

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Évaluation de la résilience thermique et de l'efficacité énergétique dans un établissement de soins en Wallonie

Auteur : Safi, Taha Osman

Promoteur(s) : Attia, Shady

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

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

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/17730>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées

Évaluation de la résilience thermique et de l'efficacité énergétique dans un établissement de soins en Wallonie

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du
grade de master Ingénieur Civil Architecte par
SAFI, Taha Osman

Promoteur: Prof. ATTIA Shady - SBD Lab

Jury: Prof. ANDRE Philippe
Prof. REITER Sigrid
Dr. AMER Mohammad
Dr. AMARIPADATH Deepak

Année académique 2022-2023

Remerciements

Je souhaite commencer par exprimer ma gratitude envers tous mes professeurs pour la qualité de leur enseignement tout au long de mon master. Je tiens particulièrement à remercier mon directeur de recherche, le Prof. Shady Attia, pour son attention portée à ma thèse, son soutien constant et pour m'avoir donné l'opportunité de rejoindre son équipe en tant que stagiaire il y a 6 ans. Je suis également reconnaissant envers lui pour son aide précieuse lors de la révision de ma thèse.

Un grand merci à Mr. Ramin Rahif, Dr. Mohammad Amer et Dr. Deepak Amaripadath pour leur soutien inestimable tout au long de mon projet. Je tiens également à exprimer ma gratitude envers MK Engineering pour m'avoir offert la chance de travailler sur un projet d'une telle importance.

J'aimerais également exprimer ma reconnaissance envers les lecteurs Dr. Philippe Andre et Dr. Sigrid Reiter pour avoir accepté de lire mon travail et pour leur intérêt constant pour le sujet de mon projet.

Ma famille mérite une mention spéciale de remerciement, en particulier ma femme Bayan, qui a fait preuve d'une grande patience envers mes nombreuses nuits passées devant mon écran. Je remercie également mon frère Ayman pour son soutien inconditionnel tout au long de ma vie universitaire.

Ensuite, je souhaite exprimer ma gratitude envers tous les bureaux qui m'ont accueilli en tant que stagiaire à Liège, ainsi que pour les informations précieuses qu'ils m'ont transmises.

Enfin, je tiens à adresser mes remerciements au service des ressources humaines de l'Université de Liège, et plus particulièrement à Mme Nadine Vandermeulen, pour les offres d'emploi qu'elle m'a généreusement proposées tout au long de mes années universitaires.

Abstract

Le changement climatique croissant et l'augmentation des canicules annuelles en Europe ont suscité de vives inquiétudes quant à la surchauffe des bâtiments et à ses conséquences sur les individus, en particulier les personnes âgées.

Les températures record observées ces dernières années ont mis en évidence la nécessité d'adapter nos infrastructures pour faire face à ces conditions extrêmes. Les bâtiments, en particulier les logements et les établissements de soins pour personnes âgées, peuvent devenir de véritables pièges de chaleur pendant les périodes de canicule, mettant ainsi en danger la santé et le bien-être des résidents.

Cette étude évalue le confort thermique, la résilience estivale et la consommation énergétique d'une maison de soins à consommation d'énergie quasi nulle située à Kain en Wallonie suite. Elle prend en compte différents scénarios météorologiques extrêmes tels que MAR BCC 2019, SSP8.5 2047 et SSP8.5 2098. Les objectifs spécifiques de l'étude comprennent l'évaluation du confort thermique des occupants en utilisant le modèle PMV/PPD, ainsi que l'utilisation des indices tels que le Degré de Chaleur Ambiant (AWD), le Degré de Surchauffe Intérieure (IOhD) et la Résistance à la Surchauffe due au Changement Climatique (CCOR).

Les résultats indiquent une surconsommation d'énergie du bâtiment environ 8 fois supérieure à la prévision, ce qui rend difficile la gestion des périodes de chaleur. Lors de la canicule de 2019, le système de refroidissement n'a pas pu assurer un confort thermique adéquat, entraînant une défaillance du bâtiment. Les scénarios futurs prévoient une défaillance encore plus grave en raison de températures intérieures extrêmement élevées, tandis que la consommation énergétique a diminué en raison de besoins réduits en chauffage. Les températures dans les chambres sud peuvent dépasser 28°C en juin 2019 et pourraient atteindre 34°C en juin 2098.

Les résultats de l'étude proposée mettent en évidence la nécessité d'une amélioration du cadre législatif actuel de la Région wallonne en ce qui concerne les établissements de soins. Il est clair que des mesures doivent être prises pour intégrer un ensemble d'indicateurs à long terme permettant d'évaluer efficacement la surchauffe intérieure et le confort des occupants. De plus, il est impératif d'adapter les modèles énergétiques en utilisant des données climatiques réelles, y compris des conditions extrêmes, afin d'obtenir des estimations plus précises, plutôt que de se fier à des données statiques qui peuvent être moins représentatives de la réalité.

Mots-clés :

- Établissements de soins
- Maisons passives
- Simulation énergétique des bâtiments (BES)
- Confort thermique
- Résilience thermique
- Performance énergétique
- Scénarios climatiques futurs
- Événement de chaleur extrême

Sommaire

La crise énergétique mondiale et l'exploitation croissante des ressources naturelles ont exacerbé la nécessité de concevoir des bâtiments moins énergivores. Les maisons passives se sont rapidement imposées comme une solution à ce problème en devenant les bâtiments les plus économes en énergie grâce à leur excellente isolation. Cependant, avec le réchauffement climatique et les changements climatiques en cours, certains pays européens connaissent des vagues de chaleur et des sécheresses auxquelles on ne s'attendait pas auparavant. Les maisons passives deviennent vulnérables, et la question de l'isolation excessive se tourne désormais vers l'environnement intérieur des bâtiments en raison de la température intérieure élevée qui dépasse largement les niveaux de confort thermique. Cette situation constitue une menace pour les maisons de repos, et les personnes âgées sont les plus touchées par cette augmentation de la température.

Ce projet se concentre sur l'étude d'une maison de repos de 8000m² située à Kain en Wallonie, mettant l'accent sur un bâtiment passif. L'étude évalue le confort thermique et la résilience du bâtiment face aux vagues de chaleur les plus importantes, tout en comparant la consommation réelle à la consommation attendue dans de telles conditions.

Pour mener cette étude, plusieurs recherches connexes ont été examinées dans ce domaine, se concentrant sur l'impact des vagues de chaleur sur les bâtiments résidentiels à long terme et à court terme en utilisant des indicateurs modernes. Certaines de ces études ont montré que, malgré l'optimisation des stratégies de conception passive, le bâtiment ne pourrait pas éviter la surchauffe pendant les vagues de chaleur extrêmes. D'autres études ont souligné que l'efficacité énergétique n'est pas uniformément bénéfique pour la résilience. Il est important de noter qu'en Europe, notamment en Belgique, il existe un manque d'études spécifiquement axées sur les maisons de repos. La plupart des recherches se concentrent sur de petits bâtiments résidentiels dotés de systèmes mécaniques simplifiés. Il convient de souligner que les risques augmentent avec la taille des bâtiments.

La méthodologie utilisée dans cette étude repose sur l'évaluation du confort thermique des occupants en utilisant le modèle PMV/PPD (Predicted Mean Vote/Percentage of People Dissatisfied). Trois indicateurs sont particulièrement mis en avant dans cette étude : l'IOhD (Indoor Overheating Degree), le CCORF (Climate change overheating resistivity) et l'AWD (Ambient Warmness Degree). Ces indicateurs sont approuvés par l'IEA (International Energy Agency) et sont déjà utilisés en Belgique.

Dans le cadre de cette étude, une attention particulière a été accordée aux scénarios climatiques les plus sévères, en examinant l'effet des vagues de chaleur à court et à long terme. Trois scénarios climatiques ont été pris en compte (MAR BCC 2019, SSP8.5 2047 et SSP8.5 2098).

Afin d'évaluer le niveau de confort à l'intérieur du bâtiment, des mesures précises ont été effectuées à l'aide de l'appareil Testo 400. Installé à l'intérieur d'une pièce pendant la période estivale, cet appareil a permis de recueillir des données essentielles relatives à la température, à l'humidité et à la vitesse de l'air.

Le bâtiment a été modélisé à l'aide du logiciel Design Builder et simulé dans EnergyPlus, puis calibré en se basant sur les valeurs recommandées par les normes ASHRAE 55 et ASHRAE Guideline 14 - NMBE et CV(RMSE).

Les résultats de l'étude montrent que le bâtiment dépasse déjà toutes les catégories de confort, avec une température intérieure atteignant 27°C en juin 2019. Cela indique que le système de refroidissement n'est pas adapté au confort thermique requis. Par conséquent, la consommation d'électricité réelle est environ 8 fois supérieure à la consommation attendue pour une maison passive, et la consommation de gaz est 5 fois supérieure. Cela est principalement dû à des problèmes de conception dans l'enveloppe du bâtiment et des problèmes dans le système de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC).

Les scénarios futurs prévoient une aggravation des problèmes en raison de températures intérieures extrêmement élevées et ont révélé que les niveaux de confort thermique dépasseront les exigences de confort thermique pour le bâtiment de catégorie I au fil du temps. Toutefois, la consommation énergétique devrait diminuer en raison de la réduction des besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire grâce à l'utilisation de panneaux solaires.

Le bâtiment présente des gains internes très élevés, ce qui entraîne des charges de refroidissement et de chauffage également élevées. Ces charges sont principalement dues à deux raisons. Tout d'abord, la température de consigne est maintenue très basse (24°C) et cela s'applique à la plupart des zones accessibles aux personnes âgées dans le bâtiment. Deuxièmement, le bâtiment abrite des activités nécessitant une quantité importante de refroidissement, telles que des salles de conservation des aliments.

Dans les scénarios à court terme, il a été constaté que les chambres destinées aux personnes âgées situées sur la façade sud sont les plus touchées par les vagues de chaleur de courte durée. En effet, les températures internes de ces chambres peuvent dépasser les 28°C le 26 juin 2019 et devraient atteindre 34 °C à la fin de juin 2098.

Les résultats de cette étude mettent en évidence la nécessité d'améliorer le cadre législatif actuel en Région wallonne concernant les établissements de soins. Il est clair que des mesures doivent être prises pour intégrer un ensemble d'indicateurs à long terme permettant d'évaluer efficacement la surchauffe intérieure et le confort des occupants. De plus, il est impératif d'adapter les modèles énergétiques en utilisant des données climatiques réelles, y compris des conditions extrêmes, afin d'obtenir des estimations plus précises, plutôt que de se fier à des données statiques qui peuvent ne pas représenter fidèlement la réalité.

Les recherches futures visent à mieux comprendre la perception du confort et la qualité de l'air intérieur. Cela inclut l'exploration des facteurs subjectifs du confort thermique et des préférences individuelles, ainsi qu'une analyse approfondie des paramètres de la qualité de l'air tels que les niveaux de polluants, l'humidité, la ventilation et la qualité microbiologique. Ces études contribueront à améliorer le bien-être des occupants en créant des environnements intérieurs plus sains et en répondant aux besoins individuels en matière de confort.

Abréviations/Acronymes

SBD Lab	Sustainable Building Design Laboratory
EPBD	Indicateur de surchauffe Passive House
AWD	Indicateur de degré de chaleur ambiante
IOD	Indicateur de surchauffe intérieure
SET	Standard Effective Temperature
HI	Indice de chaleur
WBGT	Température de globe mouillé
RH	Humidité relative
T	Température de l'air
ZEH	Maison à énergie nette zéro
SOC	Etat de charge
BT	Batterie de stockage d'énergie
SOC0	Etat de charge initial de la batterie
Bcha	Energie chargée dans la batterie
rBT	Efficacité de charge-décharge de la batterie
Bdis	Energie déchargée de la batterie
RC	Capacité réelle de la batterie
PPD	Pourcentage prévu d'insatisfaits
PMV	Vote Moyen Prévu
CLO	Isolation thermique des vêtements
TS0	Composante stable de la sensation thermique
ΔTS	Composante transitoire de la sensation thermique
TS	prédiction de la sensation thermique
CVC	Systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation
HVAC	Systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation
IOcD	Degré de refroidissement intérieur
IOhD	Degré de surchauffe intérieure
LCA	Cycle de vie
OMM	Organisation météorologique mondiale
SSP	Scénarios socio-économiques

EHPAD	Etablissement d'Hébergement pour Personnes Âgées Dépendantes
DOE	Département d'Energie
CTA	Centrale de traitement d'air
VAV	Volume d'air variable
TMY	Année météorologique type
AMY	Année météorologique réelle
PAC	Pompe à chaleur
PV	Panneaux photovoltaïque
CWASS	Code wallon de l'Action sociale et de la Santé
MAR	Modèle Atmosphérique Régional
LEED	Leadership dans l'Énergie et l'Environnement pour le Développement Durable
ASHRAE	Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation
CCOV	Changement climatique Surchauffe Résistivité
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
PEB	Performance Énergétique des Bâtiments
PHPP	Pack de conception de la maison passive
MBE	Indices d'erreur de biais moyen
BESs	Simulations énergétiques des bâtiments
CV (RMSE)	Coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne

