le modèle initial et (b) le modèle Q-ZEN.

## 6.4. Le bilan énergétique

### 6.4.1. Changement climatique

D'un point de vue énergétique, l'augmentation des températures moyennes annuelles se traduit à terme par une diminution des besoins en chaud associée à une augmentation des besoins en froid [voir Figure 34]. En raison du climat tempéré dont bénéficie la Belgique, la demande en chauffage est prépondérante et devrait le rester malgré l'évolution de la répartition des besoins énergétiques [75]. Ainsi, l'énergie allouée au refroidissement du bâtiment à l'horizon 2100 n'atteint pas un pourcent pour le modèle initial et deux pourcent en ce qui concerne le modèle Q-ZEN dans le scénario le plus optimiste et ne devrait pas dépasser cinq et douze pourcent pour le scénario le plus pessimiste. Si les besoins absolus en froid sont sensiblement identiques entre le modèle initial et le modèle Q-ZEN, l'économie d'énergie de chauffage permise par l'amélioration de l'enveloppe de ce dernier entraîne une augmentation du poids relatif des besoins en refroidissement pour le modèle Q-ZEN. Cependant, ces proportions peuvent varier puisque les chiffres correspondent aux besoins nets et ne tiennent donc pas compte du rendement des systèmes énergétiques. Pour ce qui est des besoins en chauffage, ceux-ci restent relativement stables jusqu'à la série 7a, après laquelle ils baissent assez distinctement.

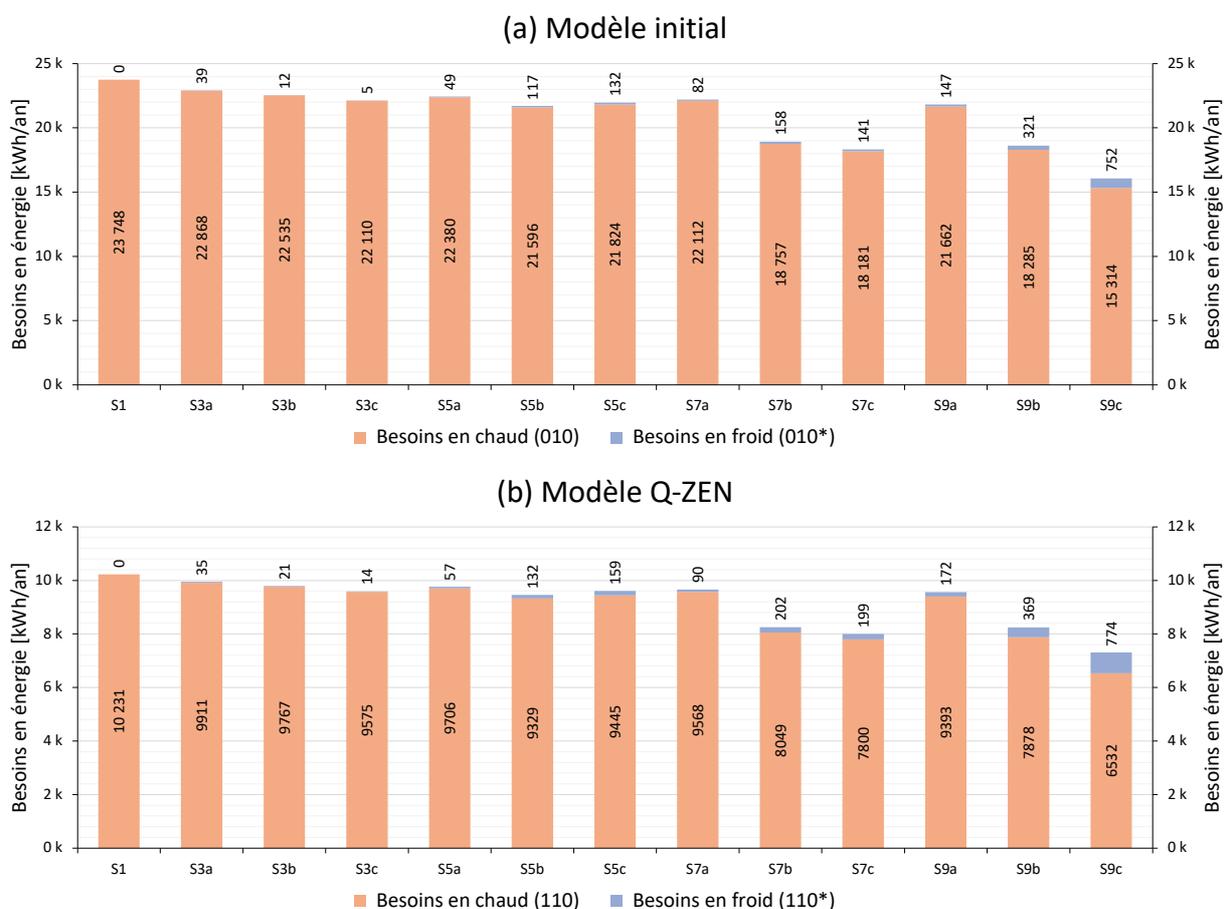


Figure 34 : évolution des besoins annuels nets en chaud et en froid dans tous les scénarios pour (a) le modèle initial et (b) le modèle Q-ZEN.

## 6.4.2. Réflectivité solaire

Les sections précédentes ont démontré que la relation entre température opérative et réflectivité solaire suit une trajectoire linéaire dont la pente dépend principalement de l'intensité du rayonnement solaire et du niveau global d'isolation du bâtiment, mais également que la capacité d'une surface à réduire la surchauffe diminue à mesure que sa réflectivité solaire augmente, en raison d'un effet de seuil. Cet effet de seuil produit le même effet sur les besoins en refroidissement avec une diminution relative supplémentaire de plus en plus faible par rapport à l'incrémentation précédente [voir Figure 35]. Au contraire, l'augmentation relative des besoins en chauffage s'accroît, mais la faible atténuation des températures en période hivernale rend cette accélération pratiquement imperceptible. Les besoins en froid étant sensiblement moins élevés que ceux en chaud, la diminution des premiers surpasse largement la hausse des seconds en valeur relative, ce qui n'est pas le cas en valeur absolue. D'autre part, la hausse relative des besoins en chaud est plus de deux fois supérieure pour le modèle Q-ZEN que pour le modèle initial, car les besoins en chaud ont diminué proportionnellement. Finalement, le bilan ne devient positif que pour le modèle Q-ZEN disposant de la réflectivité solaire maximale à partir de la période 2081-2100 et dans le scénario le plus pessimiste.

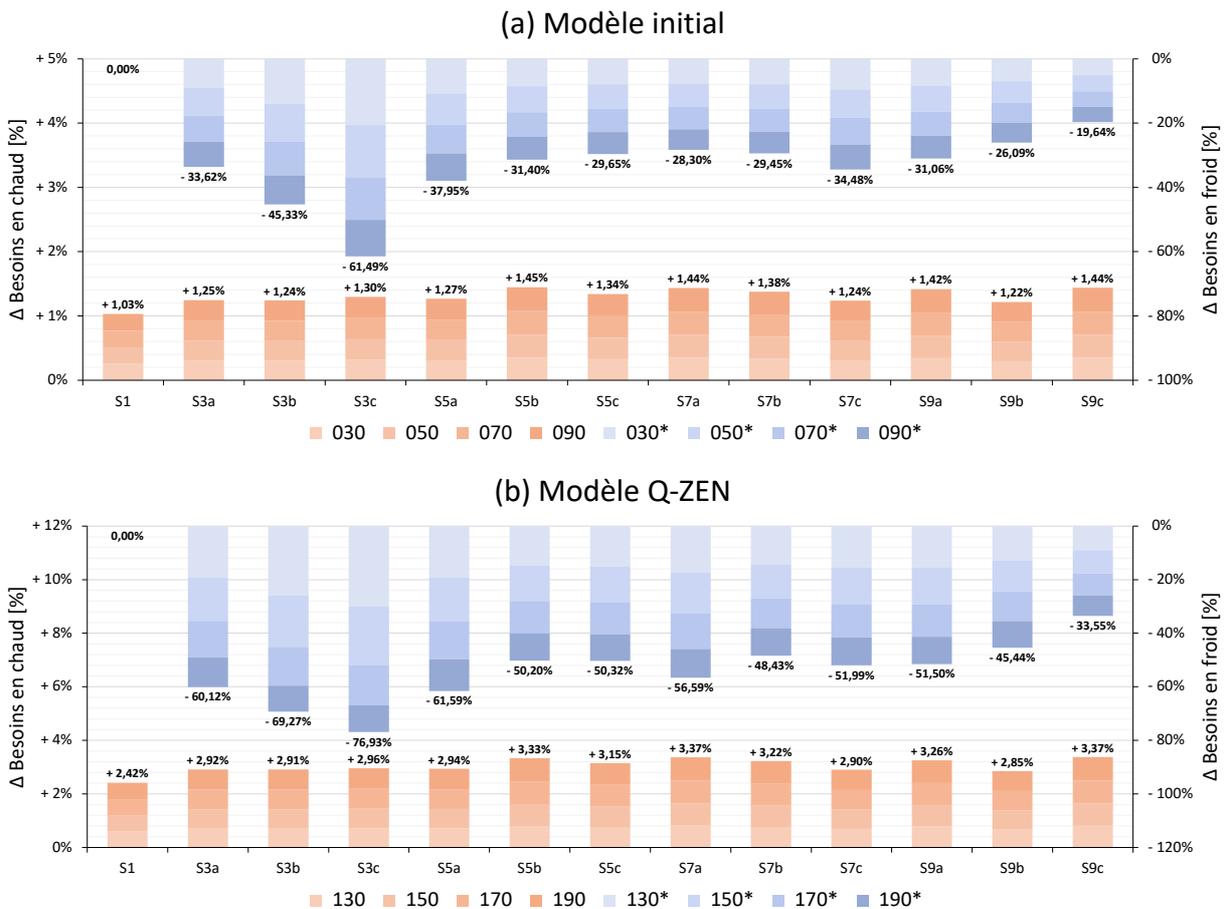


Figure 35 : évolution relative des besoins nets en chaud et en froid pour chaque réflectivité solaire par rapport à la réflectivité solaire de référence pour (a) le modèle initial et (b) le modèle Q-ZEN.

### 6.4.3. Autres mesures

La section 6.3.3. a mis en évidence que les mesures passives permettent une atténuation de la surchauffe bien plus importante qu'une réflectivité solaire élevée, mais que la combinaison des deux ne procure pas un effet beaucoup plus marqué. La consommation énergétique du système de refroidissement étant directement liée au niveau de surchauffe, la diminution relative des besoins en froid suit les mêmes tendances [voir Figure 36]. Concernant les besoins en chaud, il apparaît que la présence simultanée de revêtements réfléchissants et de mesures passives produit un accroissement qui surpasse la somme des hausses de ces deux mesures lorsqu'elles sont dissociées. De fait, la diminution des températures induite par une valeur de réflectivité solaire élevée augmente la probabilité que la température extérieure soit inférieure à la température opérative des zones thermiques et donc que les conditions de mise en œuvre de la ventilation nocturne soient réunies, accentuant ainsi les déperditions thermiques. En considérant le bilan énergétique dans son ensemble, la configuration avec mesures passives et celle réunissant mesures passives et réflectivité solaire maximale ne deviennent rentable qu'à partir de la série 9c en procurant une réduction de la consommation du système de refroidissement active supérieure à la croissance des besoins en chaud.

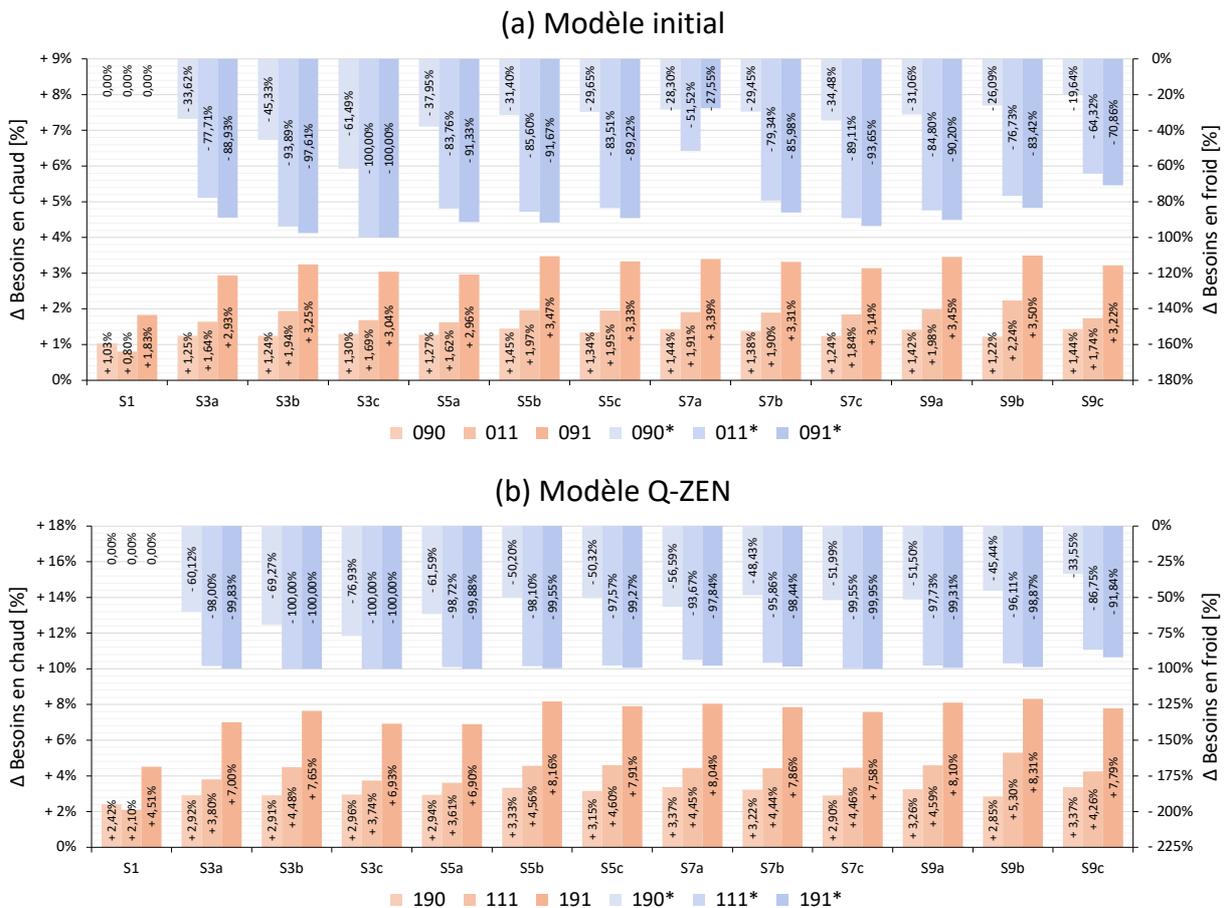


Figure 36 : évolution relative des besoins nets en chaud et en froid pour chaque mesure par rapport au modèle de référence pour (a) le modèle initial et (b) le modèle Q-ZEN.