CONTENTS

Abréviations/Acronymes	6
Liste des figures.....	10
Liste des tableaux	12
1 Introduction	13
1.1 Contexte et problématique.....	13
1.2 Pertinence du sujet de recherche	13
1.3 Objectifs de recherche.....	15
1.4 Questions de recherche.....	16
2 Revue de littérature/théorie.....	17
2.1 La surchauffe dans les bâtiments	17
2.2 Les pannes de courant face au confort thermique	20
2.3 La sensibilité au confort thermique chez les personnes âgées	24
2.4 L'efficacité énergétique.....	26
2.5 Les impacts du changement climatique	27
3 Méthodologie.....	31
3.1 Description du cas d'étude.....	34
3.1.1 Caractéristique du bâtiment	34
3.1.2 Zonages.....	36
3.1.3 Spécification CVC	37
3.2 Opérationnalisation : variables, indicateurs.....	41
3.2.1 Variables.....	42
3.3 Collecte des données	47
3.3.1 Visite de bâtiment.....	47
3.3.2 Base de données	47
3.3.3 Entretiens	48
3.4 Analyse des données	49
3.4.1 DesignBuilder	49
3.4.2 Grasshopper.....	50
3.4.3 Fiches techniques	52
3.5 Conditions aux limites.....	52
4 Résultats.....	53
4.1 Modèle de référence.....	53
4.1.1 Base de données du bâtiment.....	54
4.1.2 Caractéristiques énergétiques du bâtiment.....	54
4.1.3 Intensité de consommation énergétique	55
4.1.4 Intensité de la charge branchée	57
4.1.5 Consommation de la cuisine et de l'eau chaude sanitaire.....	58
4.1.6 Système de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) et température de consigne	58
4.1.7 Occupation	59
4.1.8 La calibration du modèle numérique	60
4.1.9 Confort thermique.....	62
4.2 Scénarios	66
4.2.1 conditions météorologiques.....	66

4.2.2	Analyse du confort thermique lors de périodes de canicule	69
4.2.3	Bilan thermique.....	75
4.2.4	Bilan énergétique	77
5	Discussion.....	81
5.1	Réaffirmation de l'objectif de l'étude	81
5.2	Résultats et recommandations	81
5.2.1	Observations et constatations :.....	81
5.2.2	Orientations	83
5.3	Points forts et limites.....	84
5.3.1	Force	84
5.3.2	Contraintes	85
5.4	Implications sur la pratique et les travaux futurs	85
5.4.1	Implications sur la pratique.....	85
5.4.2	Perspectives pour les travaux futurs	86
6	Conclusion.....	87
6.1	Établir des conclusions	87
6.2	Recommandations.....	87
6.3	Suggestions pour de futures recherches.....	88
7	Références.....	89
8	Poster.....	95
9	Annexe	96
9.1	Rapport PHPP.....	96
9.2	Facture d'énergie.....	98
9.3	Carte mécanique générale.....	99
9.4	System de CVC - Design Builder.....	100
9.5	Résultat de simulation - Design Builder	101

Liste des figures

Figure 1-1 Trois des objectifs de développement durable des Nations Unies, Nations Unies (2015)	15
Figure 1-2 Quad Chard	16
Figure 2-1 La distribution horaire du SET. Sheng et al. (2023)	19
Figure 2-2 La distribution horaire de l'indice de chaleur HI. Sheng et al. (2023).....	19
Figure 2-3 La température opérationnelle intérieure pour différentes zones pendant les trois scénarios de canicule pour la solution la plus économe en énergie avec le plus grand niveau d'inconfort. Rahif et al. (2023).....	20
Figure 2-4 Diagramme en boîte de l'indice de chaleur horaire pour toutes les chambres des patients. Sun et al. (2021).....	21
Figure 2-5 Distribution de l'occurrence de l'indice de chaleur des mesures de base et passives. Sun et al. (2021).....	22
Figure 2-6 Résultats du cas 5 (climatisation de la chambre allumée, pas de HPWH, pas d'appareils électroménagers à charge élevée): (a) Demande et offre d'électricité; (b) Température de l'air; (c) Environnement thermique. La coupure de courant a commencé à 9 heure du matin le premier jour. Amada et al. (2021).....	23
Figure 2-7 TS expérimental et prédit des sujets sédentaires exposés à des conditions chaudes et froides transitoires.(à partir de l'expérience de Tochiara et al.2001)	25
Figure 2-8 Comparaison des mesures réelles et des simulations des profils de consommation mensuelle d'électricité et de gaz pour les écoles secondaires et primaires (Attia et al. 2020).....	27
Figure 2-9 Fluctuation de la température moyenne en Belgique (par rapport à la normale de 1961 à 1990) au cours de la période allant de 1951 à 2100 (KMI, 2020)	28
Figure 2-10 Bilan de la vague de chaleur d'août 2022. Meteobelgique	30
Figure 3-1 Cadre méthodologique présentant les étapes de travail.....	33
Figure 3-2 Plans	34
Figure 3-3 Enveloppe isolé.....	34
Figure 3-4 coupe détailler du mur extérieur ossature bois	35
Figure 3-5 caractéristiques thermique de parois extérieur	35
Figure 3-6 Zonage du plan RDC.....	36
Figure 3-7 Zonage du plan R+1+2.....	37
Figure 3-8 Centrale de traitement d'air qui servir les chambres	37
Figure 3-9 Centrale de traitement d'air qui servir les chambres - carte mécanique.....	38
Figure 3-10 les 4 pompes a chaleurs - multi-combinaison 4x AWGP450F1 Toyota.....	39
Figure 3-11 les 4 pompes a chaleurs - multi-combinaison 4x AWGP450F1 Toyota - carte mécanique	39
Figure 3-12 caractéristiques techniques des panneaux solaires thermiques 98X T031-EN-05-Optisun	40
Figure 3-13 système de groupe frigorifique - carte mécanique	41
Figure 3-14 Décomposition des gains et des pertes de chaleur dans une zone chauffée - Building energy statistical modelling. (n.d)	41
Figure 3-15 Techniques de construction durable des bâtiments II Enveloppe	42
Figure 3-16 Legends entre 1980 et 2100 selon le scénario SSP5-8.5	43
Figure 3-17 Ouzeu et al. (2016) : La zone rouge est le point de début et fin de la canicule à condition que les températures ne descendent pas en dessous des frontières de la zone rose.	44
Figure 3-18 Kumar, P. (2019), Insatisfaction prévue en pourcentage vs Vote moyen prédit	46
Figure 3-19 installation de l'appareil Testo 400 - Taha Safi.....	48

Figure 3-20 plateformes de DesignBuilder	49
Figure 3-21 Customize weather data visualization with 2D chart - algorithme Grasshopper.....	50
Figure 3-22 Création de l'année météorologique réelle EPW- algorithme Grasshopper	51
Figure 3-23 Calibration de l'électricité - algorithme Grasshopper.....	51
Figure 4-1 La zone climatique selon la classification de Köppen-Geiger [45] et la référence de l'emplacement du bâtiment en Belgique.....	53
Figure 4-2 Consommation d'énergie mesurée et répartition du modèle.....	55
Figure 4-3 L'objectif de la consommation d'énergie d'une maison passive.....	55
Figure 4-4 L'objectif de la consommation d'énergie d'une maison passive.....	56
Figure 4-5 Vue 3D du modèle de bâtiment de référence - Design Builder	56
Figure 4-6 L'objectif de la consommation d'énergie d'une maison passive.....	57
Figure 4-7 ventilation, éclairage et calendrier d'occupation	59
Figure 4-8 Consommation mensuelle d'électricité de modèle de référence mesurée et simulée.....	61
Figure 4-9 Consommation mensuelle de gaz de modèle de référence mesurée et simulée	61
Figure 4-10 Mesure et simulation du modèle de référence de température opérative.....	63
Figure 4-11 EN 16798 (2019) - Modèle de confort thermique PMV/PPD - Lille Lesquin (2022)	64
Figure 4-12 La visualisation des cartes de chaleur et le résumé météorologique à l'aide de Grasshopper pour le scénario MAR BCC en 2019 et SSP8.5 en 2047 et 2098.....	67
Figure 4-13 Évolution horaire de la température extérieure lors des vagues de chaleur atteignant les températures maximales les plus élevées détectées en 2019 pour la période 2001-2020, en 2047 pour la période 2041-2060, et en 2098 pour la période 2081-2100	68
Figure 4-14 Évaluation de la température opérative des 4 zones pendant les trois scénarios de canicule, incluant une période de 3 jours avant et après chaque canicule	70
Figure 4-15 IOhD, IOcD à long terme.....	71
Figure 4-16 IOhD, IOcD à long terme (canicules).....	72
Figure 4-17 EN 16798 (2019-2047-2098) - Modèle de confort thermique PMV/PPD	74
Figure 4-18 Les gains internes et les gains solaires pour les scénarios de 2019, 2047 et 2098	76
Figure 4-19 Les gains et pertes totaux du bâtiment pour les trois scénarios : 2019, 2047 et 2098	78
Figure 4-20 Consommation moyenne de gaz et d'électricité pour les trois scénarios : 2019, 2047 et 2098.....	78
Figure 4-21 Consommation mensuelle de gaz et d'électricité pour les trois scénarios : 2019, 2047 et 2098	79
Figure 5-1 Digital Twin, Smith, J. (2021).....	85
9-1 Besoin de chauffage - rapport PHPP	96
9-2 Puissance de chauffage - rapport PHPP.....	96
9-3 Ventilation - rapport PHPP	97
9-4 Apports intern - rapport PHPP	97
9-5 Besoin en électricité - rapport PHPP.....	98
9-6 Consommation réelle de gaz	98
9-7 Consommation réelle d'électricité.....	99
9-8 Carte mécanique générale	99
9-9 refroidisseur de chambre froide – Design Builder.....	100
9-10 circuit d'eau chaude sanitaire - Design Builder	100
9-11 Système de chauffage, ventilation et climatisation - Design Builder.....	100
9-12 Consommation énergétique annuelle - scénario 2019	101
9-13 Température, gains thermiques et consommation énergétique - scénario 2019	101

9-14 Consommation énergétique annuelle - scénario 2047	102
9-15 Température, gains thermiques et consommation énergétique - scénario 2047	102
9-16 Consommation énergétique annuelle - scénario 2098	103
9-17 Température, gains thermiques et consommation énergétique - scénario 2098	103

Liste des tableaux

Tableau 2-1 Propositions de forfaits de rénovation de l'enveloppe du bâtiment pilote, Almeida et all. (2020)	26
Tableau 2-2 Solutions systèmes proposées pour le bâtiment, Almeida et all. (2020).....	26
Tableau 2-3 (IPCC, 2021)	29
Tableau 3-1 IEA Annex 80 – Wether data Task force	31
Tableau 3-2	35
Tableau 3-3	36
Tableau 3-4 caractéristiques techniques des panneaux solaires thermiques 98X T031-EN-05-Optisun 245 - fiche technique.....	40
Tableau 3-5 variables de cause.....	43
Tableau 3-6 variables d'effet	45
Tableau 4-1 Besoin de chauffage, besoin d'électricité et intensité de consommation d'énergie.	57
Tableau 4-2 état d'occupation du bâtiment.....	59
Tableau 4-3 Calendrier des jours fériés pour l'année 2021	60
<i>Tableau 4-4 Calendrier des jours fériés pour l'année 2021</i>	<i>60</i>
Tableau 4-5 Intensité normalisée d'utilisation de l'énergie entre 2019 et 2021	62
Tableau 4-6 Résumé des paramètres d'entrée pour le modèle de référence après la calibration et la normalisation météorologique.....	65
Tableau 4-7 Synthèse des principaux paramètres décrivant les trois vagues de chaleur (2019-2047-2098) avec les températures maximales les plus élevées	69
Tableau 4-8 IOhD, IOcD, AWD, ACD, CCOhR, CCOcR à long terme.....	71
Tableau 4-9 IOhD, IOcD, AWD, ACD, CCOhR, CCOcR à court terme (canicules).....	72

1 Introduction

1.1 Contexte et problématique

L'augmentation constante du changement climatique et les canicules de plus en plus fréquentes en Europe suscitent de sérieuses préoccupations quant aux effets de la surchauffe sur la santé humaine. Les bâtiments qui deviennent excessivement chauds représentent un véritable danger, en particulier pour les personnes ayant des problèmes de santé. Les conséquences de la chaleur extrême, telles que les coups de chaleur, peuvent mettre en péril la vie des individus, notamment des personnes âgées et les individus souffrant de troubles cardiaques (Gagnon et al. 2016)

La survenue de vagues de chaleur entraîne une augmentation du taux de mortalité, en particulier parmi les personnes âgées de plus de 65 ans. Par exemple, lors de la vague de chaleur qui a frappé sept pays européens en août 2003, plus de 38 000 personnes ont perdu la vie (Sardon et al. 2004). Aux États-Unis, on estime que près de 600 décès par an sont liés à la surchauffe (Basu et al. 2002). De manière alarmante, lors de l'été 2010, une vague de chaleur exceptionnelle a provoqué la mort de plus de 56 000 personnes dans les pays d'Europe de l'Est et de vastes régions de la Russie (Barriopedro et al. 2011).

Au Canada, les statistiques de décès chez les personnes âgées ont également augmenté pendant la période de la pandémie de Covid-19 en raison des conditions de chaleur. De nombreuses personnes âgées se sont retrouvées isolées sans soutien, et beaucoup ont évité les centres publics de rafraîchissement par crainte de contracter des infections (Rouleau et Gosselin 2021)

Les scientifiques et les climatologues s'accordent largement sur le fait que l'intensité des vagues de chaleur continuera d'augmenter à l'avenir (CDC, 2020). Cette perspective soulève des inquiétudes quant à l'adéquation des bâtiments passifs pour faire face à ces conditions extrêmes. Les normes actuelles en matière de bâtiments à faible consommation d'énergie, bien que bénéfiques pour la réduction de la consommation globale, ne sont plus suffisantes pour garantir un confort thermique adéquat dans les établissements de soins.