## 6.5. Le bilan global

Afin de comparer équitablement l'efficacité énergétique des différentes mesures, il est nécessaire de considérer à la fois leur capacité d'atténuation de la surchauffe et l'augmentation des besoins en énergie qu'elles occasionnent. Pour ce faire, la variation relative des degrés-heures de surchauffe est rapportée à la variation relative de la consommation énergétique globale de manière à obtenir la diminution relative des degrés-heures de surchauffe pour une augmentation d'un pourcent des besoins en énergie. La surchauffe ne pouvant être inférieure à zéro, la valeur de 100 % constitue le seuil de saturation. En outre, les modèles disposant du refroidissement actif seront comparés séparément de ceux qui n'en disposent pas puisque les autres mesures agissent sur l'ensemble du spectre des températures alors que le refroidissement actif ne fonctionne que lorsqu'il y a surchauffe, ce qui le favorise largement. Le Tableau 13 indique clairement que le refroidissement actif seul est plus efficace énergétiquement dans la vaste majorité des cas, mais qu'il devient plus intéressant de le combiner avec les mesures passives, les surfaces réfléchissantes voire les deux à partir de la série 9c.

*Tableau 13 : réduction des degrés-heures de surchauffe par pourcent d'augmentation des besoins globaux en énergie pour un seuil de 26°C.*

Modèle initial													
ID	S1	S3a	S3b	S3c	S5a	S5b	S5c	S7a	S7b	S7c	S9a	S9b	S9c
010*	-	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	78%	86%	97%	39%	14%
030*	-	100%	100%	100%	100%	84%	79%	100%	63%	72%	73%	37%	15%
050*	-	100%	100%	100%	100%	65%	63%	77%	54%	61%	59%	35%	15%
070*	-	83%	100%	93%	81%	54%	53%	59%	47%	54%	50%	34%	15%
090*	-	67%	77%	72%	66%	46%	46%	49%	41%	48%	43%	32%	15%
011*	-	60%	51%	59%	60%	49%	48%	46%	48%	52%	48%	37%	27%
031*	-	50%	44%	50%	50%	42%	42%	39%	41%	45%	41%	34%	25%
051*	-	43%	39%	43%	43%	36%	37%	34%	36%	39%	36%	31%	24%
071*	-	38%	34%	37%	38%	32%	33%	31%	32%	35%	32%	28%	22%
091*	-	34%	31%	33%	34%	28%	29%	28%	29%	31%	28%	26%	21%
Modèle Q-ZEN													
ID	S1	S3a	S3b	S3c	S5a	S5b	S5c	S7a	S7b	S7c	S9a	S9b	S9c
110*	-	100%	100%	100%	100%	53%	45%	84%	30%	30%	41%	17%	7%
130*	-	83%	99%	86%	71%	41%	37%	54%	28%	29%	35%	17%	7%
150*	-	52%	59%	53%	50%	33%	31%	39%	26%	27%	30%	18%	8%
170*	-	38%	43%	39%	38%	27%	27%	31%	23%	25%	26%	18%	8%
190*	-	30%	33%	31%	30%	23%	23%	25%	21%	23%	23%	17%	8%
111*	-	26%	22%	27%	28%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	18%	17%
131*	-	22%	19%	22%	23%	18%	18%	19%	19%	19%	18%	16%	15%
151*	-	19%	17%	19%	19%	16%	16%	16%	16%	17%	16%	15%	14%
171*	-	16%	15%	16%	17%	14%	14%	14%	14%	15%	14%	13%	13%
191*	-	14%	13%	14%	14%	12%	13%	12%	13%	13%	12%	12%	11%

S'agissant des modèles sans refroidissement actif, l'efficacité énergétique est évaluée en plaçant le seuil de surchauffe à 23°C [voir Tableau 14] ; ce qui a pour conséquence de pénaliser les surfaces réfléchissantes, dont les performances sont meilleures lorsque les températures sont très élevées, mais permet surtout de mieux rendre compte du plein potentiel d'atténuation de la surchauffe de chaque mesure. En dépit de la hausse des besoins en chauffage qu'elles génèrent, les mesures passives seules témoignent d'une plus grande efficacité que les autres mesures dans la plupart des scénarios, aussi bien pour le modèle initial que le modèle Q-ZEN. L'unique mesure parvenant à faire mieux est la toiture rouge du modèle Q-ZEN pour les séries 3a à 3c, avantagée par le faible niveau de surchauffe présenté par ces dernières et par la faible augmentation des besoins énergétiques qu'une augmentation de deux dixièmes de la réflectivité solaire occasionne. De façon prévisible, le poids relatif plus conséquent de l'augmentation des besoins en chaud qu'entraînent les diverses mesures lorsqu'elles sont appliquées au modèle Q-ZEN en affecte l'efficacité énergétique qui se retrouve ainsi systématiquement inférieure à celle des mêmes mesures appliquées au modèle initial. Évidemment, cet indicateur d'efficacité énergétique est imparfait et ne peut donc suffire à valider ou invalider l'une ou l'autre stratégie de mitigation de la surchauffe en l'absence d'une analyse spécifique à chaque cas.

*Tableau 14 : réduction des degrés-heures de surchauffe par pourcent d'augmentation des besoins globaux en énergie pour un seuil de 23°C.*

Modèle initial													
ID	S1	S3a	S3b	S3c	S5a	S5b	S5c	S7a	S7b	S7c	S9a	S9b	S9c
030	35%	22%	32%	39%	20%	15%	17%	20%	16%	17%	15%	14%	9%
050	33%	21%	31%	38%	19%	15%	17%	20%	16%	17%	15%	14%	9%
070	32%	20%	30%	36%	19%	15%	17%	19%	15%	17%	15%	14%	9%
090	31%	20%	29%	34%	19%	14%	16%	19%	15%	17%	15%	13%	9%
011	<b>100%</b>	<b>44%</b>	<b>46%</b>	<b>55%</b>	<b>48%</b>	<b>38%</b>	<b>39%</b>	<b>39%</b>	<b>40%</b>	<b>43%</b>	<b>38%</b>	<b>31%</b>	<b>36%</b>
031	95%	37%	40%	46%	41%	33%	34%	33%	34%	37%	33%	28%	31%
051	76%	33%	35%	40%	36%	29%	30%	29%	30%	33%	29%	25%	27%
071	64%	30%	32%	36%	32%	26%	27%	26%	27%	29%	26%	23%	24%
091	55%	27%	29%	32%	29%	23%	24%	24%	24%	27%	23%	22%	21%
Modèle Q-ZEN													
ID	S1	S3a	S3b	S3c	S5a	S5b	S5c	S7a	S7b	S7c	S9a	S9b	S9c
130	28%	<b>25%</b>	<b>25%</b>	<b>29%</b>	19%	14%	14%	17%	13%	13%	13%	10%	7%
150	26%	23%	24%	27%	18%	13%	13%	16%	13%	13%	12%	10%	7%
170	24%	21%	22%	25%	17%	13%	13%	16%	12%	12%	12%	10%	7%
190	22%	19%	20%	23%	16%	12%	12%	15%	12%	12%	12%	9%	7%
111	<b>48%</b>	25%	22%	27%	<b>26%</b>	<b>20%</b>	<b>20%</b>	<b>21%</b>	<b>21%</b>	<b>21%</b>	<b>20%</b>	<b>17%</b>	<b>20%</b>
131	37%	21%	19%	22%	22%	17%	17%	18%	18%	18%	17%	15%	17%
151	30%	18%	17%	19%	19%	15%	15%	15%	16%	16%	15%	14%	14%
171	26%	16%	15%	16%	16%	13%	14%	13%	14%	14%	13%	12%	13%
191	22%	14%	13%	14%	14%	12%	12%	12%	12%	13%	12%	11%	11%

## VII. Discussion

### 7.1. Les limites de l'étude

L'objectif premier de cette étude consistait à évaluer le potentiel d'atténuation de la surchauffe des revêtements de toiture réfléchissants dans un contexte de réchauffement climatique spécifique à la Belgique. Comme tout travail de recherche, celui-ci comporte certaines limites, à commencer par le choix d'un unique cas d'étude, par ailleurs assez peu exposé à la surchauffe (du moins dans un premier temps). De fait, la diversité du parc résidentiel belge aurait mérité de se voir consacrer une analyse par typologie de bâtiment afin d'appréhender pleinement les capacités de tels revêtements. Ensuite, la volonté de considérer également la performance énergétique a conduit à privilégier l'utilisation de données météorologiques typiques, permettant une appréciation plus réaliste de la consommation moyenne du bâtiment. Cependant, l'analyse du comportement thermique de ce dernier lors de la journée la plus chaude illustre assez bien ce qu'il est possible d'attendre de ces revêtements lors de vagues de chaleur sans avoir à recourir aux données météorologiques extrêmes.

S'ajoutent à cela les limites inhérentes aux logiciels et au niveau de maîtrise de leur utilisateur, notamment en ce qui concerne la flexibilité de certains paramètres. Par exemple, TRNBuild permet uniquement d'assigner une valeur de réflectivité solaire constante, alors que celle-ci varie selon la distribution spectrale et angulaire du rayonnement solaire, elle-même dépendante de la position du soleil, des conditions atmosphériques et de l'orientation des surfaces [76]. En parallèle, l'emploi de débits constants pour simuler la ventilation nocturne souffre d'un manque de réalisme en négligeant des facteurs tels que la vitesse et la direction du vent, l'environnement bâti, l'orientation des ouvertures ou encore les différentiels de pression [77]. De plus, la régulation des protections solaires n'est pas aussi fine qu'escompté, la simulation cessant de fonctionner lorsque leur déploiement était conditionné au rayonnement et à la température des zones, ce qui en aurait amélioré l'efficacité [78].

Enfin, les résultats sont eux-mêmes sujets à caution. En effet, l'évaluation des performances des surfaces à haute réflectivité solaire est ici limitée aux bénéfices que revêt leur application en toiture et à l'échelle d'un bâtiment sans investiguer les services rendus à l'échelle d'un quartier, en particulier leur capacité à limiter les îlots de chaleur urbain [79]. D'autre part, il aurait été intéressant d'approfondir la notion de confort thermique en adoptant une approche adaptative de celui-ci [80] ou encore en exploitant les indices prédictifs mis au point par Fanger dans les années soixante, quoique ces derniers ne soient pas non plus exempts de critique [81]. Comme cela a déjà été précisé, le bilan énergétique des différentes mesures s'est fait sur base des besoins nets et n'est donc pas apte à fournir des indications précises sur le flux d'émissions associé à chacune d'entre elles. Pour toutes ces raisons, le présent travail ne donne qu'un aperçu d'un sujet qu'il serait nécessaire d'approfondir.

## 7.2. Les pistes de réflexion

Au-delà de leur capacité à prévenir la surchauffe, les surfaces réfléchissantes présentent un certain nombre de co-bénéfices. Au niveau du bâtiment, elles prolongent la durée de vie du revêtement de toiture en atténuant les amplitudes de température [79]. Lorsqu'elles sont utilisées à bon escient, elles permettent d'économiser sur les factures énergétiques en réduisant le dimensionnement des systèmes ou leur utilisation ; ce qui a également pour effet de minimiser le risque de décrochage du réseau électrique en période de pointe. En limitant la demande en énergie et l'accumulation de chaleur dans les zones urbaines, elles contribuent à atténuer le réchauffement climatique et à faire baisser la mortalité liée à la pollution atmosphérique [82] ou aux phénomènes d'îlot de chaleur [83]. Toutefois, la plupart de ces co-bénéfices sont induits par un bilan énergétique global positif, sans lequel les effets pourraient être contraires. De plus, les surfaces réfléchissantes sont susceptibles de générer de la condensation au sein des toitures, ainsi que de potentiels risques d'éblouissement [79].

Évidemment, les revêtements de toitures réfléchissants ne constituent pas l'unique moyen pour lutter contre l'accumulation de chaleur. De fait, les toitures végétalisées permettent de convertir partiellement l'énergie incidente en flux de chaleur latente par le biais de l'évapotranspiration, ce qui réduit le flux de chaleur sensible vers l'air environnant [84]. En outre, les propriétés thermiques du substrat apportent un complément d'isolation à la toiture [85]. Néanmoins, leur efficacité reste largement conditionnée par la teneur en humidité de ce substrat [86]. D'autre part, il y a les panneaux solaires qui permettraient aussi de réduire les besoins en refroidissement du bâtiment sur lequel ils sont apposés [87]. En revanche, l'impact de leur déploiement à grande échelle sur la surchauffe urbaine est incertain. Plusieurs études s'accordent sur leurs effets bénéfiques, principalement durant la nuit, tandis que d'autres pointent une hausse du flux de chaleur sensible qui pourrait exacerber l'intensité des îlots de chaleur et ainsi, annuler les bienfaits fournis par l'ombrage [88] [89] [90] [91].