Dans ce contexte, il est essentiel de prendre en compte les projections climatiques futures. Des études menées en Belgique, combinant différents scénarios, ont démontré que les températures maximales pourraient augmenter jusqu'à +7°C dans les régions d'Europe centrale et occidentale avec un réchauffement de +5°C (Seneviratne et al. 2021). Les événements de chaleur extrême pendant l'été sont déjà en augmentation en termes d'intensité et de fréquence, et cette tendance devrait se renforcer avec le réchauffement climatique (Suarez et al. 2020).

1.2 Pertinence du sujet de recherche

L'évaluation du confort et de la consommation d'énergie dans les bâtiments de soins est devenue une préoccupation croissante de nos jours. Les bâtiments de soins doivent fournir un environnement confortable et sûr pour les patients, en veillant à ce que leur santé et leur bien-être ne soient pas compromis. De plus, la consommation d'énergie dans ces bâtiments est également un aspect important à considérer, car une

efficacité énergétique optimale peut contribuer à réduire les coûts et l'impact environnemental.

Cependant, il est regrettable que le manque d'attention et d'évaluation approfondie dans ce domaine ne prenne pas suffisamment en compte les conséquences futures sur la vie des patients.

De nombreuses études se sont penchées sur les impacts de la surchauffe dans les bâtiments, en particulier dans les maisons de repos. Plusieurs recherches ont été menées pour évaluer les performances énergétiques et le confort thermique dans ces structures.

Attia et al. (2021) ont évalué la surchauffe dans une maison à énergie quasi nulle à Kettenis, Belgique, en utilisant trois méthodes de calcul. Rahif et al. (2021) ont réalisé une évaluation de la surchauffe sensible face au changement climatique dans une maison à Eupen, Belgique. Vanwynsberghe et al. (2022) ont analysé la résilience thermique à la surchauffe dans un appartement belge lors de situations de chocs.

En effet, la plupart de ces études se sont concentrées sur de petits bâtiments résidentiels dotés de systèmes mécaniques simplifiés. Cependant, il est regrettable de constater qu'aucun établissement de soins (maison de soin ou hôpitaux) en Belgique n'a encore bénéficié d'une évaluation spécifique du confort thermique, malgré le fait que ces types de bâtiments soient particulièrement sensibles aux effets du réchauffement climatique et des vagues de chaleur. Cette lacune souligne l'importance d'accorder une attention accrue à l'évaluation et à l'amélioration du confort thermique dans ces établissements cruciaux pour la santé et le bien-être des patients.

Ce travail vise à fournir des résultats bénéfiques à plusieurs parties prenantes (Figure 1-1). Parmi elles, le directeur (Laurent Samyn) et le gestionnaire technique du bâtiment (Anthony Hovine) pourront prendre des décisions éclairées. MK engineering qui pourront améliorer leurs projets grâce à nos conclusions. L'Agence Wallonie de qualité de vie pourra formuler des recommandations politiques et réglementaires basées sur nos résultats. La Fédération des maisons de repos pourra améliorer l'efficacité énergétique de ses établissements grâce à nos découvertes. Enfin les professionnels du bâtiment (architectes, ingénieurs en mécanique, consultants en énergie, auditeurs de bâtiments...etc.)

Ce travail est en accord avec les objectifs de neutralité climatique de l'UE pour 2050 en matière de performance énergétique des bâtiments (Parlement européen, 2023) et il est associé à trois des 17 objectifs de développement durable des Nations Unies (Figure 1-1). Tout d'abord, il utilise des systèmes de panneaux solaires pour produire de l'eau chaude sanitaire, contribuant ainsi à l'objectif 7 (Énergie propre et abordable) et à l'objectif 13 (Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques). Deuxièmement, il concerne la rénovation d'un bâtiment passif qui est considéré comme une construction durable, soutenant ainsi l'objectif 11 (Villes et communautés durables). Troisièmement, il évalue la résilience de ce bâtiment face aux changements climatiques estivaux, ce qui est lié à l'objectif 13 (Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques).



Figure 1-1 Trois des objectifs de développement durable des Nations Unies, Nations Unies (2015)

1.3 Objectifs de recherche

L'étude vise à évaluer le confort thermique et la résilience estivale d'une maison de soins à consommation d'énergie quasi nulle à Kain, en Wallonie. Pour ce faire, un modèle énergétique zonal est utilisé, étant donné que les simulations énergétiques des bâtiments (BESs) ont été fréquemment employées pour anticiper les problèmes de surchauffe dans les maisons passive (McLeod et al. 2013).

L'objectif principal de cette évaluation est d'obtenir une compréhension précise et détaillée de l'impact des conditions thermiques estivales sur les maisons de soins, en particulier dans le contexte du changement climatique futur et des vagues de chaleur extrêmes. En adoptant une approche objective, cette évaluation cherche à recueillir des données scientifiques précises sur les conditions thermiques existantes dans les maisons de soins. Cela peut impliquer la mesure des températures à l'intérieur des bâtiments, l'évaluation de l'efficacité des systèmes de climatisation et la consommation énergétique en parallèle avec la consommation réelle du bâtiment, afin de déterminer le niveau réel de performance énergétique actuelle et sa capacité à faire face au changement climatique futur.

Les résultats indiquent que la consommation d'énergie dans le bâtiment est environ 5,11 fois supérieure à la consommation attendue, et le bâtiment ne parvient pas à faire face aux vagues de chaleur. Il a connu une défaillance lors de la canicule de 2019, car le système de refroidissement n'était pas en mesure de garantir un confort thermique adéquat. Les scénarios futurs prévoient une défaillance encore plus importante en raison des températures élevées.

Il convient de souligner que l'objectif principal de cette évaluation n'est pas de proposer des solutions spécifiques pour améliorer le confort thermique. Bien que les résultats obtenus puissent servir de base pour identifier les problèmes et les besoins en termes d'amélioration, le travail se concentre principalement sur l'évaluation et la compréhension des conditions existantes. Il pourrait néanmoins servir de point de départ pour des études ultérieures visant à formuler des recommandations spécifiques pour améliorer le confort thermique et la résilience estivale dans les maisons de soins.

Dans ce projet novateur (Figure 1-2), des fichiers climatiques futuristes sont utilisés pour évaluer les effets des changements climatiques et des canicules. Grâce à des

mesures réelles et une précision élevée, des informations précises sont fournies aux maisons de retraite. Cela permet une meilleure compréhension des risques potentiels pour la santé et le bien-être des résidents face à ces conditions climatiques changeantes.

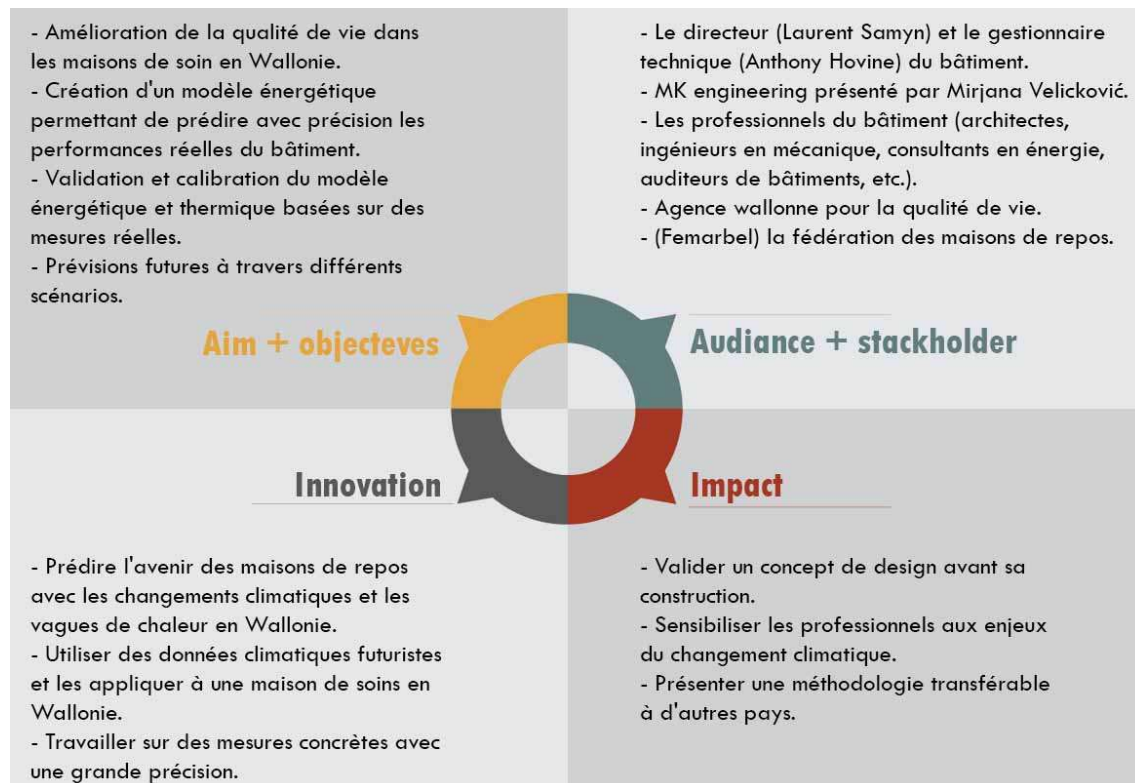


Figure 1-2 Quad Chard

1.4 Questions de recherche

Cette étude vise à évaluer le confort thermique et la performance énergétique d'un bâtiment de maison de retraite face aux changements climatiques extrêmes, en abordant les trois questions suivantes :

- Quels sont les risques de surchauffe à court et à long terme dans les maisons de soin en Wallonie ?
- Quelle est la performance énergétique actuelle d'une maison de soin à énergie quasi zéro, et comment se compare-t-elle aux normes et aux exigences réglementaires en matière d'efficacité énergétique ?
- Quel est l'impact de la chaleur estivale sur le confort des occupants et la consommation d'énergie dans une maison de soin à énergie quasi nulle en Wallonie?
- Comment la modélisation énergétique peut-elle aider à évaluer l'efficacité des systèmes de refroidissement dans une maison de soin à énergie quasi nulle pendant la période estivale ?
- Est-ce que les maisons passives augmentent le risque de surchauffe dans les climats tempérés océaniques ?

2 Revue de littérature/théorie

Ce chapitre consiste en une analyse d'une série de publications qui abordent le rôle des soins aux personnes âgées souffrant de vagues de chaleur pendant l'été.

La revue de littérature rassemblera les résultats de nombreuses études et recherches sur ce sujet, afin de fournir une synthèse complète des connaissances actuelles sur ce sujet. Cela inclura des informations sur les causes des vagues de chaleur dans les établissements de soins pour personnes âgées, les effets sur le confort thermique sur la santé des résidents ainsi que les stratégies possibles pour prévenir et gérer les épisodes de vague de chaleur.

En explorant la littérature disponible sur ce sujet, des informations précieuses peuvent être fournies aux professionnels de la santé et aux décideurs politiques, qui pourraient ainsi utiliser ces connaissances pour améliorer les politiques et les pratiques liées aux soins de longue durée.

2.1 La surchauffe dans les bâtiments

Cette section examine la littérature relative aux causes, impacts, et méthodes permettant de réduire la surchauffe dans les bâtiments, avec une attention particulière portée sur les maisons de retraite.

La surchauffe dans les bâtiments est un problème croissant en Europe et en Belgique en particulier. En été, les températures peuvent devenir excessives à l'intérieur des bâtiments, en particulier dans les maisons de retraite, les hôpitaux et les bâtiments publics. Cela peut entraîner des conséquences négatives pour la santé, comme la déshydratation, l'épuisement et les coups de chaleur, en particulier chez les personnes âgées et les personnes souffrant de maladies chroniques.

Les risques de surchauffe dans les bâtiments ont été largement étudiés ces dernières années. Selon une étude menée par Rahif et al. (2021), les stratégies de refroidissement des bâtiments doivent être évaluées à la lumière de l'impact du changement climatique. L'étude propose un cadre de simulation pour évaluer la résistance de ces stratégies de refroidissement face à la surchauffe dans les bâtiments.

En outre, Laouadi et al. (2023) ont développé des critères de limitation de la surchauffe pour les maisons de soins de longue durée. Cette étude a mis en évidence l'importance de tenir compte de la vulnérabilité des occupants des bâtiments lors de la conception des stratégies de refroidissement.

Attia et al. (2021) ont comparé trois méthodes de calcul de la surchauffe dans les logements à énergie quasi nulle (nZEB) comprenant l'indicateur de surchauffe EPBD, l'indicateur de surchauffe Passive House et les indicateurs de degré de chaleur ambiante (AWD) et de surchauffe intérieure (IOD) développés par Hamdy et al. (2017) et ont conclu que la méthode élaborée par Hamdy et al. (2017) est la plus moderne et la plus avancée pour évaluer la surchauffe. Rahif et al. (2021), ont également utilisé et développé cette méthode.

L'indicateur de surchauffe EPBD, est un indicateur de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) utilisée par le standard de construction passive.

Le degré de chaleur ambiante (AWD) est une mesure de la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment. Il est calculé en prenant la différence entre la température extérieure et la température intérieure moyenne pondérée en fonction des zones de température du bâtiment. Cette mesure est utilisée pour évaluer le potentiel de surchauffe dans le bâtiment en été.

La surchauffe intérieure (IOD) est une mesure de la température intérieure maximale atteinte dans le bâtiment en été. Elle est influencée par les sources de chaleur intérieures, telles que les appareils électroménagers, l'éclairage, les occupants, et les stratégies de refroidissement, telles que la ventilation naturelle, les ventilateurs et les systèmes de climatisation.

L'indicateur de degré de chaleur ambiante (AWD) et de surchauffe intérieure (IOD) utilise une approche de modélisation thermique pour simuler le comportement thermique du bâtiment en été. Les caractéristiques de conception du bâtiment, telles que l'orientation, l'isolation thermique, les fenêtres et les stores, sont également prises en compte. Cette méthode permet de prévoir la surchauffe potentielle et de proposer des solutions pour éviter ou réduire la surchauffe dans le bâtiment.

Sheng et al. (2023) ont développé un cadre de modélisation et d'analyse pour évaluer la résilience thermique d'un établissement de soins assistés situé à Houston, aux États-Unis, pendant les vagues de chaleur et les périodes de froid avec des pannes de courant. Leur étude s'est concentrée sur deux paramètres clés : le SET (Standard Effective Temperature) et le "Heat Index" (HI). Le SET est une mesure utilisée dans l'étude pour évaluer les performances de résilience thermique d'un établissement d'assistance pour personnes âgées en cas d'événements météorologiques extrêmes. Il est utilisé pour calculer le nombre d'heures de degré SET (en degrés Celsius) qui dépassent un certain seuil de température (30°C) pour évaluer la sécurité thermique d'un bâtiment. Plus le nombre d'heures de degré SET est élevé, plus la température intérieure dépasse le seuil de sécurité et plus la sécurité thermique du bâtiment est compromise.

Figure 2-1 montre l'étude réalisée sur la distribution horaire du SET de toutes les chambres des résidents et de la température extérieure de l'air du modèle de référence de l'établissement d'assistance pour personnes âgées pendant la vague de chaleur de 2015. La médiane du SET des chambres des résidents a dépassé le seuil de survie passive supérieur à 30°C dans les 24 heures suivant le début de la panne de courant, tandis que le SET maximal des chambres a rapidement dépassé le seuil, dans les 6 heures suivant la panne.

Le HI, quant à lui, est un indice de chaleur qui combine la température de l'air et l'humidité relative pour donner une mesure de la sensation de chaleur ressentie par le corps humain. Le HI est utilisé comme une mesure de la résilience thermique de la structure de la résidence pour personnes âgées étudiée lors de la vague de chaleur de 2015. Figure 2-2 compare la distribution horaire du HI dans toutes les chambres des résidents de la résidence à différents percentiles avec la température extérieure de l'air pour évaluer l'efficacité des mesures de résilience thermique mises en place.

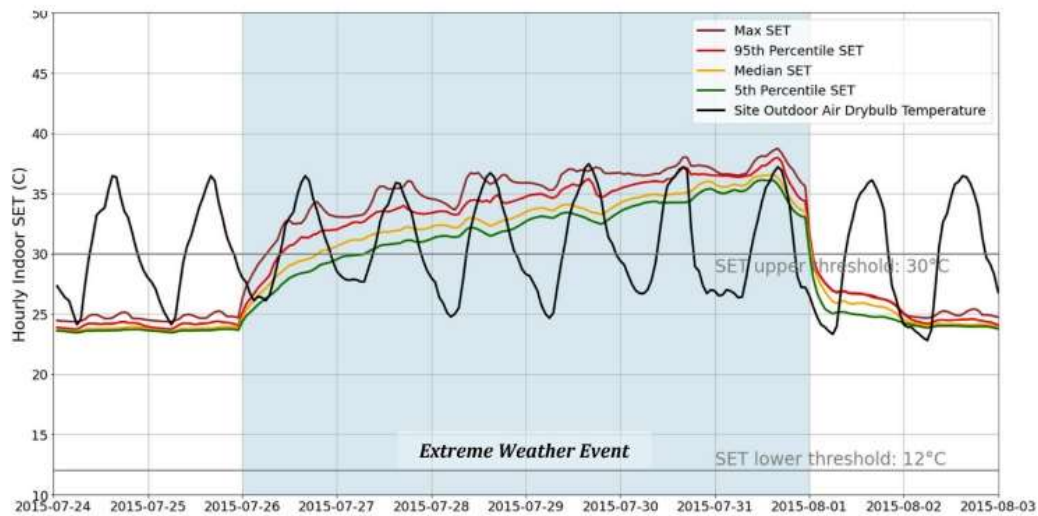


Figure 2-1 La distribution horaire du SET. Sheng et al. (2023)

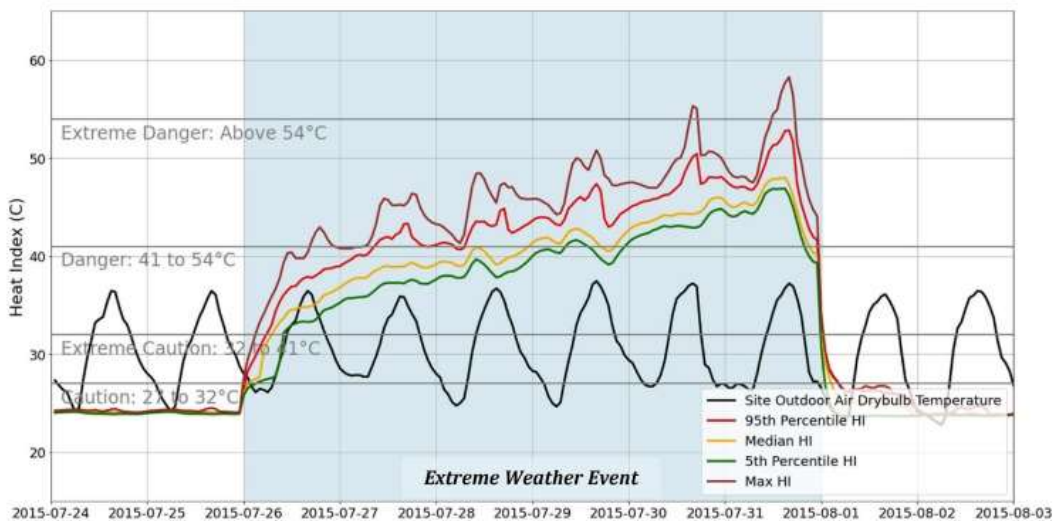


Figure 2-2 La distribution horaire de l'indice de chaleur HI. Sheng et al. (2023)

Dans le modèle de référence étudié pendant la vague de chaleur de 2015, une distribution horaire de l'indice de chaleur (HI) a été observée dans toutes les chambres, ainsi que la température extérieure de l'air. Les résultats ont montré que la médiane de l'indice de chaleur des chambres a dépassé le niveau de danger après 72 heures depuis le début de la panne de courant. En revanche, l'indice de chaleur maximum des chambres a rapidement atteint le niveau de danger en moins de 24 heures. Ces résultats mettent en évidence l'importance d'une résilience thermique efficace pour protéger la santé et le bien-être des résidents pendant les périodes de chaleur extrême.

2.2 Les pannes de courant face au confort thermique

L'article de Rahif et al. (2023) se concentre sur l'impact des vagues de chaleur sur les bâtiments résidentiels à Bruxelles, en Belgique. Les auteurs ont étudié la surchauffe des bâtiments causée par l'arrêt du système de refroidissement et ont optimisé les stratégies de conception passive pour un bâtiment quasi zéro énergie en utilisant un algorithme génétique multicritère. Trois solutions optimales ont été sélectionnées et analysées pour leur capacité à résister aux vagues de chaleur maximales dans les périodes de 2001-2020, 2041-2060 et 2081-2100. Les résultats (Figure 2-3) ont montré que, malgré l'optimisation des stratégies de conception passive, le bâtiment ne pourrait pas éviter la surchauffe pendant les vagues de chaleur extrêmes, avec des températures intérieures dépassant les 29°C.

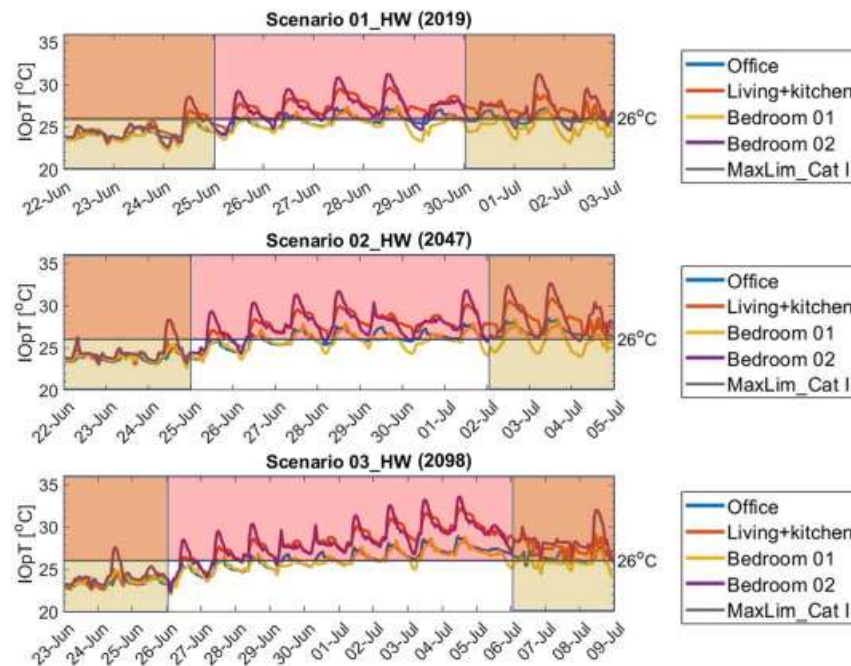


Figure 2-3 La température opérationnelle intérieure pour différentes zones pendant les trois scénarios de canicule pour la solution la plus économe en énergie avec le plus grand niveau d'inconfort. Rahif et al. (2023)

Selon Sun, Specian, et Hong (2021), l'article intitulé "Nexus of thermal resilience and energy efficiency in buildings: A case study of a nursing home" examine l'impact de l'efficacité énergétique sur la résilience des occupants face à des conditions météorologiques extrêmes. Les auteurs ont étudié un exemple réel de défaillance du bâtiment : la surchauffe extrême d'une maison de retraite en Floride, causée par une panne de climatisation lors de l'ouragan Irma en 2017. L'objectif était de mieux comprendre comment l'efficacité énergétique peut être utilisée comme ressource de résilience dans des situations réalistes de catastrophe liée aux conditions météorologiques. Les auteurs ont quantifié le coût initial de chaque mesure d'efficacité énergétique en termes monétaires afin de déterminer leur efficacité pour réduire le risque de mortalité des résidents.

Cette étude décrit les différentes métriques utilisées pour évaluer la résilience thermique des bâtiments, qui reflètent les impacts des événements extrêmes sur la

santé humaine. Il y a deux types de métriques : des indices biométéorologiques simplifiés et des modèles de budget thermique plus complexes. Les indices simplifiés sont basés sur la température de l'air ou une combinaison de la température de l'air et d'une mesure de l'humidité, parfois avec la considération de la durée des seuils dépassés. Ils sont faciles à calculer et à prévoir, ont une précision de prévision relativement élevée en raison de moins de variables d'entrée par rapport aux indices complexes, et sont plus facilement compris par le grand public et les autres parties prenantes. Les indices simplifiés typiques comprennent l'indice de chaleur (heat index), humidex, la température de globe mouillé (WBGT) et la température effective nette. Les modèles de budget thermique plus complexes incluent tous les paramètres météorologiques et physiologiques nécessaires pour mieux décrire la charge thermique physiologique : température de l'air, pression de vapeur d'eau, vitesse du vent et flux radiants à court et long terme.

Le "Heat Index" (indice de chaleur) est largement utilisé aux États-Unis pour évaluer le stress thermique sur les travailleurs. Il combine la température et l'humidité relative pour donner une température équivalente perçue par le corps humain. C'est une mesure efficace pour évaluer les risques liés aux températures élevées. Les autorités américaines ont créé une échelle de niveaux de danger liés à l'indice de chaleur. Plus l'indice est élevé, plus les risques pour la santé sont importants. La formule pour calculer l'indice de chaleur est une équation multivariée qui prend en compte plusieurs variables.

$$\text{Heat Index} = c_1 + c_2T + c_3R + c_4TR + c_5T^2 + c_7T^2R + c_8TR^2 + c_9T^2R^2 \quad (1)$$

T – température de l'air (°C)

RH – humidité relative (%)

$$C1 = -8.78469475556$$

$$C2 = 1.61139411$$

$$C3 = 2.33854883889$$

$$C4 = -0.14611605$$

$$C5 = -0.012308094$$

$$C6 = -0.0164248277778$$

$$C7 = 0.002211732$$

$$C8 = 0.00072546$$

$$C9 = -0.00072546$$

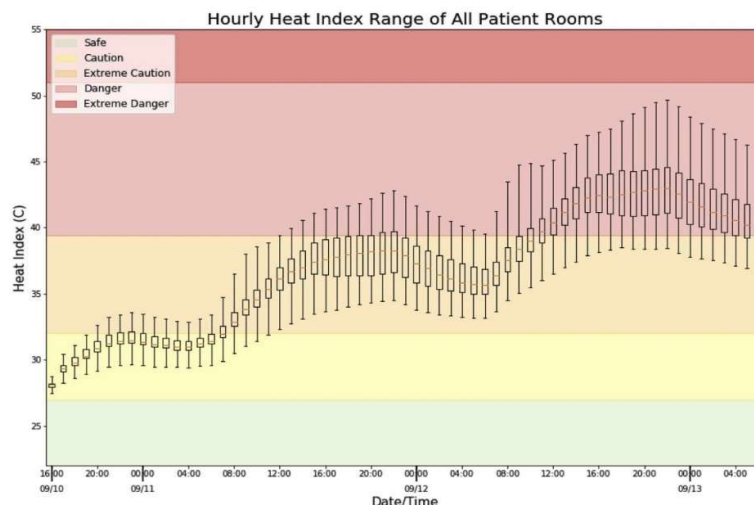


Figure 2-4 Diagramme en boîte de l'indice de chaleur horaire pour toutes les chambres des patients. Sun et al. (2021)

En recréant la maison de retraite avec le logiciel EnergyPlus, les auteurs ont introduit plusieurs mesures passives d'efficacité énergétique (Figure 2-4). Ils ont constaté que

la ventilation naturelle était la mesure la plus efficace pour réduire l'indice de chaleur intérieure (heat index), suivie d'une réduction des charges électriques diverses du bâtiment. D'autres mesures, telles que l'installation de feuilles d'aluminium sur le toit et les fenêtres, l'installation d'un toit frais, la modification des fenêtres et l'ajout d'isolation murale, étaient également bénéfiques dans une moindre mesure.