Parmi ces trois options, les toitures réfléchissantes sont sans conteste la plus efficace lorsqu'il s'agit d'atténuer la surchauffe, aussi bien à l'échelle d'un bâtiment qu'à celle d'une ville [92]. Cependant, il est essentiel d'éviter de tomber dans une opposition stérile entre ces différentes solutions, car elles ne sont pas mutuellement exclusives et peuvent même créer des synergies. Une étude a notamment exploré le potentiel des « toitures vertes réfléchissantes » – alliant l'isolation thermique du substrat aux propriétés radiatives de certaines espèces de végétaux nécessitant peu d'entretien – dont les performances thermiques et énergétiques se sont avérées satisfaisantes [93]. De même, l'effet des toitures végétalisées ou réfléchissantes sur les températures de surface permettrait d'améliorer le rendement des installations photovoltaïques [94]. Dès lors, il serait plutôt judicieux de favoriser une diversité fonctionnelle afin de profiter à la fois de la capacité d'atténuation des îlots de chaleur urbain, des services écosystémiques et de la production d'énergie renouvelable que procurent ces toitures.

Les discussions sur la pertinence de l'une ou l'autre stratégie ne doivent pas éclipser les réalités socio-économiques auxquelles l'adaptation au changement climatique ne peut se soustraire. En pratique, la mise en œuvre des mesures abordées précédemment repose principalement sur des initiatives individuelles. Or, ce sont bien souvent les catégories de populations les plus vulnérables aux aléas climatiques qui disposent aussi du moins de ressources pour s'en prémunir [95]. Par conséquent, il est essentiel que les réponses apportées s'inscrivent dans une recherche de justice sociale, ce qui passe nécessairement par une institutionnalisation des inégalités environnementales [96]. En ce sens, des solutions éprouvées telles que la déminéralisation et la végétalisation des espaces, aussi bien publics que privés, devraient être plus largement implémentées [97]. Si les proportions varient d'une ville à l'autre, les toitures des bâtiments couvrent une surface à peu près équivalente à l'ensemble des voiries, le potentiel est donc énorme [45]. L'îlot de chaleur ne s'arrêtant pas aux limites de propriétés, il serait intéressant d'étudier le potentiel du déploiement des différents types de toitures par quartier.

Parallèlement aux considérations purement urbanistiques et techniques de l'adaptation, la faculté des usagers d'un bâtiment à construire activement leur confort reste déterminante. Il est globalement admis qu'une augmentation du niveau de contrôle des occupants sur leur environnement thermique permettrait également d'améliorer le confort ressenti, en plus de réduire la consommation d'énergie [98]. A cet égard, les mesures passives étudiées dans ce travail présentent l'avantage d'être des solutions pilotables, contrairement aux toitures sur lesquelles les habitants n'ont aucune prise. Le glissement progressif des températures qui s'est opéré dans les logements au XX<sup>ème</sup> siècle démontre que l'évolution des normes de confort est intimement liée aux progrès techniques et à la démocratisation des systèmes énergétiques, mais également aux crises [99]. Loin de se limiter à un ajustement ponctuel des températures, les habitants mobilisent un ensemble d'objets et de pratiques thermiques qui apparaissent afin de combler les interstices laissés par les dispositifs techniques [100].

L'adaptation au changement climatique nécessiterait donc une approche fondée sur le concept d'intelligence énergétique que la sociologue Hélène Subrémon définit comme étant le « *le fruit de la négociation opérée par les habitants entre leurs propres savoir-faire et le donné technique propre à toute habitation moderne* » [101]. Cette tactique impliquerait que la construction du confort ne soit plus systématiquement déléguée aux équipements techniques, même si ceux-ci resteront de toute évidence indispensables. Quoiqu'il arrive, les populations exposées chercheront légitimement à s'adapter aux conséquences du changement en employant tous les moyens à leur disposition, ce qui convoque un risque de mal-adaptation. Dans le but d'accompagner au mieux les citoyens, la création d'une banque de modèles contenant les typologies de bâtiments résidentiels les plus répandues contribuerait fortement à accélérer les efforts de recherche visant à déterminer les mesures qui seraient les plus pertinentes à l'échelle d'un territoire afin de s'adapter à l'évolution des températures.

## VIII. Conclusion

Sous l'influence du changement climatique, il se pourrait que l'habitat ne parvienne bientôt plus à assurer correctement son rôle protecteur en tant qu'interface entre les individus et l'environnement extérieur. L'exposition aux vagues de chaleur et aux îlots de chaleur urbains est un risque sanitaire majeur, notamment pour les populations les plus fragiles. La réduction de ce risque requerrait la mise en place de politiques d'atténuation et d'adaptation ambitieuses. Cependant, la voie que semble emprunter la société laisse peu de place à l'espoir quant au respect des engagements pris dans le cadre de l'Accord de Paris. Ainsi, il convient de penser dès maintenant l'adaptation des systèmes humains tout en poursuivant les efforts de réduction des gaz à effet de serre, si insuffisants soient-ils. En partant de ce constat, le présent travail a cherché à évaluer le potentiel des toitures réfléchissantes en termes de réduction de la surchauffe et de la consommation énergétique au moyen d'une série de simulations dynamiques du comportement thermique d'un logement exposé à l'évolution du climat en Belgique.

Les résultats ont montré que les revêtements réfléchissants permettent de réduire sensiblement la température de surface extérieure des toitures lorsque le rayonnement solaire est important, ce qui semble confirmer leur intérêt pour ce qui est de limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain. En revanche, l'impact sur les températures opératives des pièces de vie s'est révélé trop faible pour véritablement endiguer la surchauffe. Toutefois, la réduction de la température des combles plus élevée signifie que ce type de revêtement pourrait être bien plus bénéfique pour un bâtiment dont une large partie de la surface habitable serait située directement sous la toiture. Au niveau du bilan énergétique, les besoins globaux en énergie augmentent invariablement en raison d'une pénalité de chauffage supérieure aux gains en refroidissement, mais la diminution de la consigne de refroidissement ferait mécaniquement augmenter les besoins en froid et donc aussi les économies. L'utilisation de toitures réfléchissantes pourrait alors être tout à fait indiquée pour les bâtiments abritant des personnes sensibles à la chaleur.

Concernant les mesures passives, elles ont démontré toute leur importance pour la régulation du confort des habitants avec une diminution importante de l'ampleur de la surchauffe dans tous les scénarios envisagés, malgré une hausse des besoins en énergie qui aurait sans doute été partiellement évitable en utilisant des paramètres plus souples. Bien qu'elle soit essentielle pour limiter les risques, l'adoption de pratiques thermiques adéquates de la part des habitants ne sera pas suffisante pour les éliminer totalement, ce qui exige une réponse collective. De toute évidence, les pratiques habitantes et la société toute entière subiront de profondes mutations dans les décennies à venir, comme cela a déjà été le cas au siècle passé. Ainsi, il est probable que des dispositifs architecturaux issus de climats chauds, tels que le badgour traditionnel persan dont se sont inspirés les concepteurs de l'école maternelle des Boutours située près de Paris, soient de plus en plus utilisés sur le continent européen.

## IX. Bibliographie

- [1] Larousse. (s.d.). Habitat. Encyclopédie en ligne. Consulté le 2 juin 2024 sur <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/habitat/57164>
- [2] Portner, H.-O., Roberts, D., Trisos, C., Simpson, N., Möller, V., & Méndez, C. (2022). *Summary for Policymakers: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>
- [3] United Nations (UN). (2015). *Paris Agreement*. Consulté le 2 juin 2024 sur [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf)
- [4] Gouvernements régionaux belges (2020). *Stratégie à long terme de la Belgique*. Consulté le 2 juin 2024 sur [https://ec.europa.eu/clima/sites/lts/lts\\_be\\_fr.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/lts/lts_be_fr.pdf)
- [5] SPW Territoire Patrimoine Logement Énergie. (2020). *Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme du bâtiment*. Consulté le 2 juin 2024 sur [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-12/ltrs\\_wallonia\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-12/ltrs_wallonia_0.pdf)
- [6] Forster, P. M., Smith, C. J., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Hauser, M., Ribes, A., Rosen, D., Gillett, N., Palmer, M. D., Rogelj, J., von Schuckmann, K., Seneviratne, S. I., Trewin, B., Zhang, X., Allen, M., Andrew, R., Birt, A., Borger, A., ... Zhai, P. (2023). Indicators of Global Climate Change 2022: Annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data*, 15(6), pp. 2295-2327. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>
- [7] Liu, Z., Deng, Z., Davis, S., & Ciais, P. (2023). Monitoring global carbon emissions in 2022. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(4), pp. 205-206. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00406-z>
- [8] Wang, Y.-R., Hessen, D. O., Samset, B. H., & Stordal, F. (2022). Evaluating global and regional land warming trends in the past decades with both MODIS and ERA5-Land land surface temperature data. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113181. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113181>
- [9] World Meteorological Organization (WMO), Copernicus Climate Change Service (C3S). (2024). *European State of the Climate 2023*. United Nations. <https://doi.org/10.24381/BS9V-8C66>
- [10] Royal Meteorological Institute of Belgium (RMI). (2020). *Rapport climatique 2020 : De l'information aux services climatiques*. Consulté le 4 juin 2024 sur <https://climat.be/doc/kmi-irm-rapport-2020-complet-fr.pdf>
- [11] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- [12] Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, pp. 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- [13] O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, pp. 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- [14] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988>
- [15] Ozer, P. (2012). Chapitre 5. Les risques naturels. Dans Brunet, S., Fallon, C., Ozer, P., Schiffino, N. & Thiry, A. (Eds.), *Articuler risques, planification d'urgence et gestion de crise* (pp. 77-99). Louvain-La-Neuve, Belgium: De Boeck. <https://doi.org/10.3917/dbu.brune.2012.01.0077>

- [16] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). (2011). *Diagnostic de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique : Éléments méthodologiques tirés de l'expérience internationale*. Accés depuis <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/3510-diagnostic-de-vulnerabilite-d-un-territoire-au-changement-climatique.html>
- [17] Leone, F., Meschiné de Richemond, N., & Vinet, F. (2010). *Aléas naturels et gestion des risques*. PUF, Presses universitaires de France. [https://hal.science/hal-03279213/file/Aleas\\_Naturels\\_Et\\_Gestion\\_Des\\_Risques\\_2010\\_PUF\\_Leone\\_Vinet\\_MeschinetDeRichemond\\_Complet\\_leger.pdf](https://hal.science/hal-03279213/file/Aleas_Naturels_Et_Gestion_Des_Risques_2010_PUF_Leone_Vinet_MeschinetDeRichemond_Complet_leger.pdf)
- [18] United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). *A Practical Guide to Climate-resilient Buildings and Communities*. Consulté le 4 juin 2024 sur <https://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/36405/Adapbuild.pdf>
- [19] United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). (2009). *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. Consulté le 4 juin 2024 sur [https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ge/GE\\_isdr\\_terminology\\_2009\\_eng.pdf](https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ge/GE_isdr_terminology_2009_eng.pdf)
- [20] Przydrozny, I., Million, M., Michel, I., Brunnengreber, P., Russo, L. & Guiran, G. (2010). *Guide d'accompagnement du territoire pour l'analyse de sa vulnérabilité socio-économique au changement climatique* (1020011). Sogreah Consultants SAS. Consulté le 5 juin sur [https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/Guide\\_accompagnement\\_vulnerabilite\\_territoires\\_.pdf](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/Guide_accompagnement_vulnerabilite_territoires_.pdf)
- [21] Institut Wallonie de l'évaluation, de la prospective et de la statistique (IWEPS). (2023). *Les chiffres-clés de la Wallonie - Édition 2023*. Consulté le 5 juin 2024 sur [https://www.iweps.be/wp-content/uploads/2023/10/CC2023\\_web\\_compressed.pdf](https://www.iweps.be/wp-content/uploads/2023/10/CC2023_web_compressed.pdf)
- [22] Cassilde, S. & Pradella, S. (Eds.). (2019). *Performance énergétique du parc de bâtiments résidentiels en Wallonie - Édition 2019*. Centre d'Études en Habitat Durable de Wallonie (CEHD). Consulté le 6 juin 2024 sur [https://cehd.be/media/1233/19\\_09\\_23\\_rapport\\_peb.pdf](https://cehd.be/media/1233/19_09_23_rapport_peb.pdf)
- [23] Commission européenne (CE). (2019). *Communication de la Commission - Le pacte vert pour l'Europe* (COM/2019/640). EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=COM:2019:640:FIN>
- [24] Jossen, Q. pour CLIMACT. (2022, 16 mars). *Construction et décarbonations : vers une révolution durable ?* [Diapositives]. Table-ronde de CAP Construction à Gembloux, Belgique. Consulté le 6 juin 2024 sur <https://clusters.wallonie.be/cap-construction/sites/cap-construction/files/2022-03/220310%20-%20CAP%20Construction%20-%20Contexte%20EU-BE-RW.pdf>
- [25] European Commission. Statistical Office of the European Union. (2016). *Urban Europe: Statistics on cities, towns and suburbs: 2016 edition*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2785/91120>
- [26] Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current Environmental Health Reports*, 4(3), pp. 296-305. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>
- [27] De Ridder, K., Maiheu, B., Lauwaet, D., Dagleis, I. A., Keramitsoglou, I., Kourtidis, K., Manunta, P., & Paganini, M. (2017). Urban Heat Island Intensification during Hot Spells: The Case of Paris during the Summer of 2003. *Urban Science*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/urbansci1010003>
- [28] De Ridder, K., Couderé, K., Depoorter, M., Liekens, I., Pourria, X., Steinmetz, D., Vanuytrecht, E., Verhaegen, K. & Wouters, H. (2020). *Evaluation of the socio-economic impact of climate change in Belgium: Final Report*. Consulté le 7 juin 2024 sur [https://www.adapt2climate.be/wp-content/uploads/2020/09/SECLIM-BE-2020\\_FinalReport.pdf](https://www.adapt2climate.be/wp-content/uploads/2020/09/SECLIM-BE-2020_FinalReport.pdf)
- [29] De Troeyer, K., Bauwelinck, M., Aerts, R., Profer, D., Berckmans, J., Delcloo, A., Hamdi, R., Van Schaeuybroeck, B., Hooyberghs, H., Lauwaet, D., Demoury, C., & Van Nieuwenhuyse, A. (2020). Heat related mortality in the two largest Belgian urban areas: A time series analysis. *Environmental Research*, 188, 109848. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109848>
- [30] Rahif, R., Amaripadath, D., & Attia, S. (2021). Review on Time-Integrated Overheating Evaluation Methods for Residential Buildings in Temperate Climates of Europe. *Energy and Buildings*, 252, 111463. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111463>