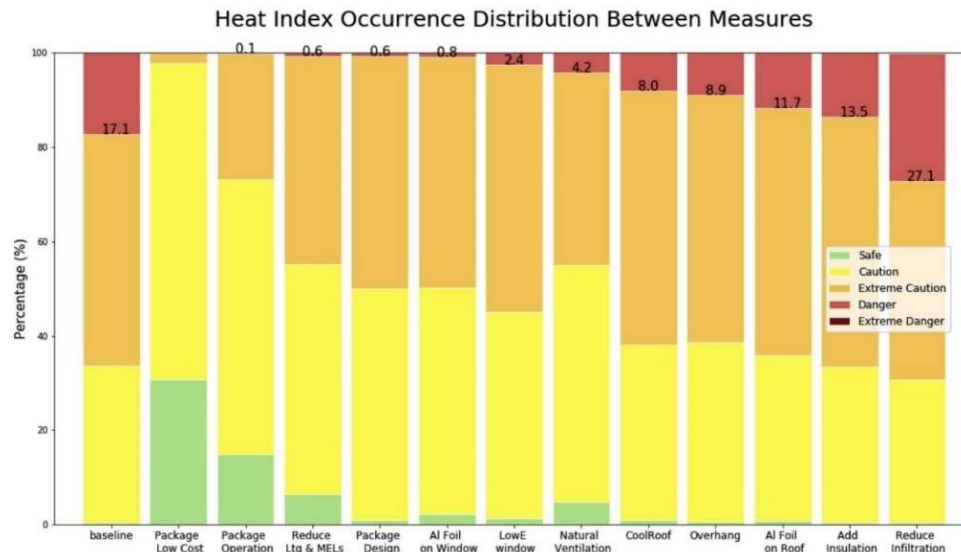


Figure 2-5 Distribution de l'occurrence de l'indice de chaleur des mesures de base et passives. Sun et al. (2021)

Cependant, ces mesures passives ne peuvent garantir des conditions de sécurité pour les occupants (Figure 2-5), et des mesures actives, telles que le stockage d'énergie fraîche ou les panneaux solaires qui alimentent la moitié de la capacité des systèmes de refroidissement, sont nécessaires pour fournir un refroidissement et maintenir des conditions de sécurité.

L'analyse a généré trois conclusions importantes : l'efficacité énergétique n'est pas uniformément bénéfique pour la résilience, et différentes caractéristiques d'efficacité confèrent différents impacts de résilience. De même, la réduction de l'infiltration d'air peut rendre plus difficile l'expulsion de la chaleur excessive lorsque la température de l'air intérieur est supérieure à celle de l'extérieur. Ces conclusions soulignent l'importance de considérer les facteurs de résilience lors de la mise en place de mesures d'efficacité énergétique dans les bâtiments.

Amada et al. (2021) ont étudié la faisabilité de séjourner dans une maison à énergie nette zéro (ZEH) avec un confort thermique adéquat sans risque de coup de chaleur lors des pannes de courant estivales. Les résultats montrent qu'une famille de quatre personnes peut rester chez elle pendant une panne de courant de 72 heures en utilisant un système de panneaux solaires de 4,62 kW et une batterie de stockage de 5,6 kWh, avec une utilisation constante de la climatisation, de la ventilation, de l'éclairage, de la télévision, du chargement de téléphones portables, du réfrigérateur et de l'eau chaude. Cependant, l'utilisation simultanée de gros appareils électroménagers tels que des fours à micro-ondes, des bouilloires électriques et des cuiseurs à riz avec la climatisation a conduit à des interruptions de courant. Les résultats suggèrent également qu'il est possible d'utiliser de l'eau chaude sans interrompre l'alimentation électrique en faisant fonctionner un chauffe-eau

thermodynamique pendant la journée lorsque l'électricité est fournie par la génération d'énergie solaire.

L'indice SOC (state of charge) est utilisé pour évaluer l'offre et la demande d'énergie électrique pendant une panne de courant. Cet indice mesure le niveau de charge de la batterie de stockage d'énergie (BT) par rapport à sa capacité totale. Il est calculé à partir de l'état de charge initial de la batterie (SOC₀), de l'énergie chargée dans la batterie (B_{cha}), de l'efficacité de charge-décharge de la batterie (r_{BT}) et de l'énergie déchargée de la batterie (B_{dis}), ainsi que de la capacité réelle de la batterie (R_C). L'indice SOC est exprimé en pourcentage (%), où 100 % représente une batterie entièrement chargée et 0 % une batterie complètement déchargée.

$$SOC = SOC_0 + \frac{B_{cha} \times \sigma_{BT} - B_{dis}}{R_C} \times 100 \quad (2)$$

L'indice SOC est important car il permet de suivre l'état de la batterie pendant une panne de courant et de s'assurer que les occupants du bâtiment disposent toujours de suffisamment d'énergie pour maintenir un certain niveau de confort thermique et utiliser des équipements tels que l'éclairage, les appareils électroménagers, les appareils de communication, etc. L'évaluation de l'indice SOC peut également aider à optimiser la gestion de l'énergie en fonction de la durée prévue de la panne de courant.

Cinq cas de comportement des usages intérieurs de la maison ont été examinés pour évaluer l'efficacité énergétique du système de stockage de batterie (Figure 2-6). Lors de l'expérience, le confort thermique a été évalué à l'aide des indices PMV et WBGT pour éviter tout risque de coup de chaleur. Le taux métabolique et la valeur CLO sont restés constants pour les mesures de PMV. La formule de calcul de PMV a permis d'évaluer le confort thermique pendant l'éveil et le sommeil.

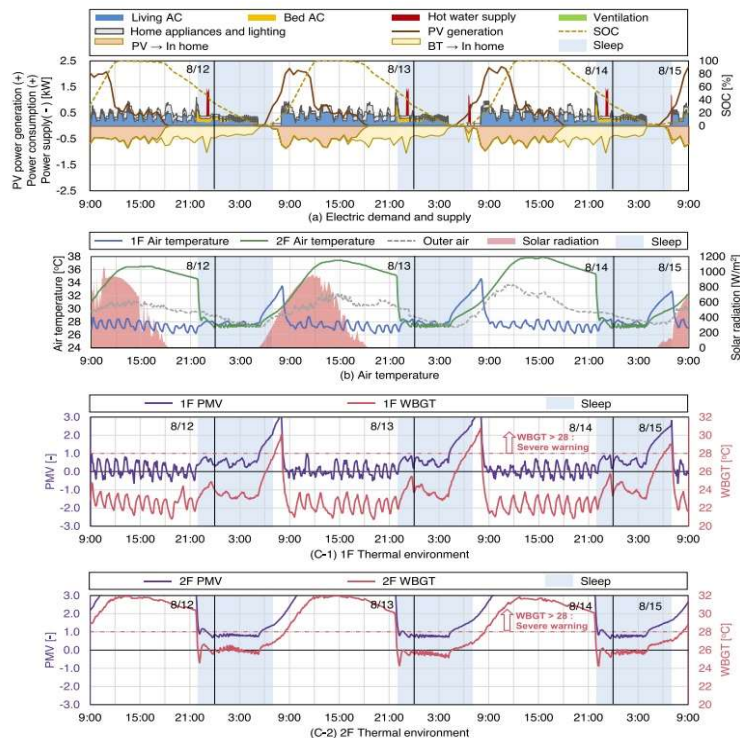


Figure 2-6 Résultats du cas 5 (climatisation de la chambre allumée, pas de HPWH, pas d'appareils électroménagers à charge élevée): (a) Demande et offre d'électricité; (b) Température de l'air; (c)

Des travaux futurs sont nécessaires pour valider un modèle et vérifier l'efficacité de l'ombrage solaire et des ouvertures de fenêtre dans différentes conditions météorologiques, ainsi que pour évaluer l'expérience des occupants de différents groupes démographiques.

Rahif et al. (2021) ont utilisé une approche de conception passive pour optimiser une maison individuelle à faible consommation d'énergie. Ils ont identifié 13 stratégies de conception passive pour minimiser l'utilisation finale d'énergie de l'équipement de chauffage, de ventilation et de climatisation (HVAC) ainsi que le niveau d'inconfort thermique pour les occupants.

Ils ont ensuite sélectionné trois solutions optimales parmi le front de Pareto résultant pour analyser le risque de surchauffe pendant les vagues de chaleur simultanées avec la panne du système de refroidissement. Ils ont utilisé les degrés-jours de refroidissement (cooling degree days) pour quantifier la demande de refroidissement. Les degrés-jours de refroidissement sont une mesure du nombre de jours où la température moyenne quotidienne dépasse une température de consigne spécifique (ici, 25°C).

Les auteurs ont également utilisé et le degré de refroidissement intérieur (Indoor Overcooling Degree - IOcD). Le IOhD mesure la somme des heures où la température intérieure dépasse une température de consigne spécifique (ici, 28°C), tandis que le IOcD mesure la somme des heures où la température intérieure est inférieure à une température de consigne spécifique (ici, 20°C).

Les résultats de l'étude ont montré que la demande de refroidissement augmentera considérablement dans la région de Bruxelles même dans un scénario d'émissions optimiste, et que des stratégies de conception passive telles qu'une ventilation élevée, une faible infiltration d'air, une isolation élevée, une masse thermique élevée, une toiture verte intégrée et des stores roulants opérables peuvent améliorer considérablement le confort thermique et les performances énergétiques des bâtiments similaires dans des climats similaires.

Cependant, les auteurs ont également souligné que même dans des bâtiments optimisés, le risque de surchauffe pendant des conditions anormales telles que des vagues de chaleur simultanées avec la panne du système de refroidissement peut atteindre des niveaux critiques et potentiellement nocifs pour les occupants. Ils ont donc souligné l'importance d'une adaptation proactive et de politiques gouvernementales pour limiter les risques de surchauffe dans les bâtiments.

2.3 La sensibilité au confort thermique chez les personnes âgées

Le confort thermique chez les personnes âgées est altérée, ce qui peut avoir des conséquences négatives sur leur santé, leur bien-être et leurs fonctions cognitives en raison des changements liés à l'âge dans les mécanismes thermorégulateurs. Pour répondre aux besoins de confort thermique des personnes âgées, il est nécessaire d'avoir un modèle robuste de prédiction de la sensation thermique (TS).

Younes et al. (2019) ont développé un modèle de sensation thermique pour les personnes âgées sous des conditions uniformes et transitoires. Selon leur étude, ce

modèle permet de prédire avec précision la sensation thermique des personnes âgées dans différents environnements thermiques. Il s'agit d'un modèle qui permet de prédire la perception de la chaleur ou du froid par l'être humain en fonction de divers facteurs tels que la température ambiante, la température de la peau, la température centrale du corps et le taux de changement de la température.

Le modèle distingue deux composantes de la sensation thermique : une composante stable et une composante transitoire. La composante stable correspond à la sensation thermique dans des conditions environnementales stables, tandis que la composante transitoire correspond à la sensation thermique lorsqu'il y a des changements de température rapides ou importants.

$$TS = f(TS_0 + \Delta TS) \quad (3)$$

TS_0 = Composante stable de la sensation thermique

ΔTS = Composante transitoire de la sensation thermique

Le modèle est basé sur les signaux des thermorécepteurs périphériques et centraux, qui sont responsables de la perception de la température par le corps. Il prend en compte des facteurs tels que la densité de distribution et la profondeur des thermorécepteurs chauds et froids dans la peau, ainsi que le taux de changement de la température de la peau et la température centrale.

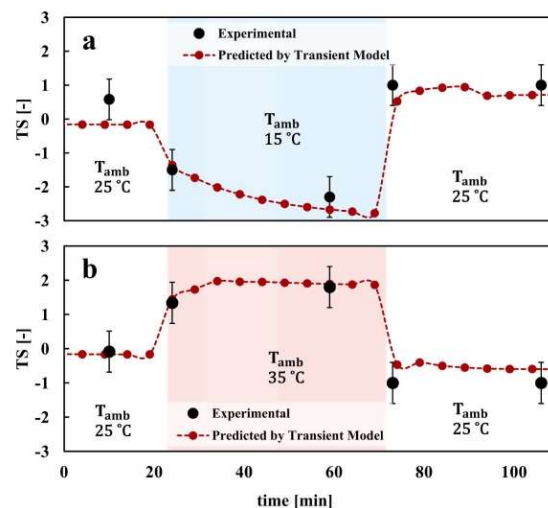


Figure 2-7 TS expérimental et prédit des sujets sédentaires exposés à des conditions chaudes et froides transitoires.(à partir de l'expérience de Tochihara et al. 2001).