- [31] Levinson, R., Akbari, H., Konopacki, S., & Bretz, S. (2005). Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements. *Energy Policy*, 33(2), pp. 151-170. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00206-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00206-4)
- [32] Challener, C. (2010). Roof Coatings : Cool Technology Is a Hot Topic. *Jct Coatings Tech*, 7, pp. 44-47. [https://www.researchgate.net/publication/296807198\\_Roof\\_Coatings\\_Cool\\_Technology\\_Is\\_a\\_Hot\\_Topic](https://www.researchgate.net/publication/296807198_Roof_Coatings_Cool_Technology_Is_a_Hot_Topic)
- [33] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>
- [34] Courgey, S., & Oliva, J.-P. (2006). *La conception bioclimatique : Des maisons économes et confortables en neuf et en réhabilitation*. Terre vivante.
- [35] Stenou, M. (2019). Live Your Myth in Greece: Towards the Construction of a Heritage Identity. *Heritage*, 2(2), pp. 1640–1661. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/heritage2020101>
- [36] Delgado, A., Mukhopadhyaya, P., Normandin, N., & Paroli, R. (2005). *Characteristics of membranes and insulations used for low-sloped roofs*. Consulté le 6 juin 2024 sur <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=aec09070-95a4-4739-b245-b572b24687ec>
- [37] U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. (s.d.). *Cool Roofs Fact Sheet*. Consulté le 6 juin 2024 sur [https://www1.eere.energy.gov/buildings/pdfs/cool\\_roof\\_fact\\_sheet.pdf](https://www1.eere.energy.gov/buildings/pdfs/cool_roof_fact_sheet.pdf)
- [38] Pisello, A. L. (2015). 9. High-albedo roof coatings for reducing building cooling needs. In Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J.A., Cabeza, L.F. & Granqvist, C.-G. (Eds.), *Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs: Design, Properties and Applications*, pp. 243-268. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-380-5.00009-1>
- [39] *About*. (s.d.). Cool Roof Rating Council (CRRC). Consulté le 6 juin 2024 sur <https://coolroofs.org/about>
- [40] Akbari, H., & Levinson, R. (2008). Evolution of Cool-Roof Standards in the US. *Advances in Building Energy Research*, 2, pp. 1-32. <https://doi.org/10.3763/aber.2008.0201>
- [41] Synnefa, A., & Santamouris, M. (2012). Advances on technical, policy and market aspects of cool roof technology in Europe: The Cool Roofs project. *Energy and Buildings*, 55, pp. 35-41. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.051>
- [42] Ding, Z., Li, X., Fan, X., Xu, M., Zhao, J., Li, Y., & Xu, H. (2022). A review of the development of colored radiative cooling surfaces. *Carbon Capture Science & Technology*, 4, 100066. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100066>
- [43] Schmutz, W. K. (2021). Changes in the Total Solar Irradiance and climatic effects. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 11, 40. <https://doi.org/10.1051/swsc/2021016>
- [44] Makenzi, M., Muguthu, J., & Murimi, E. (2020). Maximization of Site-Specific Solar Photovoltaic Energy Generation through Tilt Angle and Sun-Hours Optimization. *Journal of Renewable Energy*, 2020, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1155/2020/8893891>
- [45] Pisello, A. L. (2017). State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities. *Solar Energy*, 144, pp. 660-680. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.068>
- [46] Ferrari, C., Libbra, A., Muscio, A., & Siligardi, C. (2013). Influence of the irradiance spectrum on solar reflectance measurements. *Advances in Building Energy Research*, 7(2), pp. 244-253. <https://doi.org/10.1080/17512549.2013.865563>
- [47] Costanzini, S., Ferrari, C., Despini, F., & Muscio, A. (2021). Standard Test Methods for Rating of Solar Reflectance of Built-Up Surfaces and Potential Use of Satellite Remote Sensors. *Energies*, 14(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/en14206626>
- [48] Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085-3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>

- [49] Muscio, A. (2018). The Solar Reflectance Index as a Tool to Forecast the Heat Released to the Urban Environment: Potentiality and Assessment Issues. *Climate*, 6, 12. <https://doi.org/10.3390/cli6010012>
- [50] D08 Committee. (2023). *Practice for Laboratory Soiling and Weathering of Roofing Materials to Simulate Effects of Natural Exposure on Solar Reflectance and Thermal Emittance*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D7897-18R23>
- [51] *CRRC Rated Roof Products Directory*. (s.d.). Cool Roof Rating Council (CRRC). Consulté le 8 juin 2024 à l'adresse <https://coolroofs.org/directory/roof>
- [52] Wang, L., Huang, M., & Li, D. (2020). Where Are White Roofs More Effective in Cooling the Surface? *Geophysical Research Letters*, 47(15), e2020GL087853. <https://doi.org/10.1029/2020GL087853>
- [53] Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 39(11), pp. 1167-1174. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.004>
- [54] Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), pp. 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- [55] Bozonnet, E., Doya, M., & Allard, F. (2011). Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. *Energy and Buildings*, 43(11), pp. 3006-3012. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.017>
- [56] Pisello, A. L., & Cotana, F. (2015). Experimental and Numerical Study on Thermal Performance of New Cool Clay Tiles in Residential Buildings in Europe. *Energy Procedia*, 75, pp. 1393-1398. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.227>
- [57] Kolokotroni, M., Gowreesunker, B. L., & Giridharan, R. (2013). Cool roof technology in London: An experimental and modelling study. *Energy and Buildings*, 67, pp. 658-667. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.011>
- [58] Piselli, C., Pisello, A. L., Saffari, M., de Gracia, A., Cotana, F., & Cabeza, L. F. (2019). Cool Roof Impact on Building Energy Need: The Role of Thermal Insulation with Varying Climate Conditions. *Energies*, 12(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/en12173354>
- [59] Pisello, A. L., Piselli, C., & Cotana, F. (2015). Influence of human behavior on cool roof effect for summer cooling. *Building and Environment*, 88, pp. 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.025>
- [60] Taha, H., & Akbari, H. (2003). Cool roofs as an energy conservation measure for federal buildings. United States. <https://doi.org/10.2172/813376>
- [61] Bamdad, K. (2023). Cool roofs: A climate change mitigation and adaptation strategy for residential buildings. *Building and Environment*, 236, 110271. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110271>
- [62] Hauglustaine, J.-M., & Simon, F. (2018). *La ventilation et l'énergie*. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/248699>
- [63] Comment mieux se chauffer ? (s. d.). Agence de la transition écologique (ADEME). Consulté le 9 février 2024 sur [https://multimedia.ademe.fr/infographies/infographie\\_mieux\\_se\\_chauffer/](https://multimedia.ademe.fr/infographies/infographie_mieux_se_chauffer/)
- [64] Chauffage dans les bâtiments. (s. d.). Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. Consulté le 9 février 2024 sur <https://www.ecologie.gouv.fr/chauffage-dans-batiments>
- [65] *Exigences PEB du 1er janvier 2021 au 10 mars 2021*. (s. d.). Site énergie du Service public de Wallonie. Consulté le 8 avril 2024, sur <https://energie.wallonie.be/fr/exigences-peb-du-1er-janvier-2021-au-10-mars-2021.html?IDD=114100&IDC=7224>
- [66] *Atlas climatique*. (s. d.). Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM). Consulté le 10 février 2024 sur <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/atlas-climatique/cartes-climatiques/temperature-de-lair/moyenne/annuel>
- [67] OCCuPANT. (s. d.). Université de Liège. Consulté le 13 février 2024 sur [https://www.occupant.uliege.be/cms/c\\_8075770/en/occupant-occupant](https://www.occupant.uliege.be/cms/c_8075770/en/occupant-occupant)

- [68] Doutreloup, S., Fettweis, X., Rahif, R., Elnagar, E., Pourkiaei, M. S., Amaripadath, D., & Attia, S. (2022). Historical and future weather data for dynamic building simulations in Belgium using the regional climate model MAR: Typical and extreme meteorological year and heatwaves. *Earth System Science Data*, 14(7), pp. 3039-3051. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3039-2022>
- [69] Crétat, J., Pohl, B., & Richard, Y. (2011, février). Les modèles climatiques régionaux : Outils de décomposition des échelles spatio-temporelles. *Dixièmes Rencontres de ThéoQuant à Besançon, France*. <https://hal.science/hal-00744040>
- [70] Colin, B. (2023). *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*. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/18324>
- [71] Aschaber, J., Hiller, M., & Weber, R. (2010). Trnsys17: New features of the multizone building model. International Building Performance Simulation Association (IBPSA). <https://www.researchgate.net/publication/252452694>
- [72] Hiller, M. D. E., Beckman, W. A., & Mitchell, J.W. (2000). TRNSHD: a program for shading and insolation calculations. *Building and Environment*, 35(7), pp. 633-644. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00051-7)
- [73] Shultz, J., Witmer, L., & Brownson, J. (2012). Impact of Shade on HVAC Energy Consumption in Buildings: A Residential Case Study. 41st American Solar Energy Society (ASES) Meeting at Denver, United States. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3126.1527>
- [74] 07.02 Critères de surchauffe. (2015). Guide PEB 2015. Site énergie du Service public de Wallonie. Consulté le 14 mai 2024 sur [https://energie.wallonie.be/fr/07-02-critere-de-surchauffe.html?IDC\\_PEB=9491&IDD=113655&IDC=9094](https://energie.wallonie.be/fr/07-02-critere-de-surchauffe.html?IDC_PEB=9491&IDD=113655&IDC=9094)
- [75] Ramon, D., Allacker, K., De Troyer, F., Wouters, H., & van Lipzig, N.P.M. (2020). Future heating and cooling degree days for Belgium under a high-end climate change scenario. *Energy and Buildings*, 216, 109935. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109935>
- [76] Levinson, R., Akbari, H., & Berdahl, P. (2010). Measuring solar reflectance. Part I: Defining a metric that accurately predicts solar heat gain. *Solar Energy*, 84(9), pp. 1717-1744. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.04.018>
- [77] Castro, E., & Virgone, J. (2006). *A TRNSYS component to calculate natural ventilation and indoor air quality in multizone buildings*. Accès depuis <https://www.researchgate.net/publication/278770878>
- [78] van Moeseke, G., Bruyère, I., & De Herde, A. (2007). Impact of control rules on the efficiency of shading devices and free cooling for office buildings. *Building and Environment*, 42(2), pp. 784-793. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.015>
- [79] Ashtari, B., Yeganeh, M., Bemanian, M., & Vojdani, B. (2021). A Conceptual Review of the Potential of Cool Roofs as an Effective Passive Solar Technique: Elaboration of Benefits and Drawbacks. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.738182>
- [80] de Dear, R., & Brager, G.S. (1998). *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference*. <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>
- [81] Hoof, J. (2008). Forty years of Fanger's model of thermal comfort: Comfort for all? *Indoor air*, 18, pp. 182-201. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00516.x>
- [82] Akbari, H., & Matthews, H. D. (2012). Global cooling updates : Reflective roofs and pavements. *Energy and Buildings*, 55, pp. 2-6. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.055>
- [83] Macintyre, H. L., Heaviside, C., Cai, X., & Phalkey, R. (2021). Comparing temperature-related mortality impacts of cool roofs in winter and summer in a highly urbanized European region for present and future climate. *Environment International*, 154, 106606. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106606>
- [84] Wang, X., Li, H., & Sodoudi, S. (2022). The effectiveness of cool and green roofs in mitigating urban heat island and improving human thermal comfort. *Building and Environment*, 217, 109082. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109082>

- [85] D’Orazio, M., Di Perna, C., & Di Giuseppe, E. (2012). Green roof yearly performance: A case study in a highly insulated building under temperate climate. *Energy and Buildings*, 55, pp. 439-451. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.009>
- [86] Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., de Rossi, F., & Vanoli, G. P. (2015). 13. Technical and economic analysis of green roofs to reduce building cooling needs. In F. Pacheco-Torgal, J. A. Labrincha, L. F. Cabeza, & C.-G. Granqvist (Éds.), *Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs* (pp. 349-378). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-380-5.00013-3>
- [87] Dominguez, A., Kleissl, J., & Luvall, J. C. (2011). Effects of solar photovoltaic panels on roof heat transfer. *Solar Energy*, 85(9), pp. 2244-2255. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.010>
- [88] Salamanca, F., Georgescu, M., Mahalov, A., Moustouli, M., & Martilli, A. (2016). Citywide Impacts of Cool Roof and Rooftop Solar Photovoltaic Deployment on Near-Surface Air Temperature and Cooling Energy Demand. *Boundary-Layer Meteorology*, 161(1), pp. 203-221. <https://doi.org/10.1007/s10546-016-0160-y>
- [89] Masson, V., Bonhomme, M., Salagnac, J.-L., Briottet, X., & Lemonsu, A. (2014). Solar panels reduce both global warming and urban heat island. *Frontiers in Environmental Science*, 2. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00014>
- [90] Pham, J. V., Baniassadi, A., Brown, K. E., Heusinger, J., & Sailor, D. J. (2019). Comparing photovoltaic and reflective shade surfaces in the urban environment: Effects on surface sensible heat flux and pedestrian thermal comfort. *Urban Climate*, 29, 100500. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100500>
- [91] Garshasbi, S., Khan, A., & Santamouris, M. (2023). On the cooling energy penalty of urban photovoltaics: A case study in Sydney, Australia. *Energy and Buildings*, 294, 113259. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113259>
- [92] Tan, H., Kotamarthi, R., Wang, J., Qian, Y., & Chakraborty, T. C. (2023). Impact of different roofing mitigation strategies on near-surface temperature and energy consumption over the Chicago metropolitan area during a heatwave event. *Science of The Total Environment*, 860, 160508. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160508>
- [93] Pisello, A. L., Piselli, C., & Cotana, F. (2015). Thermal-physics and energy performance of an innovative green roof system: The Cool-Green Roof. *Solar Energy*, 116, pp. 337-356. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.049>
- [94] Macintyre, H. L., Heaviside, C., Cai, X., & Phalkey, R. (2021). Comparing temperature-related mortality impacts of cool roofs in winter and summer in a highly urbanized European region for present and future climate. *Environment International*, 154, 106606. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106606>
- [95] De Ridder, K., Couderé, K., Depoorter, M., Liekens, I., Pourria, X., Steinmetz, D., Vanuytrecht, E., Verhaegen, K., & Wouters, H. (2020). *Evaluation of the socio-economic impact of climate change In Belgium*. Consulté le 5 juin 2024 sur <https://climat.be/doc/seclim-be-2020-finalreport.pdf>
- [96] De Mynck, S., Ragot, A., Mugabo, A., Wallenborn, G., & Wayens, B. (2022). *Institutionnaliser les inégalités environnementales : Le cas du Plan d’Action Climat Forestois*. <https://www.researchgate.net/publication/364677402>
- [97] Gill, S., Handley, J. F., Ennos, R., & Pauleit, S. (2007). Adapting Cities for Climate Change : The Role of the Green Infrastructure. *Built Environment*, 33, pp. 115-133. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>
- [98] Yun, G. Y. (2018). Influences of perceived control on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and Buildings*, 158, pp. 822-830. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.044>
- [99] Vigié, R. (2020). Une courbe pour bien se chauffer. Les températures de chauffage préconisées au XXI<sup>e</sup> siècle. *Flux*, 121(3), pp. 102-107. <https://doi.org/10.3917/flux1.121.0102>
- [100] Brisepierre, G. (2013). *Analyse sociologique de la consommation d’énergie dans les bâtiments résidentiels et tertiaires. Bilan et perspectives*. ADEME. Consulté le 6 juin 2024 sur <https://gbrisepierre.fr/wp-content/uploads/2013/12/Brisepierre-Synthèse-socio-énergie-ADEME-2013.pdf>
- [101] Subrémon, H. (2012). Pour une intelligence énergétique : ou comment se libérer de l’emprise de la technique sur les usages du logement. Métropolitiques. Consulté le 6 juin 2024 sur <https://metropolitiques.eu/Pour-une-intelligence-energetique.html>