Le modèle est destiné à prédire la sensation thermique sur une échelle à 7 points et utilise une fonction tangente hyperbolique pour modéliser la sensation thermique (Figure 2-7). Le modèle est particulièrement adapté pour étudier la perception de la chaleur et du froid chez les personnes âgées, car il prend en compte les changements physiologiques liés à l'âge qui affectent la perception de la température.

2.4 L'efficacité énergétique

L'efficacité énergétique dans les maisons de repos est un sujet important car ces établissements ont des besoins énergétiques élevés pour assurer le confort et la sécurité des résidents.

L'étude menée par Almeida et al. (2020) porte sur un bâtiment résidentiel situé à Porto, au Portugal. Les auteurs ont utilisé des simulations énergétiques, une méthodologie de coût optimal et une approche d'analyse du cycle de vie pour évaluer l'influence de l'énergie et des émissions incorporées dans les calculs de rentabilité.

Dans le cadre de cette étude, deux forfaits ont été sélectionnés pour la rénovation du bâtiment pilote (Tableau 2-1, 2-2). Le premier forfait concerne l'enveloppe du bâtiment, tandis que le second porte sur le système mécanique.

Cette analyse conclut que le paquet de rénovation pour l'enveloppe du bâtiment qui permet une réduction constante des besoins énergétiques la plus élevée dans tous les scénarios de rénovation (86% en moyenne) est M10 (M9 + thermique solaire). Cette solution conduit à une réduction significative des besoins énergétiques et des émissions de CO₂, mais elle est coûteuse. Le paquet de rénovation le plus rentable est M12, qui comprend le panneau modulaire, ainsi que l'isolation du toit et de la cave. Ce paquet suppose que les coûts de production du panneau sont déjà optimisés, et une réduction des coûts de production de 70% a été atteinte.

Renovation Package	Description
Reference	The walls are repaired and painted, and the pitched roof is refurbished (with new tiles). These measures do not improve the energy performance of the building
M1	The walls are insulated with ETICS—8 cm EPS ¹
M2	The walls are insulated with a prefabricated element (12 cm) and 6 cm MW ² layer
M3	The walls are insulated with a prefabricated element (12 cm) and 10 cm MW layer
M4	M3 plus the refurbishment of the roof (including membrane), roof battens, shuttering, gutter and a 6 cm MW layer
M5	M3 plus the refurbishment of the roof (including membrane), roof battens, shuttering, gutter and a 12 cm MW layer
M6	M3 plus the refurbishment of the roof (including membrane), roof battens, shuttering, gutter and a 14 cm MW layer
M7	M6 plus the cellar ceiling is insulated with 6 cm MW layer
M8	M7 plus the new windows (aluminum frame and a U-value of 2.70 W/m ² °C)
M9	M7 plus the new windows (aluminum frame and a U-value of 2.40 W/m ² °C)
M10	M9 plus a solar thermal system is installed
M11	M3 plus the refurbishment of roof with 6 cm of polyurethane (including membrane) roof battens, shuttering, and gutter. The cellar ceiling refurbished—6 cm XPS ³
M12	M11 with optimized costs for the production of the prefabricated element

¹ EPS—expanded polystyrene; ² MW—mineral wool; ³ XPS—extruded polystyrene.

Tableau 2-1 Propositions de forfaits de rénovation de l'enveloppe du bâtiment pilote, Almeida et al. (2020)

System Solution	Heating	Cooling	DHW	RES
Conventional	Electric heater $\eta = 1$	Multisplit EER = 3	Gas heater $\eta = 0.71$	
A	Multisplit COP = 4.1	Multisplit EER = 3.5	Gas heater $\eta = 0.71$	
B	Gas boiler $\eta = 0.93$	Multisplit EER = 3.5	Gas boiler $\eta = 0.93$	
C	Biomass boiler $\eta = 0.92$	Multisplit EER = 3.5	Biomass boiler $\eta = 0.92$	
D	Heat Pump COP = 3.33	Heat pump EER = 2.68	Heat Pump COP = 3.33	PV ¹ (7.5 kWp)
E	Heat Pump COP = 3.33	Heat pump EER = 2.68	Heat Pump COP = 3.33	
F	Heat Pump COP = 3.33	Heat pump EER = 2.68	Heat Pump COP = 3.33	PV (Zero) ²
G	Multisplit COP = 4.1	Multisplit EER = 3.5	Electric Boiler COP 1.5	PV (Zero) ST ³ for DHW

¹ PV—Photovoltaic; ² PV (Zero)—Photovoltaic contribution consists of an installation with the necessary capacity to fully compensate the energy needs for heating and cooling; ³ Solar Thermal (ST)—Solar Thermal contribution consists of an installation, sized according to the minimum requirements of the Portuguese legislation.

Tableau 2-2 Solutions systèmes proposées pour le bâtiment, Almeida et al. (2020)

En ce qui concerne les systèmes, celui qui permet une réduction plus significative (jusqu'à 226 kWh/(y.m²)) est la Combinaison de Système Sélectionné, qui considère une chaudière biomasse et aucun équipement de refroidissement. Les résultats des calculs pour la Solution Système C, qui utilise également une chaudière biomasse combinée avec un multi split, montrent des résultats pertinents en termes de réduction de l'énergie primaire et des émissions de carbone. En outre, la Solution Système F permet de réduire l'énergie primaire et les émissions de carbone de plus de 80%, mais à un coût plus élevé.

Une étude menée par Attia et al. (2020) se concentre sur le développement et la validation de deux modèles de référence pour les écoles à énergie quasi nulle (EEQNZ) en Belgique. Les chercheurs ont utilisé des méthodes de recherche qualitatives et quantitatives pour évaluer la performance énergétique des écoles nouvellement construites. Les résultats montrent que l'intensité moyenne de consommation énergétique des EEQNZ primaires était de 59 kWh/m²/an, tandis que pour les EEQNZ secondaires, elle était de 42 kWh/m²/an (Figure 2-8). La ventilation mécanique, les ordinateurs et les vidéoprojecteurs ont été identifiés comme des facteurs de consommation d'électricité importants. Les bâtiments présentaient une bonne isolation et étanchéité, bien que la majorité des écoles manquaient de protections solaires externes. Certains établissements avaient désactivé leurs systèmes de climatisation et de ventilation pour réduire les coûts d'électricité. Les modèles de référence développés peuvent orienter la conception, la réglementation et la certification des écoles écologiques et saines. L'étude recommande d'adopter ces modèles dans d'autres pays à climat similaire pour évaluer la performance énergétique des EEQNZ (Attia et al., 2020).

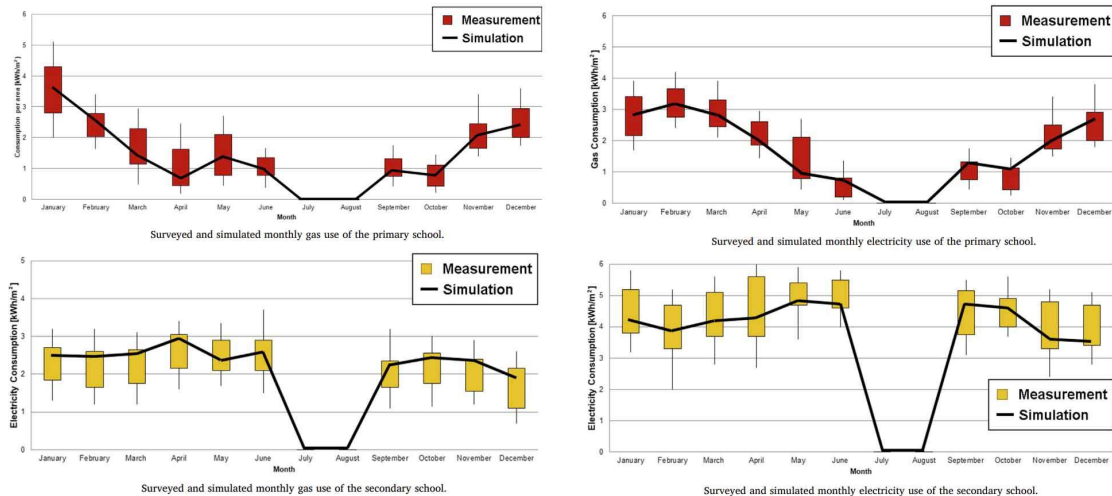


Figure 2-8 Comparaison des mesures réelles et des simulations des profils de consommation mensuelle d'électricité et de gaz pour les écoles secondaires et primaires (Attia et al. 2020)

2.5 Les impacts du changement climatique

Le changement climatique est considéré comme l'un des défis les plus importants de notre temps. Il a de nombreuses conséquences sur l'environnement, l'économie et la santé humaine. Parmi les conséquences les plus préoccupantes, on trouve les vagues de chaleur, qui sont devenues plus fréquentes et plus intenses au fil des ans en raison

de l'augmentation des températures mondiales. Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), les cinq années les plus chaudes jamais enregistrées ont toutes eu lieu depuis 2015, et la tendance devrait se poursuivre dans les années à venir (OMM, 2021). En Europe, les vagues de chaleur ont déjà causé des pertes humaines et économiques considérables, et leur fréquence et leur intensité devraient continuer à augmenter dans les décennies à venir. La Belgique ne fait pas exception à cette tendance, et a connu plusieurs épisodes de vagues de chaleur ces dernières années, avec des conséquences importantes sur la santé des personnes vulnérables, notamment les personnes âgées et les malades (Kovats et Hajat, 2008).

Une étude menée par Attia et al. (2020) examine l'impact du changement climatique sur la surchauffe dans les nouveaux bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle (nZEB) en Belgique (Figure 2-8). Cette recherche met en évidence l'importance de sources de données climatiques précises et de modèles de confort thermique adaptatifs pour estimer la surchauffe. Elle souligne également l'importance des mesures telles que la protection solaire externe, le refroidissement par ventilation et la masse thermique pour éviter les gains de chaleur solaire et dissiper la chaleur interne. L'étude constate que l'utilisation intensive de la ventilation mécanique pendant la nuit peut réduire les heures de surchauffe, mais avertit également que surestimer les effets du refroidissement par ventilation et de la masse thermique peut augmenter l'inconfort thermique.

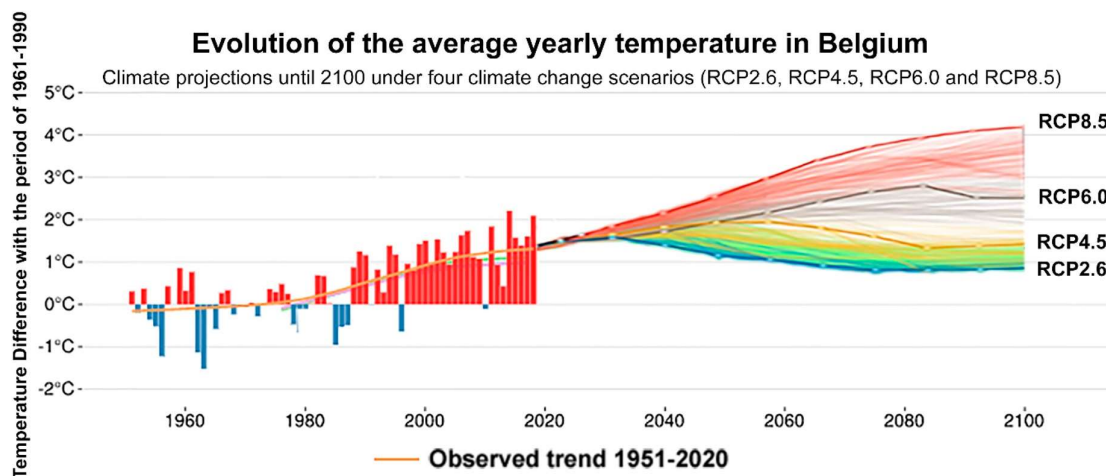


Figure 2-9 Fluctuation de la température moyenne en Belgique (par rapport à la normale de 1961 à 1990) au cours de la période allant de 1951 à 2100 (KMI, 2020)

Afin de comprendre les conséquences potentielles des vagues de chaleur et d'autres phénomènes météorologiques extrêmes à l'avenir, il est important d'examiner les scénarios possibles dans le futurs possibles. Les scénarios socio-économiques (SSP) ont été développés pour aider à explorer les voies possibles du développement futur en considérant un large éventail de facteurs économiques, démographiques et technologiques, ainsi que les politiques publiques (O'Neill et al., 2014). Les SSPs sont utilisés pour élaborer des projections de futurs possibles pour les changements climatiques, notamment les températures, les précipitations et les événements extrêmes, et sont souvent utilisés pour évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur l'environnement et la société.

Une étude menée en 2020 par l'Université catholique de Louvain (Université catholique de Louvain et al., 2020) en Belgique a montré que, selon les scénarios

SSP2 et SSP5 (Tableau 2-3), les températures maximales en été augmenteront d'environ 3 à 4°C en Belgique d'ici la fin du siècle. Cette étude a également indiqué que les vagues de chaleur deviendront plus fréquentes et plus intenses dans la plupart des régions de Belgique au cours des prochaines décennies.