# X. Annexes

## Annexe I

<i>Tableau 15 : identifiants et paramètres des simulations.</i>					
<b>Simulation</b>	<b>Période</b>	<b>Scénario</b>	<b>Isolation</b>	<b>Réflexivité</b>	<b>Mes. passives</b>
Série 1					
<i>S1_010</i>	2001-2020	ERA5	0	0,10	0
<i>S1_030</i>	2001-2020	ERA5	0	0,30	0
<i>S1_050</i>	2001-2020	ERA5	0	0,50	0
<i>S1_070</i>	2001-2020	ERA5	0	0,70	0
<i>S1_090</i>	2001-2020	ERA5	0	0,90	0
<i>S1_011</i>	2001-2020	ERA5	0	0,10	1
<i>S1_031</i>	2001-2020	ERA5	0	0,30	1
<i>S1_051</i>	2001-2020	ERA5	0	0,50	1
<i>S1_071</i>	2001-2020	ERA5	0	0,70	1
<i>S1_091</i>	2001-2020	ERA5	0	0,90	1
<i>S1_110</i>	2001-2020	ERA5	1	0,10	0
<i>S1_130</i>	2001-2020	ERA5	1	0,30	0
<i>S1_150</i>	2001-2020	ERA5	1	0,50	0
<i>S1_170</i>	2001-2020	ERA5	1	0,70	0
<i>S1_190</i>	2001-2020	ERA5	1	0,90	0
<i>S1_111</i>	2001-2020	ERA5	1	0,10	1
<i>S1_131</i>	2001-2020	ERA5	1	0,30	1
<i>S1_151</i>	2001-2020	ERA5	1	0,50	1
<i>S1_171</i>	2001-2020	ERA5	1	0,70	1
<i>S1_191</i>	2001-2020	ERA5	1	0,90	1
Série 3a					
<i>S3a_010</i>	2021-2040	SSP2-4.5	0	0,10	0
<i>S3a_030</i>	2021-2040	SSP2-4.5	0	0,30	0
<i>S3a_050</i>	2021-2040	SSP2-4.5	0	0,50	0
<i>S3a_070</i>	2021-2040	SSP2-4.5	0	0,70	0
<i>S3a_090</i>	2021-2040	SSP2-4.5	0	0,90	0
<i>S3a_011</i>	2021-2040	SSP2-4.5	0	0,10	1
<i>S3a_031</i>	2021-2040	SSP2-4.5	0	0,30	1
<i>S3a_051</i>	2021-2040	SSP2-4.5	0	0,50	1
<i>S3a_071</i>	2001-2020	SSP2-4.5	0	0,70	1
<i>S3a_091</i>	2021-2040	SSP2-4.5	0	0,90	1
<i>S3a_110</i>	2021-2040	SSP2-4.5	1	0,10	0
<i>S3a_130</i>	2021-2040	SSP2-4.5	1	0,30	0
<i>S3a_150</i>	2021-2040	SSP2-4.5	1	0,50	0
<i>S3a_170</i>	2021-2040	SSP2-4.5	1	0,70	0
<i>S3a_190</i>	2021-2040	SSP2-4.5	1	0,90	0
<i>S3a_111</i>	2021-2040	SSP2-4.5	1	0,10	1
<i>S3a_131</i>	2021-2040	SSP2-4.5	1	0,30	1

<b>S3a_151</b>	2021-2040	SSP2-4.5	1	0,50	1
<b>S3a_171</b>	2021-2040	SSP2-4.5	1	0,70	1
<b>S3a_191</b>	2021-2040	SSP2-4.5	1	0,90	1
<b>Série 3b</b>					
<b>S3b_010</b>	2021-2040	SSP3-7.0	0	0,10	0
<b>S3b_030</b>	2021-2040	SSP3-7.0	0	0,30	0
<b>S3b_050</b>	2021-2040	SSP3-7.0	0	0,50	0
<b>S3b_070</b>	2021-2040	SSP3-7.0	0	0,70	0
<b>S3b_090</b>	2021-2040	SSP3-7.0	0	0,90	0
<b>S3b_011</b>	2021-2040	SSP3-7.0	0	0,10	1
<b>S3b_031</b>	2021-2040	SSP3-7.0	0	0,30	1
<b>S3b_051</b>	2021-2040	SSP3-7.0	0	0,50	1
<b>S3b_071</b>	2001-2020	SSP3-7.0	0	0,70	1
<b>S3b_091</b>	2021-2040	SSP3-7.0	0	0,90	1
<b>S3b_110</b>	2021-2040	SSP3-7.0	1	0,10	0
<b>S3b_130</b>	2021-2040	SSP3-7.0	1	0,30	0
<b>S3b_150</b>	2021-2040	SSP3-7.0	1	0,50	0
<b>S3b_170</b>	2021-2040	SSP3-7.0	1	0,70	0
<b>S3b_190</b>	2021-2040	SSP3-7.0	1	0,90	0
<b>S3b_111</b>	2021-2040	SSP3-7.0	1	0,10	1
<b>S3b_131</b>	2021-2040	SSP3-7.0	1	0,30	1
<b>S3b_151</b>	2021-2040	SSP3-7.0	1	0,50	1
<b>S3b_171</b>	2021-2040	SSP3-7.0	1	0,70	1
<b>S3b_191</b>	2021-2040	SSP3-7.0	1	0,90	1
<b>Série 3c</b>					
<b>S3c_010</b>	2021-2040	SSP5-8.5	0	0,10	0
<b>S3c_030</b>	2021-2040	SSP5-8.5	0	0,30	0
<b>S3c_050</b>	2021-2040	SSP5-8.5	0	0,50	0
<b>S3c_070</b>	2021-2040	SSP5-8.5	0	0,70	0
<b>S3c_090</b>	2021-2040	SSP5-8.5	0	0,90	0
<b>S3c_011</b>	2021-2040	SSP5-8.5	0	0,10	1
<b>S3c_031</b>	2021-2040	SSP5-8.5	0	0,30	1
<b>S3c_051</b>	2021-2040	SSP5-8.5	0	0,50	1
<b>S3c_071</b>	2001-2020	SSP5-8.5	0	0,70	1
<b>S3c_091</b>	2021-2040	SSP5-8.5	0	0,90	1
<b>S3c_110</b>	2021-2040	SSP5-8.5	1	0,10	0
<b>S3c_130</b>	2021-2040	SSP5-8.5	1	0,30	0
<b>S3c_150</b>	2021-2040	SSP5-8.5	1	0,50	0
<b>S3c_170</b>	2021-2040	SSP5-8.5	1	0,70	0
<b>S3c_190</b>	2021-2040	SSP5-8.5	1	0,90	0
<b>S3c_111</b>	2021-2040	SSP5-8.5	1	0,10	1
<b>S3c_131</b>	2021-2040	SSP5-8.5	1	0,30	1
<b>S3c_151</b>	2021-2040	SSP5-8.5	1	0,50	1
<b>S3c_171</b>	2021-2040	SSP5-8.5	1	0,70	1
<b>S3c_191</b>	2021-2040	SSP5-8.5	1	0,90	1
<b>Série 5a</b>					

<i>S5a_010</i>	2041-2060	SSP2-4.5	0	0,10	0
<i>S5a_030</i>	2041-2060	SSP2-4.5	0	0,30	0
<i>S5a_050</i>	2041-2060	SSP2-4.5	0	0,50	0
<i>S5a_070</i>	2041-2060	SSP2-4.5	0	0,70	0
<i>S5a_090</i>	2041-2060	SSP2-4.5	0	0,90	0
<i>S5a_011</i>	2041-2060	SSP2-4.5	0	0,10	1
<i>S5a_031</i>	2041-2060	SSP2-4.5	0	0,30	1
<i>S5a_051</i>	2041-2060	SSP2-4.5	0	0,50	1
<i>S5a_071</i>	2041-2060	SSP2-4.5	0	0,70	1
<i>S5a_091</i>	2041-2060	SSP2-4.5	0	0,90	1
<i>S5a_110</i>	2041-2060	SSP2-4.5	1	0,10	0
<i>S5a_130</i>	2041-2060	SSP2-4.5	1	0,30	0
<i>S5a_150</i>	2041-2060	SSP2-4.5	1	0,50	0
<i>S5a_170</i>	2041-2060	SSP2-4.5	1	0,70	0
<i>S5a_190</i>	2041-2060	SSP2-4.5	1	0,90	0
<i>S5a_111</i>	2041-2060	SSP2-4.5	1	0,10	1
<i>S5a_131</i>	2041-2060	SSP2-4.5	1	0,30	1
<i>S5a_151</i>	2041-2060	SSP2-4.5	1	0,50	1
<i>S5a_171</i>	2041-2060	SSP2-4.5	1	0,70	1
<i>S5a_191</i>	2041-2060	SSP2-4.5	1	0,90	1
Série 5b					
<i>S5b_010</i>	2041-2060	SSP3-7.0	0	0,10	0
<i>S5b_030</i>	2041-2060	SSP3-7.0	0	0,30	0
<i>S5b_050</i>	2041-2060	SSP3-7.0	0	0,50	0
<i>S5b_070</i>	2041-2060	SSP3-7.0	0	0,70	0
<i>S5b_090</i>	2041-2060	SSP3-7.0	0	0,90	0
<i>S5b_011</i>	2041-2060	SSP3-7.0	0	0,10	1
<i>S5b_031</i>	2041-2060	SSP3-7.0	0	0,30	1
<i>S5b_051</i>	2041-2060	SSP3-7.0	0	0,50	1
<i>S5b_071</i>	2041-2060	SSP3-7.0	0	0,70	1
<i>S5b_091</i>	2041-2060	SSP3-7.0	0	0,90	1
<i>S5b_110</i>	2041-2060	SSP3-7.0	1	0,10	0
<i>S5b_130</i>	2041-2060	SSP3-7.0	1	0,30	0
<i>S5b_150</i>	2041-2060	SSP3-7.0	1	0,50	0
<i>S5b_170</i>	2041-2060	SSP3-7.0	1	0,70	0
<i>S5b_190</i>	2041-2060	SSP3-7.0	1	0,90	0
<i>S5b_111</i>	2041-2060	SSP3-7.0	1	0,10	1
<i>S5b_131</i>	2041-2060	SSP3-7.0	1	0,30	1
<i>S5b_151</i>	2041-2060	SSP3-7.0	1	0,50	1
<i>S5b_171</i>	2041-2060	SSP3-7.0	1	0,70	1
<i>S5b_191</i>	2041-2060	SSP3-7.0	1	0,90	1
Série 5c					
<i>S5c_010</i>	2041-2060	SSP5-8.5	0	0,10	0
<i>S5c_030</i>	2041-2060	SSP5-8.5	0	0,30	0
<i>S5c_050</i>	2041-2060	SSP5-8.5	0	0,50	0
<i>S5c_070</i>	2041-2060	SSP5-8.5	0	0,70	0

<b>S5c_090</b>	2041-2060	SSP5-8.5	0	0,90	0
<b>S5c_011</b>	2041-2060	SSP5-8.5	0	0,10	1
<b>S5c_031</b>	2041-2060	SSP5-8.5	0	0,30	1
<b>S5c_051</b>	2041-2060	SSP5-8.5	0	0,50	1
<b>S5c_071</b>	2041-2060	SSP5-8.5	0	0,70	1
<b>S5c_091</b>	2041-2060	SSP5-8.5	0	0,90	1
<b>S5c_110</b>	2041-2060	SSP5-8.5	1	0,10	0
<b>S5c_130</b>	2041-2060	SSP5-8.5	1	0,30	0
<b>S5c_150</b>	2041-2060	SSP5-8.5	1	0,50	0
<b>S5c_170</b>	2041-2060	SSP5-8.5	1	0,70	0
<b>S5c_190</b>	2041-2060	SSP5-8.5	1	0,90	0
<b>S5c_111</b>	2041-2060	SSP5-8.5	1	0,10	1
<b>S5c_131</b>	2041-2060	SSP5-8.5	1	0,30	1
<b>S5c_151</b>	2041-2060	SSP5-8.5	1	0,50	1
<b>S5c_171</b>	2041-2060	SSP5-8.5	1	0,70	1
<b>S5c_191</b>	2041-2060	SSP5-8.5	1	0,90	1
<b>Série 7a</b>					
<b>S7a_010</b>	2061-2080	SSP2-4.5	0	0,10	0
<b>S7a_030</b>	2061-2080	SSP2-4.5	0	0,30	0
<b>S7a_050</b>	2061-2080	SSP2-4.5	0	0,50	0
<b>S7a_070</b>	2061-2080	SSP2-4.5	0	0,70	0
<b>S7a_090</b>	2061-2080	SSP2-4.5	0	0,90	0
<b>S7a_011</b>	2061-2080	SSP2-4.5	0	0,10	1
<b>S7a_031</b>	2061-2080	SSP2-4.5	0	0,30	1
<b>S7a_051</b>	2061-2080	SSP2-4.5	0	0,50	1
<b>S7a_071</b>	2061-2080	SSP2-4.5	0	0,70	1
<b>S7a_091</b>	2061-2080	SSP2-4.5	0	0,90	1
<b>S7a_110</b>	2061-2080	SSP2-4.5	1	0,10	0
<b>S7a_130</b>	2061-2080	SSP2-4.5	1	0,30	0
<b>S7a_150</b>	2061-2080	SSP2-4.5	1	0,50	0
<b>S7a_170</b>	2061-2080	SSP2-4.5	1	0,70	0
<b>S7a_190</b>	2061-2080	SSP2-4.5	1	0,90	0
<b>S7a_111</b>	2061-2080	SSP2-4.5	1	0,10	1
<b>S7a_131</b>	2061-2080	SSP2-4.5	1	0,30	1
<b>S7a_151</b>	2061-2080	SSP2-4.5	1	0,50	1
<b>S7a_171</b>	2061-2080	SSP2-4.5	1	0,70	1
<b>S7a_191</b>	2061-2080	SSP2-4.5	1	0,90	1
<b>Série 7b</b>					
<b>S7b_010</b>	2061-2080	SSP3-7.0	0	0,10	0
<b>S7b_030</b>	2061-2080	SSP3-7.0	0	0,30	0
<b>S7b_050</b>	2061-2080	SSP3-7.0	0	0,50	0
<b>S7b_070</b>	2061-2080	SSP3-7.0	0	0,70	0
<b>S7b_090</b>	2061-2080	SSP3-7.0	0	0,90	0
<b>S7b_011</b>	2061-2080	SSP3-7.0	0	0,10	1
<b>S7b_031</b>	2061-2080	SSP3-7.0	0	0,30	1
<b>S7b_051</b>	2061-2080	SSP3-7.0	0	0,50	1

<b>S7b_071</b>	2061-2080	SSP3-7.0	0	0,70	1
<b>S7b_091</b>	2061-2080	SSP3-7.0	0	0,90	1
<b>S7b_110</b>	2061-2080	SSP3-7.0	1	0,10	0
<b>S7b_130</b>	2061-2080	SSP3-7.0	1	0,30	0
<b>S7b_150</b>	2061-2080	SSP3-7.0	1	0,50	0
<b>S7b_170</b>	2061-2080	SSP3-7.0	1	0,70	0
<b>S7b_190</b>	2061-2080	SSP3-7.0	1	0,90	0
<b>S7b_111</b>	2061-2080	SSP3-7.0	1	0,10	1
<b>S7b_131</b>	2061-2080	SSP3-7.0	1	0,30	1
<b>S7b_151</b>	2061-2080	SSP3-7.0	1	0,50	1
<b>S7b_171</b>	2061-2080	SSP3-7.0	1	0,70	1
<b>S7b_191</b>	2061-2080	SSP3-7.0	1	0,90	1
<b>Série 7c</b>					
<b>S7c_010</b>	2061-2080	SSP5-8.5	0	0,10	0
<b>S7c_030</b>	2061-2080	SSP5-8.5	0	0,30	0
<b>S7c_050</b>	2061-2080	SSP5-8.5	0	0,50	0
<b>S7c_070</b>	2061-2080	SSP5-8.5	0	0,70	0
<b>S7c_090</b>	2061-2080	SSP5-8.5	0	0,90	0
<b>S7c_011</b>	2061-2080	SSP5-8.5	0	0,10	1
<b>S7c_031</b>	2061-2080	SSP5-8.5	0	0,30	1
<b>S7c_051</b>	2061-2080	SSP5-8.5	0	0,50	1
<b>S7c_071</b>	2061-2080	SSP5-8.5	0	0,70	1
<b>S7c_091</b>	2061-2080	SSP5-8.5	0	0,90	1
<b>S7c_110</b>	2061-2080	SSP5-8.5	1	0,10	0
<b>S7c_130</b>	2061-2080	SSP5-8.5	1	0,30	0
<b>S7c_150</b>	2061-2080	SSP5-8.5	1	0,50	0
<b>S7c_170</b>	2061-2080	SSP5-8.5	1	0,70	0
<b>S7c_190</b>	2061-2080	SSP5-8.5	1	0,90	0
<b>S7c_111</b>	2061-2080	SSP5-8.5	1	0,10	1
<b>S7c_131</b>	2061-2080	SSP5-8.5	1	0,30	1
<b>S7c_151</b>	2061-2080	SSP5-8.5	1	0,50	1
<b>S7c_171</b>	2061-2080	SSP5-8.5	1	0,70	1
<b>S7c_191</b>	2061-2080	SSP5-8.5	1	0,90	1
<b>Série 9a</b>					
<b>S9a_010</b>	2081-2100	SSP2-4.5	0	0,10	0
<b>S9a_030</b>	2081-2100	SSP2-4.5	0	0,30	0
<b>S9a_050</b>	2081-2100	SSP2-4.5	0	0,50	0
<b>S9a_070</b>	2081-2100	SSP2-4.5	0	0,70	0
<b>S9a_090</b>	2081-2100	SSP2-4.5	0	0,90	0
<b>S9a_011</b>	2081-2100	SSP2-4.5	0	0,10	1
<b>S9a_031</b>	2081-2100	SSP2-4.5	0	0,30	1
<b>S9a_051</b>	2081-2100	SSP2-4.5	0	0,50	1
<b>S9a_071</b>	2081-2100	SSP2-4.5	0	0,70	1
<b>S9a_091</b>	2081-2100	SSP2-4.5	0	0,90	1
<b>S9a_110</b>	2081-2100	SSP2-4.5	1	0,10	0
<b>S9a_130</b>	2081-2100	SSP2-4.5	1	0,30	0

<b>S9a_150</b>	2081-2100	SSP2-4.5	1	0,50	0
<b>S9a_170</b>	2081-2100	SSP2-4.5	1	0,70	0
<b>S9a_190</b>	2081-2100	SSP2-4.5	1	0,90	0
<b>S9a_111</b>	2081-2100	SSP2-4.5	1	0,10	1
<b>S9a_131</b>	2081-2100	SSP2-4.5	1	0,30	1
<b>S9a_151</b>	2081-2100	SSP2-4.5	1	0,50	1
<b>S9a_171</b>	2081-2100	SSP2-4.5	1	0,70	1
<b>S9a_191</b>	2081-2100	SSP2-4.5	1	0,90	1
<b>Série 9b</b>					
<b>S9b_010</b>	2081-2100	SSP3-7.0	0	0,10	0
<b>S9b_030</b>	2081-2100	SSP3-7.0	0	0,30	0
<b>S9b_050</b>	2081-2100	SSP3-7.0	0	0,50	0
<b>S9b_070</b>	2081-2100	SSP3-7.0	0	0,70	0
<b>S9b_090</b>	2081-2100	SSP3-7.0	0	0,90	0
<b>S9b_011</b>	2081-2100	SSP3-7.0	0	0,10	1
<b>S9b_031</b>	2081-2100	SSP3-7.0	0	0,30	1
<b>S9b_051</b>	2081-2100	SSP3-7.0	0	0,50	1
<b>S9b_071</b>	2081-2100	SSP3-7.0	0	0,70	1
<b>S9b_091</b>	2081-2100	SSP3-7.0	0	0,90	1
<b>S9b_110</b>	2081-2100	SSP3-7.0	1	0,10	0
<b>S9b_130</b>	2081-2100	SSP3-7.0	1	0,30	0
<b>S9b_150</b>	2081-2100	SSP3-7.0	1	0,50	0
<b>S9b_170</b>	2081-2100	SSP3-7.0	1	0,70	0
<b>S9b_190</b>	2081-2100	SSP3-7.0	1	0,90	0
<b>S9b_111</b>	2081-2100	SSP3-7.0	1	0,10	1
<b>S9b_131</b>	2081-2100	SSP3-7.0	1	0,30	1
<b>S9b_151</b>	2081-2100	SSP3-7.0	1	0,50	1
<b>S9b_171</b>	2081-2100	SSP3-7.0	1	0,70	1
<b>S9b_191</b>	2081-2100	SSP3-7.0	1	0,90	1
<b>Série 9c</b>					
<b>S9c_010</b>	2081-2100	SSP5-8.5	0	0,10	0
<b>S9c_030</b>	2081-2100	SSP5-8.5	0	0,30	0
<b>S9c_050</b>	2081-2100	SSP5-8.5	0	0,50	0
<b>S9c_070</b>	2081-2100	SSP5-8.5	0	0,70	0
<b>S9c_090</b>	2081-2100	SSP5-8.5	0	0,90	0
<b>S9c_011</b>	2081-2100	SSP5-8.5	0	0,10	1
<b>S9c_031</b>	2081-2100	SSP5-8.5	0	0,30	1
<b>S9c_051</b>	2081-2100	SSP5-8.5	0	0,50	1
<b>S9c_071</b>	2081-2100	SSP5-8.5	0	0,70	1
<b>S9c_091</b>	2081-2100	SSP5-8.5	0	0,90	1
<b>S9c_110</b>	2081-2100	SSP5-8.5	1	0,10	0
<b>S9c_130</b>	2081-2100	SSP5-8.5	1	0,30	0
<b>S9c_150</b>	2081-2100	SSP5-8.5	1	0,50	0
<b>S9c_170</b>	2081-2100	SSP5-8.5	1	0,70	0
<b>S9c_190</b>	2081-2100	SSP5-8.5	1	0,90	0
<b>S9c_111</b>	2081-2100	SSP5-8.5	1	0,10	1

<b>S9c_131</b>	2081-2100	SSP5-8.5	1	0,30	1
<b>S9c_151</b>	2081-2100	SSP5-8.5	1	0,50	1
<b>S9c_171</b>	2081-2100	SSP5-8.5	1	0,70	1
<b>S9c_191</b>	2081-2100	SSP5-8.5	1	0,90	1

## Annexe II

Tableau 16 : températures opératives des zones du modèle initial pour la journée la plus chaude.

TOP SAM								
Heure	010	090	010*	090*	011	091	011*	091*
0	27,85	27,61	27,22	27,08	26,67	26,50	26,39	26,25
1	27,68	27,45	26,98	26,84	26,53	26,36	26,19	26,06
2	27,54	27,32	26,91	26,77	26,42	26,25	26,12	25,99
3	27,44	27,22	26,82	26,68	26,34	26,18	26,05	25,92
4	27,36	27,14	26,74	26,61	26,27	26,11	25,99	25,86
5	27,35	27,12	26,73	26,60	26,26	26,10	25,99	25,86
6	27,48	27,25	26,87	26,74	26,40	26,23	26,12	26,00
7	27,70	27,48	27,08	26,95	26,61	26,45	26,34	26,20
8	28,36	28,13	27,72	27,59	27,25	27,08	26,97	26,84
9	29,23	28,99	27,39	27,29	27,89	27,72	26,71	26,61
10	29,14	28,90	26,61	26,55	27,80	27,63	26,17	26,11
11	28,82	28,58	26,55	26,49	27,59	27,43	26,16	26,10
12	29,39	29,15	26,56	26,50	28,19	28,02	26,20	26,14
13	29,90	29,66	26,61	26,56	28,71	28,54	26,26	26,21
14	29,64	29,40	26,57	26,52	28,44	28,27	26,23	26,17
15	29,45	29,21	26,58	26,52	28,25	28,08	26,23	26,17
16	29,62	29,38	26,58	26,53	28,42	28,25	26,24	26,18
17	29,66	29,42	26,58	26,53	28,46	28,28	26,25	26,19
18	29,69	29,45	26,58	26,53	28,50	28,33	26,26	26,20
19	30,01	29,77	26,62	26,57	28,85	28,68	26,32	26,27
20	30,30	30,06	26,66	26,61	29,16	28,99	26,37	26,32
21	29,69	29,45	26,60	26,55	28,57	28,39	26,32	26,27
22	29,23	29,00	26,58	26,54	28,15	27,98	26,32	26,26
23	29,17	28,94	27,19	27,12	28,11	27,94	26,78	26,70
Minimum	27,35	27,12	26,55	26,49	26,26	26,10	25,99	25,86
Maximum	30,30	30,06	27,72	27,59	29,16	28,99	26,97	26,84
Moyenne	28,82	28,59	26,81	26,72	27,66	27,49	26,29	26,20
TOP Salon								
Heure	010	090	010*	090*	011	091	011*	091*
0	27,12	26,77	26,30	26,10	25,32	25,06	25,06	24,84
1	27,05	26,70	26,27	26,07	25,26	25,01	25,01	24,80
2	27,00	26,65	26,23	26,03	25,23	24,97	24,98	24,77
3	26,96	26,61	26,20	26,00	25,20	24,95	24,96	24,76
4	26,93	26,59	26,18	25,98	25,19	24,94	24,95	24,74
5	26,92	26,58	26,17	25,97	25,19	24,95	24,96	24,75
6	26,96	26,62	26,22	26,02	25,25	25,00	25,02	24,81
7	27,05	26,71	26,31	26,12	25,36	25,11	25,13	24,92
8	27,24	26,91	26,51	26,31	25,56	25,32	25,33	25,13
9	27,66	27,33	26,41	26,27	25,92	25,68	25,53	25,38
10	28,19	27,85	26,22	26,13	26,44	26,19	25,68	25,60