SSP	Scenario	Estimated warming (2041–2060)	Estimated warming (2081–2100)	Very likely range in °C (2081–2100)
SSP1-1.9	very low GHG emissions: CO ₂ emissions cut to net zero around 2050	1.6 °C	1.4 °C	1.0 – 1.8
SSP1-2.6	low GHG emissions: CO ₂ emissions cut to net zero around 2075	1.7 °C	1.8 °C	1.3 – 2.4
SSP2-4.5	intermediate GHG emissions: CO ₂ emissions around current levels until 2050, then falling but not reaching net zero by 2100	2.0 °C	2.7 °C	2.1 – 3.5
SSP3-7.0	high GHG emissions: CO ₂ emissions double by 2100	2.1 °C	3.6 °C	2.8 – 4.6
SSP5-8.5	very high GHG emissions: CO ₂ emissions triple by 2075	2.4 °C	4.4 °C	3.3 – 5.7

Tableau 2-3 (IPCC, 2021)

Une autre étude menée en 2019 par l'Institut royal météorologique de Belgique a également montré que le nombre de jours de chaleur extrême en Belgique augmentera considérablement au cours du 21ème siècle, en particulier dans les régions de Flandre et de Bruxelles. Cette étude a utilisé les scénarios SSP pour modéliser l'évolution des températures en Belgique (van der Linden, P., et al. 2019).

Les vagues de chaleur sont de plus en plus fréquentes et intenses en raison du changement climatique, et ont des conséquences graves sur la santé humaine. Selon une étude menée par Watts et al. (2019), les vagues de chaleur ont causé plus de 166 000 décès supplémentaires par an dans le monde entre 1991 et 2018. En Europe, les vagues de chaleur ont causé près de 148 000 décès supplémentaires entre 2000 et 2019, selon une étude menée par Vicedo-Cabrera et al. (2021). Les populations les plus vulnérables, telles que les personnes âgées, les enfants et les personnes souffrant de maladies chroniques, sont les plus touchées. Selon une étude menée par Kovats et Hajat (2008), les personnes âgées de plus de 65 ans sont particulièrement vulnérables aux effets de la chaleur, en raison de leur diminution de la capacité à réguler la température corporelle. De plus, selon une étude menée par Zhang et al. (2019), les vagues de chaleur peuvent également aggraver les problèmes respiratoires, tels que l'asthme.

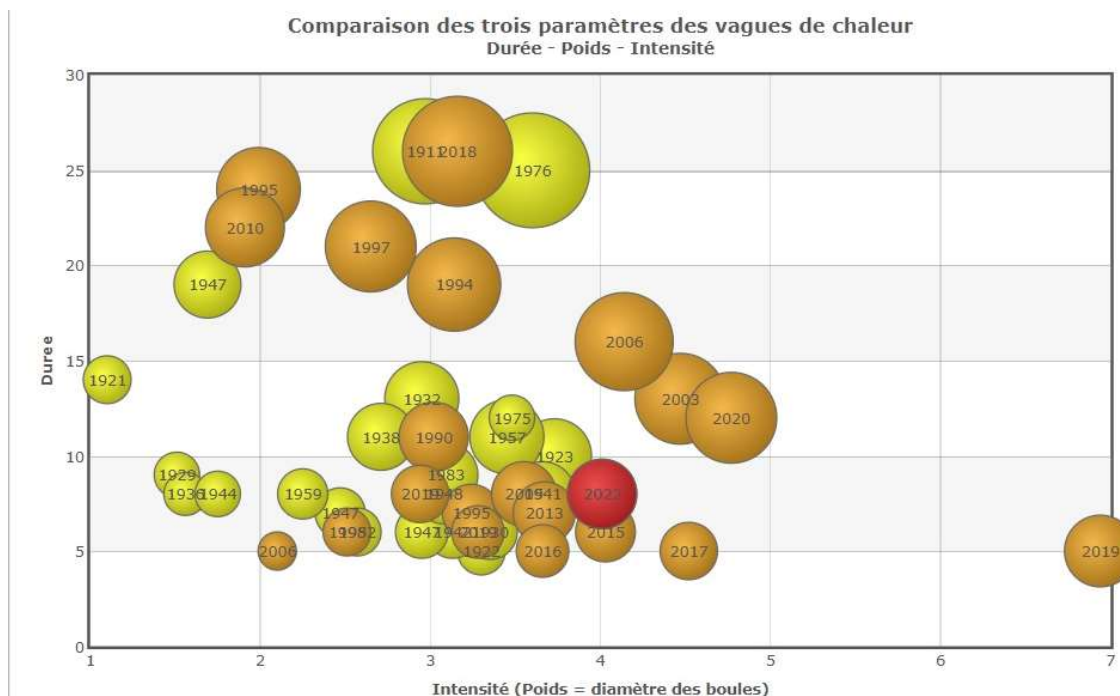


Figure 2-10 Bilan de la vague de chaleur d'août 2022. Meteobelgique

La Belgique n'est pas épargnée par les effets mortels des vagues de chaleur (Figure 2-8). Une étude menée par Sonck et al. (2021) a montré que la vague de chaleur de 2019 avait entraîné une augmentation de la mortalité de 30 % chez les personnes âgées de plus de 85 ans. Une autre étude menée par Vandentorren et al. (2006) a montré que la vague de chaleur de 2003 avait entraîné une augmentation de la mortalité de 54 % chez les personnes âgées de plus de 75 ans. Les villes sont particulièrement vulnérables aux vagues de chaleur, en raison de l'effet d'îlot de chaleur urbain, qui fait que les zones urbaines sont plus chaudes que les zones rurales environnantes. Selon une étude menée par Sailor et Pavlova (2003), les villes peuvent être jusqu'à 10°C plus chaudes que les zones rurales environnantes pendant une vague de chaleur.

3 Méthodologie

Ce chapitre comprend les phases de la méthodologie.

Pour rappel, les questions de recherche reposent sur les questions suivantes :

- a- Quels sont les risques de surchauffe à court et à long terme dans les maisons de soin en Wallonie ?
- b- Quelle est la performance énergétique actuelle d'une maison de soin à énergie quasi zéro, et comment se compare-t-elle aux normes et aux exigences réglementaires en matière d'efficacité énergétique ?
- c- Quel est l'impact de la chaleur estivale sur le confort des occupants et la consommation d'énergie dans une maison de soin à énergie quasi nulle en Wallonie?
- d- Comment la modélisation énergétique peut-elle aider à évaluer l'efficacité des systèmes de refroidissement dans une maison de soin à énergie quasi nulle pendant la période estivale ?
- e- Est-ce que les maisons passives augmentent le risque de surchauffe dans les climats tempérés océaniques ?

La modélisation énergétique des bâtiments est une méthode courante utilisée pour évaluer les performances énergétiques et le confort des occupants d'un bâtiment. Elle repose sur la création d'un modèle numérique du bâtiment pour simuler son comportement thermique et énergétique dans diverses situations. Toutefois, la précision de ces modèles dépend de nombreux paramètres tels que les caractéristiques du bâtiment, les données météorologiques et les comportements des occupants, ce qui nécessite une validation en comparant les résultats des simulations avec des données réelles collectées sur le terrain.

Dans cette méthodologie, l'objectif est d'analyser le confort des utilisateurs et la performance énergétique d'un bâtiment de maison de repos à énergie quasi-zéro (**Building category I – EN 16798-1**) en cas de canicule. Pour cela, il est nécessaire de déterminer les données climatiques nécessaires pour évaluer le bâtiment durant l'été et les périodes estivales futures (Tableau 3-1). La station métrologique utilisé est celle de la ville Française Lille qui se trouve dans le zone climatique 4A, en raison de sa proximité avec le site (Kain, Belgique), avec l'inclusion de l'îlot de chaleur urbain.

Ville	Latitude	Longitude	Elévation	Zone climatique
Lille - France	50,57	3,098	48	4A

Tableau 3-1 IEA Annex 80 – Wether data Task force

Une surveillance de mesures réelles et des données de consommation énergétique réelle du bâtiment sont ensuite collectées pour effectuer une calibration du modèle et améliorer sa précision et sa fiabilité. Le modèle calibré permettra ensuite de simuler différents scénarios futurs à court terme et à long terme, tels que des changements dans les conditions météorologiques pendant les vagues de chaleur estivales.

L'analyse des résultats obtenus pour chaque scénario permettra d'évaluer la performance énergétique et le confort des utilisateurs, en mettant l'accent sur les quatre zones occupées dans le bâtiment. Elle permettra également de mesurer l'impact de chaque scénario sur la consommation énergétique du bâtiment et d'identifier les zones où des améliorations peuvent être apportées.

Cette méthodologie (Figure 3-1), qui repose sur une modélisation énergétique précise et l'utilisation de données réelles, offre une approche systématique pour évaluer la performance énergétique et le confort des utilisateurs d'un bâtiment. Les résultats obtenus peuvent être utilisés pour orienter les décisions concernant les améliorations futures et les investissements dans le bâtiment, tout en contribuant à réduire les coûts énergétiques et à améliorer l'expérience des utilisateurs du bâtiment.

Les caractéristiques du bâtiment seront d'abord déterminées (enveloppe et système de CVC); ensuite, le bâtiment sera divisé en différentes zones en fonction de la consommation énergétique de chaque zone.

La qualité de confort thermique sera évaluée en utilisant le modèle PMV/PPD, ainsi que l'évaluation de la survie passive des utilisateurs (ASHRAE 55 and LEED 4.1) et le bilan énergétique de bâtiment.

Le bâtiment sera calibré sur la base des valeurs Ashrae 55 ASHRAE Guideline 14 - NMBE et CV(RMSE).

Rahif, R., et al. (2022)

Une série de scénarios sera testée pour évaluer le confort des patients, la performance énergétique ainsi que la résistance du bâtiment aux vagues de chaleur, notamment :

- Les changements climatiques à long terme actuels, à moyen terme et futurs
- Les événements climatiques extrêmes à court terme actuels, à moyen terme et futurs.

Une fois que le confort thermique aura été évalué, il sera important de prendre en compte les indicateurs d'utilisation d'énergie du cadre IAE Annex 80-Subtask B:

L'IOhD (Indoor Overheating Degree) et l'AWD (Ambient Warmness Degree) sont utilisés pour évaluer la surchauffe à l'intérieur du bâtiment. De plus, l'indice CCOR (Climate Change Overheating Resistivity) est employé pour évaluer la résistance du bâtiment à la surchauffe (Rahif, R., et al., 2022).

Enfin, un bilan énergétique est réalisé pour analyser les variations de consommation d'énergie dans les différents scénarios étudiés.

Cadre Applicatif:

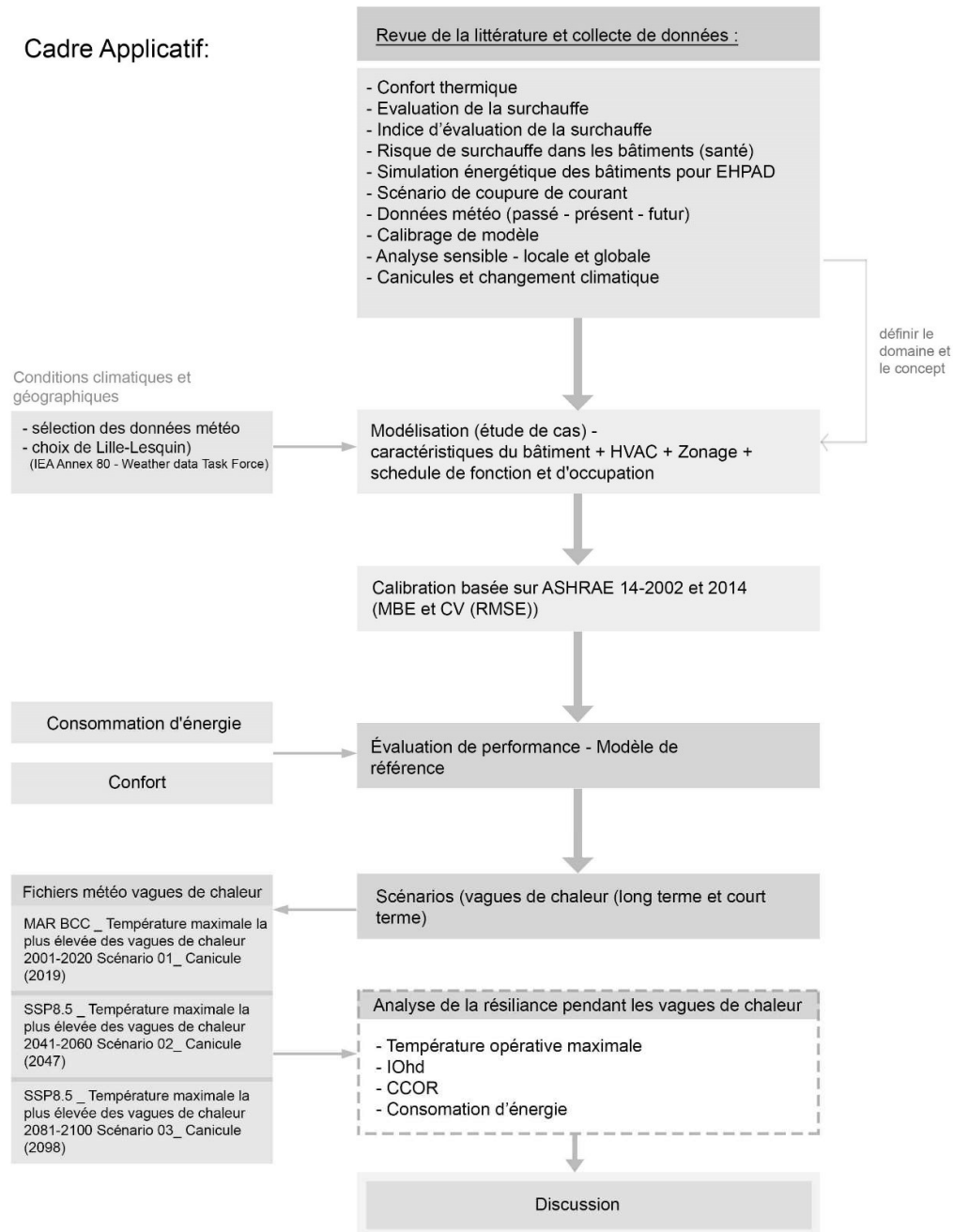


Figure 3-1 Cadre méthodologique présentant les étapes de travail



Figure 3-4 coupe détailler du mur extérieur ossature bois

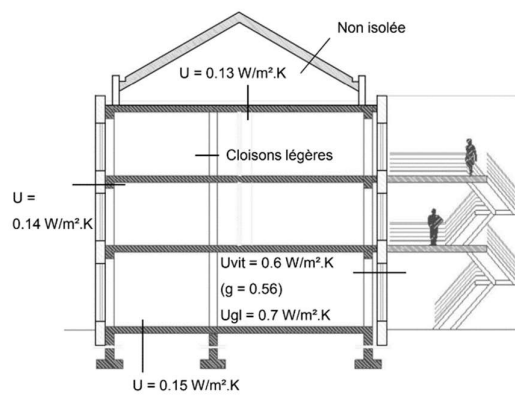


Figure 3-5 caractéristiques thermique de parois extérieur

L'enveloppe extérieure est composée de caisson léger en bois (Figure 3-4), tandis que les planchers sont en béton. Toutes les fenêtres sont à triple vitrage, et la façade sud a des stores extérieurs qui fonctionnent automatiquement lors les températures élevés, sans aucune dérogation possible par occupants.