11	28,44	28,09	26,22	26,14	26,71	26,46	25,72	25,63
12	28,33	27,99	26,18	26,10	26,63	26,37	25,70	25,61
13	28,37	28,01	26,22	26,14	26,63	26,36	25,73	25,64
14	28,32	27,96	26,24	26,15	26,50	26,23	25,69	25,54
15	28,28	27,91	26,26	26,18	26,38	26,10	25,68	25,49
16	28,41	28,04	26,27	26,19	26,47	26,18	25,72	25,52
17	28,46	28,08	26,27	26,19	26,52	26,23	25,74	25,54
18	28,45	28,08	26,25	26,17	26,56	26,27	25,75	25,55
19	28,69	28,31	26,25	26,17	26,89	26,60	25,81	25,67
20	28,89	28,52	26,25	26,18	27,14	26,86	25,84	25,75
21	29,05	28,69	26,28	26,21	27,33	27,05	25,88	25,80
22	29,24	28,88	26,29	26,22	27,54	27,26	25,90	25,82
23	28,73	28,38	26,44	26,33	27,06	26,78	25,84	25,71
Minimum	26,92	26,58	26,17	25,97	25,19	24,94	24,95	24,74
Maximum	29,24	28,88	26,51	26,33	27,54	27,26	25,90	25,82
Moyenne	27,95	27,59	26,27	26,14	26,18	25,91	25,48	25,32
TOP Extension								
Heure	010	090	010*	090*	011	091	011*	091*
0	28,61	28,24	27,81	27,57	26,54	26,23	26,22	25,95
1	28,30	27,95	27,41	27,19	26,28	25,99	25,91	25,68
2	28,07	27,72	27,26	27,04	26,08	25,81	25,78	25,55
3	27,90	27,56	27,11	26,90	25,94	25,68	25,64	25,42
4	27,75	27,42	26,99	26,78	25,83	25,57	25,54	25,33
5	27,71	27,39	26,96	26,76	25,82	25,57	25,54	25,33
6	27,88	27,57	27,15	26,96	26,03	25,78	25,76	25,55
7	28,21	27,91	27,51	27,31	26,40	26,15	26,13	25,92
8	28,60	28,29	27,90	27,70	26,79	26,53	26,52	26,31
9	28,97	28,64	27,41	27,25	27,03	26,75	26,31	26,14
10	29,74	29,38	26,80	26,68	27,74	27,43	26,06	25,93
11	30,33	29,93	26,83	26,70	28,32	27,98	26,12	25,97
12	30,07	29,63	26,77	26,62	28,11	27,72	26,10	25,93
13	30,37	29,90	26,97	26,80	28,18	27,75	26,17	25,98
14	31,14	30,63	27,22	27,04	28,54	28,08	26,26	26,05
15	31,69	31,16	27,40	27,22	28,77	28,29	26,33	26,11
16	32,00	31,46	27,47	27,29	28,95	28,45	26,37	26,15
17	32,04	31,50	27,42	27,24	29,05	28,55	26,38	26,16
18	31,80	31,27	27,26	27,09	29,04	28,54	26,36	26,14
19	31,35	30,84	27,07	26,91	28,98	28,50	26,37	26,17
20	30,84	30,36	26,93	26,79	28,67	28,23	26,29	26,11
21	30,95	30,50	26,92	26,80	28,85	28,45	26,33	26,18
22	31,07	30,64	26,88	26,78	29,02	28,65	26,33	26,19
23	30,26	29,88	27,56	27,42	28,31	27,97	26,71	26,52
Minimum	27,71	27,39	26,77	26,62	25,82	25,57	25,54	25,33
Maximum	32,04	31,50	27,90	27,70	29,05	28,65	26,71	26,52
Moyenne	29,82	29,41	27,21	27,03	27,64	27,28	26,15	25,95
TOP Chambre 1								

Heure	010	090	010*	090*	011	091	011*	091*
0	29,76	29,13	26,97	26,80	28,16	27,66	26,55	26,36
1	29,64	29,03	26,95	26,79	27,80	27,46	26,54	26,37
2	29,56	28,97	26,93	26,78	27,44	27,18	26,54	26,37
3	29,48	28,91	26,91	26,76	27,24	26,95	26,53	26,37
4	29,41	28,86	26,89	26,75	27,03	26,77	26,53	26,37
5	29,38	28,84	26,87	26,74	27,10	26,84	26,52	26,37
6	29,46	28,93	26,86	26,73	27,57	27,30	26,52	26,38
7	30,25	29,72	27,21	27,08	28,67	28,31	26,89	26,75
8	31,03	30,49	27,27	27,14	29,48	29,08	26,96	26,82
9	30,90	30,34	27,14	27,01	29,10	28,68	26,70	26,56
10	30,45	29,88	27,02	26,89	28,68	28,24	26,64	26,49
11	30,44	29,86	26,97	26,82	28,82	28,37	26,63	26,48
12	30,51	29,90	26,96	26,81	28,94	28,47	26,65	26,49
13	30,64	30,01	26,98	26,82	29,10	28,61	26,68	26,51
14	30,80	30,16	27,01	26,85	29,28	28,77	26,71	26,54
15	30,98	30,32	27,04	26,87	29,46	28,93	26,74	26,56
16	31,11	30,43	27,06	26,89	29,60	29,05	26,77	26,59
17	31,67	30,98	27,13	26,95	30,16	29,59	26,84	26,66
18	32,11	31,40	27,15	26,98	30,60	30,02	26,88	26,69
19	31,65	30,95	27,10	26,93	30,20	29,62	26,84	26,66
20	31,21	30,52	27,06	26,90	29,80	29,23	26,82	26,64
21	31,04	30,38	27,04	26,88	29,68	29,12	26,81	26,64
22	30,89	30,25	27,02	26,87	29,55	29,01	26,80	26,63
23	30,98	30,36	27,04	26,90	29,57	29,14	26,82	26,67
Minimum	29,38	28,84	26,86	26,73	27,03	26,77	26,52	26,36
Maximum	32,11	31,40	27,27	27,14	30,60	30,02	26,96	26,82
Moyenne	30,56	29,94	27,02	26,87	28,88	28,43	26,70	26,54
TOP Chambre 2								
Heure	010	090	010*	090*	011	091	011*	091*
0	29,10	28,45	26,75	26,56	27,24	26,73	26,21	26,01
1	29,03	28,41	26,74	26,57	27,22	26,73	26,22	26,03
2	28,93	28,33	26,73	26,57	26,96	26,64	26,23	26,04
3	28,87	28,28	26,72	26,56	26,71	26,45	26,24	26,06
4	28,81	28,24	26,71	26,56	26,54	26,26	26,24	26,07
5	28,80	28,24	26,70	26,55	26,62	26,38	26,25	26,08
6	28,90	28,34	26,70	26,56	27,04	26,69	26,26	26,09
7	29,08	28,52	26,71	26,57	27,36	26,94	26,28	26,12
8	29,29	28,72	26,72	26,58	27,56	27,14	26,31	26,14
9	29,36	28,77	26,70	26,56	27,61	27,18	26,28	26,11
10	29,41	28,82	26,70	26,55	27,67	27,22	26,29	26,11
11	29,56	28,95	26,70	26,55	27,83	27,36	26,30	26,12
12	29,67	29,05	26,70	26,54	27,97	27,48	26,31	26,13
13	29,85	29,21	26,75	26,58	28,12	27,61	26,34	26,15
14	30,15	29,50	26,84	26,67	28,30	27,78	26,38	26,19
15	30,45	29,78	26,92	26,74	28,48	27,94	26,42	26,22

16	30,62	29,93	26,95	26,77	28,61	28,05	26,45	26,24
17	31,05	30,34	26,97	26,79	29,07	28,49	26,50	26,30
18	31,30	30,59	26,95	26,77	29,41	28,83	26,53	26,33
19	30,84	30,14	26,88	26,71	29,09	28,50	26,53	26,33
20	30,46	29,76	26,86	26,68	28,78	28,20	26,52	26,32
21	30,31	29,63	26,85	26,68	28,68	28,12	26,52	26,34
22	30,19	29,53	26,84	26,68	28,60	28,05	26,53	26,35
23	30,25	29,61	26,86	26,71	28,70	28,17	26,56	26,40
Minimum	28,80	28,24	26,70	26,54	26,54	26,26	26,21	26,01
Maximum	31,30	30,59	26,97	26,79	29,41	28,83	26,56	26,40
Moyenne	29,76	29,13	26,79	26,63	27,92	27,46	26,36	26,18
TOP Chambre 3								
Heure	010	090	010*	090*	011	091	011*	091*
0	29,46	28,84	26,88	26,71	27,84	27,35	26,45	26,26
1	29,41	28,81	26,87	26,71	27,65	27,31	26,45	26,27
2	29,30	28,72	26,85	26,70	27,34	27,06	26,45	26,28
3	29,24	28,67	26,84	26,69	27,14	26,85	26,45	26,28
4	29,18	28,62	26,82	26,68	26,95	26,69	26,44	26,29
5	29,16	28,61	26,81	26,67	27,02	26,75	26,44	26,29
6	29,23	28,69	26,80	26,66	27,45	27,13	26,44	26,29
7	29,70	29,15	26,97	26,84	28,14	27,75	26,62	26,48
8	30,02	29,47	26,99	26,86	28,46	28,05	26,66	26,52
9	29,98	29,41	26,93	26,80	28,30	27,89	26,53	26,39
10	29,91	29,34	26,88	26,74	28,25	27,83	26,52	26,37
11	29,98	29,39	26,86	26,72	28,40	27,96	26,53	26,37
12	30,09	29,49	26,87	26,72	28,55	28,09	26,55	26,39
13	30,23	29,61	26,89	26,74	28,71	28,23	26,58	26,42
14	30,38	29,75	26,92	26,76	28,87	28,38	26,61	26,44
15	30,53	29,89	26,94	26,78	29,03	28,52	26,64	26,47
16	30,64	29,99	26,96	26,80	29,15	28,62	26,67	26,49
17	31,11	30,44	27,02	26,85	29,62	29,08	26,73	26,55
18	31,45	30,76	27,04	26,87	29,97	29,41	26,76	26,58
19	31,06	30,38	27,00	26,84	29,62	29,06	26,74	26,56
20	30,73	30,07	26,98	26,82	29,33	28,78	26,73	26,56
21	30,62	29,97	26,97	26,82	29,24	28,71	26,72	26,56
22	30,49	29,86	26,96	26,81	29,14	28,62	26,72	26,56
23	30,57	29,96	26,97	26,83	29,24	28,73	26,74	26,59
Minimum	29,16	28,61	26,80	26,66	26,95	26,69	26,44	26,26
Maximum	31,45	30,76	27,04	26,87	29,97	29,41	26,76	26,59
Moyenne	30,10	29,50	26,92	26,77	28,48	28,04	26,59	26,43

## Annexe III

Tableau 17 : températures opératives des zones du modèle Q-ZEN pour la journée la plus chaude.

TOP SAM								
Heure	110	190	110*	190*	111	191	111*	191*
0	27,87	27,15	26,84	26,49	25,29	24,87	25,13	24,78
1	27,68	26,98	26,62	26,28	25,15	24,74	25,00	24,64
2	27,53	26,84	26,52	26,18	25,04	24,63	24,90	24,55
3	27,42	26,73	26,43	26,10	24,97	24,56	24,83	24,48
4	27,35	26,65	26,35	26,02	24,91	24,51	24,78	24,42
5	27,34	26,65	26,35	26,02	24,91	24,51	24,78	24,43
6	27,47	26,78	26,49	26,16	25,04	24,64	24,92	24,56
7	27,71	27,02	26,72	26,39	25,25	24,84	25,12	24,76
8	28,39	27,68	27,37	27,03	25,88	25,47	25,76	25,39
9	29,25	28,52	27,12	26,86	26,51	26,09	25,80	25,53
10	29,14	28,41	26,42	26,26	26,39	25,97	25,57	25,40
11	28,78	28,05	26,35	26,19	26,15	25,74	25,56	25,40
12	29,31	28,58	26,36	26,20	26,71	26,29	25,59	25,43
13	29,80	29,06	26,40	26,25	27,19	26,76	25,65	25,49
14	29,49	28,76	26,34	26,20	26,88	26,46	25,60	25,45
15	29,27	28,54	26,33	26,19	26,66	26,24	25,59	25,44
16	29,40	28,68	26,33	26,19	26,80	26,38	25,60	25,45
17	29,42	28,69	26,32	26,19	26,81	26,39	25,60	25,46
18	29,43	28,70	26,32	26,18	26,84	26,42	25,61	25,46
19	29,75	29,02	26,36	26,22	27,19	26,76	25,68	25,54
20	30,06	29,33	26,39	26,26	27,52	27,09	25,74	25,60
21	29,45	28,72	26,34	26,21	26,93	26,50	25,69	25,55
22	28,97	28,27	26,32	26,19	26,51	26,09	25,69	25,56
23	28,89	28,20	26,73	26,53	26,46	26,04	25,76	25,54
Minimum	27,34	26,65	26,32	26,02	24,91	24,51	24,78	24,42
Maximum	30,06	29,33	27,37	27,03	27,52	27,09	25,80	25,60
Moyenne	28,72	28,00	26,50	26,28	26,17	25,75	25,42	25,18
TOP Salon								
Heure	110	190	110*	190*	111	191	111*	191*
0	27,88	27,00	26,54	26,14	24,52	24,00	24,37	23,91
1	27,82	26,94	26,53	26,12	24,47	23,96	24,34	23,88
2	27,78	26,90	26,51	26,10	24,45	23,93	24,31	23,85
3	27,74	26,87	26,49	26,08	24,43	23,92	24,30	23,84
4	27,72	26,85	26,47	26,06	24,41	23,91	24,29	23,83
5	27,71	26,84	26,47	26,06	24,41	23,91	24,29	23,83
6	27,73	26,86	26,49	26,08	24,45	23,95	24,33	23,87
7	27,78	26,91	26,55	26,14	24,52	24,02	24,40	23,95
8	27,92	27,06	26,70	26,30	24,69	24,19	24,57	24,11
9	28,32	27,45	26,55	26,26	25,03	24,52	24,86	24,41
10	28,84	27,97	26,33	26,16	25,54	25,02	25,27	24,86

11	29,08	28,20	26,33	26,16	25,80	25,28	25,44	25,08
12	28,94	28,06	26,29	26,12	25,69	25,17	25,33	24,93
13	28,95	28,06	26,32	26,16	25,66	25,13	25,29	24,85
14	28,87	27,98	26,32	26,16	25,50	24,96	25,09	24,66
15	28,78	27,89	26,34	26,19	25,34	24,80	24,89	24,46
16	28,88	27,99	26,35	26,19	25,40	24,85	24,91	24,48
17	28,92	28,02	26,34	26,19	25,44	24,89	24,92	24,49
18	28,90	28,00	26,31	26,16	25,47	24,91	24,92	24,50
19	29,15	28,25	26,32	26,17	25,80	25,25	25,25	24,82
20	29,38	28,48	26,31	26,17	26,08	25,53	25,53	25,11
21	29,57	28,67	26,34	26,20	26,30	25,75	25,58	25,28
22	29,76	28,87	26,35	26,21	26,52	25,97	25,62	25,45
23	29,25	28,37	26,49	26,27	26,03	25,49	25,35	25,06
Minimum	27,71	26,84	26,29	26,06	24,41	23,91	24,29	23,83
Maximum	29,76	28,87	26,70	26,30	26,52	25,97	25,62	25,45
Moyenne	28,57	27,69	26,42	26,16	25,25	24,72	24,89	24,48
TOP Extension								
Heure	110	190	110*	190*	111	191	111*	191*
0	29,16	28,46	27,94	27,59	25,96	25,48	25,71	25,30
1	28,86	28,17	27,57	27,24	25,73	25,27	25,46	25,08
2	28,65	27,96	27,43	27,10	25,56	25,11	25,32	24,95
3	28,50	27,82	27,30	26,97	25,43	25,00	25,21	24,85
4	28,38	27,70	27,20	26,87	25,32	24,90	25,11	24,76
5	28,34	27,68	27,18	26,86	25,32	24,90	25,11	24,77
6	28,50	27,84	27,36	27,04	25,53	25,11	25,32	24,97
7	28,80	28,16	27,70	27,39	25,87	25,45	25,67	25,31
8	29,17	28,53	28,09	27,76	26,23	25,80	26,03	25,67
9	29,54	28,87	27,55	27,29	26,45	26,00	25,95	25,67
10	30,31	29,61	26,88	26,71	27,15	26,67	25,84	25,64
11	30,90	30,15	26,90	26,72	27,74	27,22	25,90	25,69
12	30,62	29,83	26,83	26,64	27,50	26,94	25,88	25,65
13	30,92	30,10	27,04	26,83	27,55	26,95	25,95	25,70
14	31,66	30,81	27,27	27,05	27,89	27,25	26,02	25,76
15	32,15	31,27	27,43	27,20	28,09	27,42	26,08	25,80
16	32,42	31,53	27,47	27,25	28,24	27,56	26,12	25,83
17	32,43	31,54	27,41	27,19	28,32	27,64	26,12	25,83
18	32,17	31,29	27,25	27,04	28,30	27,62	26,10	25,82
19	31,71	30,86	27,06	26,86	28,24	27,59	26,12	25,85
20	31,22	30,40	26,92	26,74	27,95	27,34	26,05	25,80
21	31,36	30,57	26,92	26,77	28,16	27,58	26,10	25,88
22	31,51	30,75	26,89	26,75	28,36	27,81	26,11	25,91
23	30,70	29,99	27,56	27,35	27,66	27,14	26,35	26,06
Minimum	28,34	27,68	26,83	26,64	25,32	24,90	25,11	24,76
Maximum	32,43	31,54	28,09	27,76	28,36	27,81	26,35	26,06
Moyenne	30,33	29,58	27,30	27,05	27,02	26,49	25,82	25,52
TOP Chambre 1								

Heure	110	190	110*	190*	111	191	111*	191*
0	29,36	28,04	26,64	26,33	26,07	25,21	25,72	25,18
1	29,25	27,95	26,62	26,33	25,99	25,15	25,73	25,12
2	29,16	27,89	26,61	26,33	25,95	25,12	25,73	25,09
3	29,09	27,85	26,59	26,32	25,91	25,10	25,74	25,07
4	29,03	27,80	26,58	26,32	25,81	25,09	25,71	25,06
5	29,01	27,80	26,57	26,31	25,82	25,11	25,72	25,08
6	29,09	27,89	26,57	26,32	25,99	25,21	25,77	25,18
7	29,88	28,67	26,91	26,67	26,77	26,00	26,15	25,72
8	30,65	29,42	26,97	26,74	27,53	26,74	26,24	25,92
9	30,49	29,23	26,84	26,61	27,09	26,29	25,98	25,66
10	30,01	28,75	26,72	26,48	26,64	25,82	25,91	25,60
11	29,95	28,68	26,65	26,40	26,72	25,89	25,89	25,58
12	29,95	28,66	26,62	26,37	26,78	25,93	25,89	25,58
13	30,02	28,71	26,62	26,36	26,87	26,00	25,91	25,59
14	30,12	28,79	26,63	26,37	26,99	26,09	25,93	25,61
15	30,24	28,89	26,65	26,37	27,11	26,18	25,95	25,62
16	30,32	28,96	26,66	26,38	27,20	26,26	25,97	25,64
17	30,85	29,47	26,72	26,44	27,72	26,76	26,05	25,71
18	31,27	29,87	26,74	26,46	28,14	27,17	26,09	25,75
19	30,81	29,41	26,68	26,41	27,73	26,76	26,05	25,72
20	30,36	28,98	26,64	26,38	27,34	26,37	26,03	25,70
21	30,19	28,83	26,62	26,36	27,21	26,26	26,02	25,70
22	30,02	28,70	26,60	26,35	27,08	26,15	26,01	25,70
23	30,11	28,81	26,62	26,38	27,20	26,28	26,05	25,75
Minimum	29,01	27,80	26,57	26,31	25,81	25,09	25,71	25,06
Maximum	31,27	29,87	26,97	26,74	28,14	27,17	26,24	25,92
Moyenne	29,97	28,67	26,67	26,41	26,82	25,96	25,93	25,51
TOP Chambre 2								
Heure	110	190	110*	190*	111	191	111*	191*
0	29,25	27,91	26,59	26,28	25,64	24,78	25,55	24,75
1	29,16	27,85	26,57	26,28	25,61	24,77	25,48	24,73
2	29,04	27,76	26,56	26,27	25,54	24,70	25,42	24,67
3	28,96	27,70	26,54	26,27	25,50	24,68	25,39	24,64
4	28,89	27,64	26,53	26,26	25,46	24,66	25,36	24,62
5	28,87	27,63	26,52	26,26	25,47	24,67	25,37	24,64
6	28,95	27,73	26,52	26,27	25,57	24,78	25,47	24,75
7	29,13	27,90	26,53	26,28	25,74	24,95	25,60	24,92
8	29,34	28,08	26,55	26,30	25,94	25,14	25,68	25,10
9	29,38	28,11	26,53	26,28	25,96	25,15	25,66	25,11
10	29,42	28,14	26,53	26,28	25,99	25,17	25,68	25,13
11	29,55	28,26	26,54	26,28	26,13	25,29	25,70	25,25
12	29,65	28,34	26,54	26,27	26,26	25,40	25,72	25,35
13	29,82	28,49	26,58	26,32	26,39	25,51	25,75	25,43
14	30,10	28,75	26,67	26,40	26,55	25,65	25,79	25,47
15	30,37	29,00	26,74	26,46	26,71	25,78	25,83	25,50

16	30,52	29,13	26,76	26,48	26,81	25,87	25,86	25,52
17	30,92	29,52	26,78	26,50	27,25	26,29	25,91	25,57
18	31,15	29,74	26,74	26,47	27,56	26,59	25,94	25,60
19	30,67	29,26	26,66	26,39	27,21	26,24	25,92	25,58
20	30,25	28,86	26,62	26,35	26,89	25,92	25,90	25,57
21	30,09	28,72	26,60	26,33	26,78	25,82	25,89	25,55
22	29,93	28,58	26,58	26,32	26,67	25,73	25,89	25,50
23	29,97	28,64	26,59	26,34	26,74	25,81	25,91	25,56
Minimum	28,87	27,63	26,52	26,26	25,46	24,66	25,36	24,62
Maximum	31,15	29,74	26,78	26,50	27,56	26,59	25,94	25,60
Moyenne	29,72	28,41	26,60	26,33	26,27	25,39	25,69	25,19
TOP Chambre 3								
Heure	110	190	110*	190*	111	191	111*	191*
0	29,06	27,70	26,56	26,24	25,67	24,81	25,58	24,79
1	29,00	27,66	26,55	26,24	25,66	24,81	25,53	24,77
2	28,89	27,57	26,54	26,24	25,58	24,74	25,47	24,71
3	28,82	27,52	26,53	26,23	25,54	24,72	25,44	24,69
4	28,75	27,48	26,52	26,23	25,51	24,69	25,41	24,67
5	28,74	27,48	26,51	26,23	25,52	24,71	25,42	24,68
6	28,82	27,56	26,50	26,23	25,60	24,80	25,51	24,77
7	29,29	28,02	26,68	26,41	26,06	25,26	25,79	25,24
8	29,61	28,32	26,70	26,44	26,37	25,56	25,86	25,51
9	29,54	28,24	26,64	26,37	26,18	25,35	25,74	25,31
10	29,43	28,13	26,58	26,31	26,09	25,25	25,72	25,23
11	29,46	28,13	26,55	26,27	26,18	25,34	25,72	25,30
12	29,51	28,18	26,54	26,26	26,27	25,40	25,73	25,37
13	29,59	28,24	26,54	26,26	26,36	25,48	25,75	25,42
14	29,69	28,31	26,55	26,26	26,47	25,56	25,77	25,44
15	29,78	28,40	26,56	26,27	26,57	25,65	25,78	25,46
16	29,85	28,45	26,57	26,27	26,64	25,70	25,80	25,47
17	30,29	28,87	26,62	26,32	27,08	26,12	25,86	25,53
18	30,60	29,17	26,63	26,34	27,40	26,43	25,89	25,56
19	30,20	28,77	26,59	26,30	27,03	26,06	25,87	25,54
20	29,85	28,45	26,57	26,29	26,73	25,77	25,86	25,54
21	29,72	28,34	26,55	26,28	26,63	25,68	25,86	25,49
22	29,58	28,22	26,54	26,27	26,52	25,59	25,85	25,42
23	29,65	28,31	26,56	26,30	26,62	25,69	25,88	25,50
Minimum	28,74	27,48	26,50	26,23	25,51	24,69	25,41	24,67
Maximum	30,60	29,17	26,70	26,44	27,40	26,43	25,89	25,56
Moyenne	29,49	28,15	26,57	26,29	26,26	25,38	25,71	25,22

## Annexe IV

Tableau 18 : degrés-heures de surchauffe avec un seuil de 26°C.

ID	S1	S3a	S3b	S3c	S5a	S5b	S5c	S7a	S7b	S7c	S9a	S9b	S9c
Modèle initial													
010	0	307	37	11	424	1420	1838	806	1779	1587	1998	4210	11 397
090	0	136	14	3	163	778	1111	527	1054	840	1157	2738	8257
010*	0	85	3	4	128	472	620	218	604	523	683	1337	3 338
090*	0	27	1	1	32	234	353	138	326	256	367	815	2 289
011	0	15	0	0	15	31	65	182	115	20	65	354	2 072
091	0	4	0	0	4	9	23	105	50	3	23	182	1 570
011*	0	1	0	0	1	4	10	59	29	1	10	105	534
091*	0	0	0	0	0	0	1	30	11	0	1	43	352
Modèle Q-ZEN													
110	0	230	96	67	654	2518	3400	1044	3768	3873	3591	8041	22 019
190	0	63	20	13	97	699	1112	262	1151	1060	1163	2778	11 810
110*	0	59	22	27	175	597	814	219	898	901	859	1663	4 217
190*	0	17	2	5	27	143	225	46	226	235	235	536	1 909
111	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	3	549
191	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	221
111*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36
191*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3

## Annexe V

Tableau 19 : degrés-heures de surchauffe avec un seuil de 26°C.

ID	S1	S3a	S3b	S3c	S5a	S5b	S5c	S7a	S7b	S7c	S9a	S9b	S9c
Modèle initial													
010	46	4243	4090	3208	7777	12 156	14 197	9052	17 508	19 043	15 265	28 328	46 273
090	32	3198	2639	1783	5942	9653	11058	6586	13865	15134	12078	23681	40530
010*	46	3816	3944	3161	7136	10 553	12 361	8028	15 440	17 072	13 229	23 828	35 697
090*	32	2925	2561	1766	5549	8571	9783	5873	12 446	13 855	10 693	20 381	32 082
011	0	1217	465	252	1653	3124	3471	2355	4370	4120	3760	8544	17 220
091	0	912	262	98	1162	2376	2707	1795	3345	3069	2914	7023	14 642
011*	0	1153	460	252	1587	2984	3281	2102	4094	3990	3566	7879	14 760
091*	0	882	261	98	1128	2297	2585	1615	3165	2994	2791	6561	12 644
Modèle Q-ZEN													
110	44	7698	8555	7607	11606	19092	22953	16440	28987	32395	24270	43104	64364
190	21	3377	3463	2442	6067	11 347	14 037	8203	17 876	21 052	15 092	31 560	50 078
110*	44	6939	8090	7350	10 273	15 665	18 759	14 171	23 709	26 966	19 713	33 052	43 074
190*	21	3141	3338	2399	5613	9775	12 116	7336	15 357	18 531	13 059	26 224	36 176
111	0	411	82	23	544	1379	1618	1119	1914	1605	1685	4293	10 785
191	0	147	25	1	185	627	849	565	973	743	867	2533	7024
111*	0	406	82	23	538	1354	1577	1050	1826	1595	1643	4136	9389
191*	0	147	25	1	185	622	838	545	944	742	856	2493	6216