La figure 3-5 et les tableaux 3-2 et 3-3 présentent les caractéristiques de l'enveloppe extérieure du bâtiment.

	Façade extérieure bardage bois	Façade extérieure crépis	Façade élévation Esc/Asc	Façade Quai	Façade patio	Dalle sur sol
Catégorie	murs	murs	murs	murs	murs	plancher
Région	Belgique	Belgique	Belgique	Belgique	Belgique	Belgique
Couche externe						
Matière	Panneaux fibre bois	Enduit	Laine de roche	Enduit	Enduit	Misapor (v. cellulo)
Épaisseur (mm)	80	10	80	10	10	550
Matière	Flocage	Panneaux fibre bois	Laine de roche	Panneaux fibre bois	Fibre miné. à crépir	Béton armé
Épaisseur (mm)	200	80	200	80	280	600
Matière	OSB classe 3	Flocage	Béton armé	Flocage	Béton armé	Chape en béton
Épaisseur (mm)	10	200	200	200	250	120
Matière	Laine de roche	OSB classe 3		OSB classe 3		
Épaisseur (mm)	60	10		10		
Matière	Plafonnage	Laine de roche		Laine de roche		
Épaisseur (mm)	25	60		60		
Matière		Plafonnage		Plafonnage		
Épaisseur (mm)		25		25		
Couche intérieure						
Épaisseur totale (mm)	375	385	480	385	540	1270
Valeur U totale (W/m²K)	0.138	0.142	0.169	0.138	0.137	0.147

Tableau 3-2

	Plancher 1er étage sous balcon	Plancher 1er étage au dessus du SAS	Toit (extension)	Toit entre Asc/Esc
Catégorie	plancher	plancher	Toiture	Toiture
Région	Belgique	Belgique	Belgique	Belgique
Couche externe				
Matière	Mousse résolique	Laine de roche	Membrane bitumeuse (Divers) - λ U: 0.23	Laine de roche
Épaisseur (mm)	150	280	4	320
Matière	Béton armé	Lame d'air non-vent	Kingspan Insulation Kooltherm K8 - λ U: 0.021	Chape de béton
Épaisseur (mm)	260	370	140	240
Matière	Chape en béton	Béton armé	Béton lourd normal armé	Béton armé
Épaisseur (mm)	100	260	260	250
Matière		Chape en béton	Béton lourd normal non armé	
Épaisseur (mm)		100	100	
Couche intérieure				
Épaisseur totale (mm)	510	1010	504	810
Valeur U totale (W/m2K)	0.123	0.13	0.13	0.118

Tableau 3-3

3.1.2 Zonages

Le bâtiment a été divisé en 24 zones thermiques (Figure 3-6, 3-7) selon l'horaire d'utilisation d'espace, par exemple, les chambres sont utilisées toute la journée, tandis que dans les bureaux le travail s'arrête à 17:00h.

De plus, le grenier a été divisé en trois sections, bien qu'il soit à l'extérieur de l'enveloppe en raison de la présence de machines de ventilation et de tubes pour le pompage de l'eau chaude provenant des panneaux solaires thermiques. Aussi, l'endroit devient plus chaud en été du fait de son exposition directe au soleil sans couche isolante.

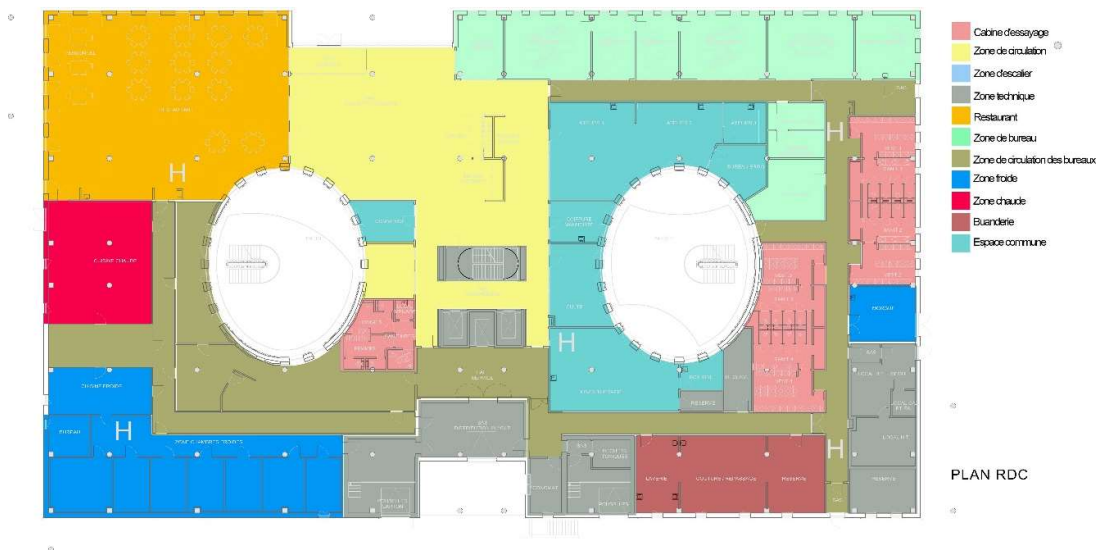


Figure 3-6 Zonage du plan RDC

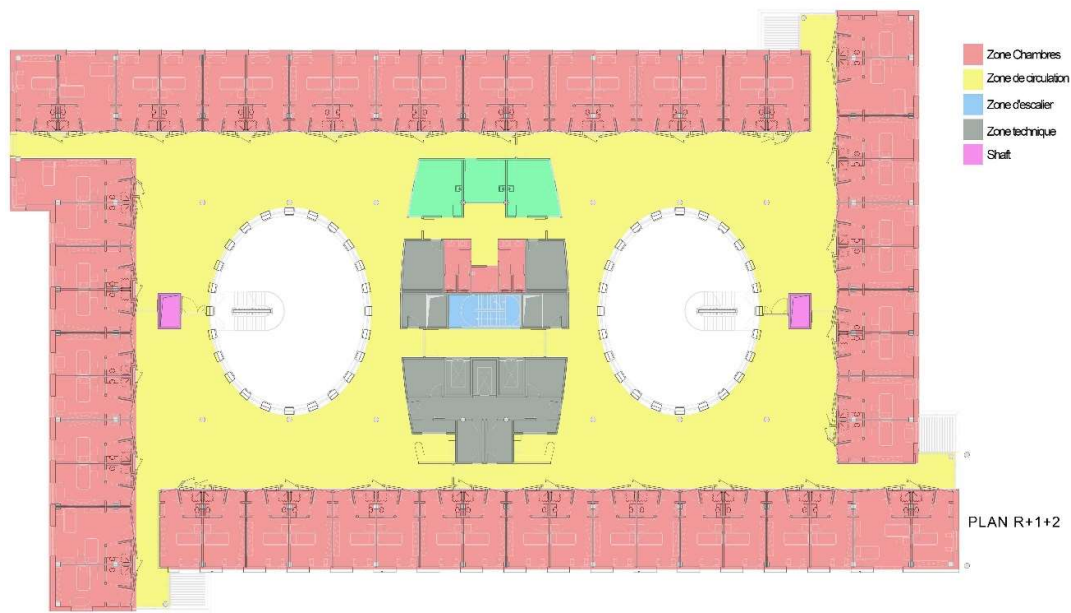


Figure 3-7 Zonage du plan R+1+2

3.1.3 Spécification CVC

3.1.3.1 Centrale de traitement d'air (CTA)

Le bâtiment comprend deux grandes unités de ventilation CTA situées dans le grenier dont l'une sert la cuisine et le restaurant et l'autre les chambres des personnes âgées (figure 3-8, 3-9). L'une de ces unités contient un échangeur de chaleur en coupe transversal. Quant aux couloirs, fumoirs et autres sections, ils sont reliés à quatre petites unités de ventilation CTA



Figure 3-8 Centrale de traitement d'air qui servent les chambres

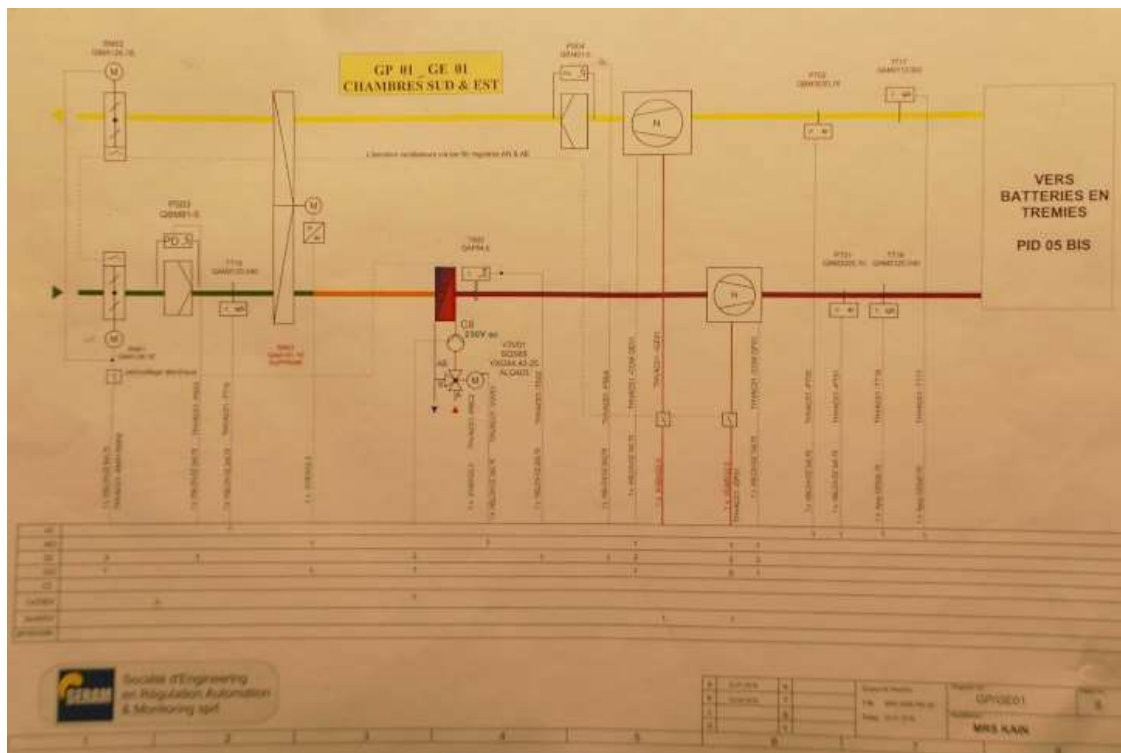


Figure 3-9 Centrale de traitement d'air qui servir les chambres - carte mécanique

L'utilisateur a la possibilité de régler le débit d'air dans la pièce, mais il ne peut pas contrôler les températures. Le système de ventilation utilise une batterie chaude chauffée par la pompe à chaleur pour réchauffer l'air, suivi d'un micro-coil dédié pour chaque pièce, qui refroidit l'air en fonction de la température de l'air provenant de la centrale de traitement d'air (CTA).

Pendant la période estivale, le débit d'air est maintenu entre 25-30°C, sachant que la température de l'air entrant est de 19°C en été, en fonction de la température extérieure du bâtiment.

La chambre simple est conçue pour un débit d'air de 100 m³/h, tandis que la chambre double nécessite un débit d'air de 150 m³/h. Le débit d'air est réduit la nuit car le système de ventilation émet un peu de bruit. De plus, tous les CTA sont équipés de volume d'air variable (VAV).

3.1.3.2 Système de chauffage et de refroidissement

Le système de chauffage et de refroidissement du bâtiment est basé sur des pompes à chaleur air-eau. Quatre pompes à chaleur sont installées sur le toit du bâtiment

(Figure 3-10, 3-11), fonctionnant par paire en série. Ces pompes sont alimentées par un moteur gaz à combustion interne Toyota d'une puissance de 80 kW.



Figure 3-10 les 4 pompes a chaleurs - multi-combinaison 4x AWGP450F1 Toyota

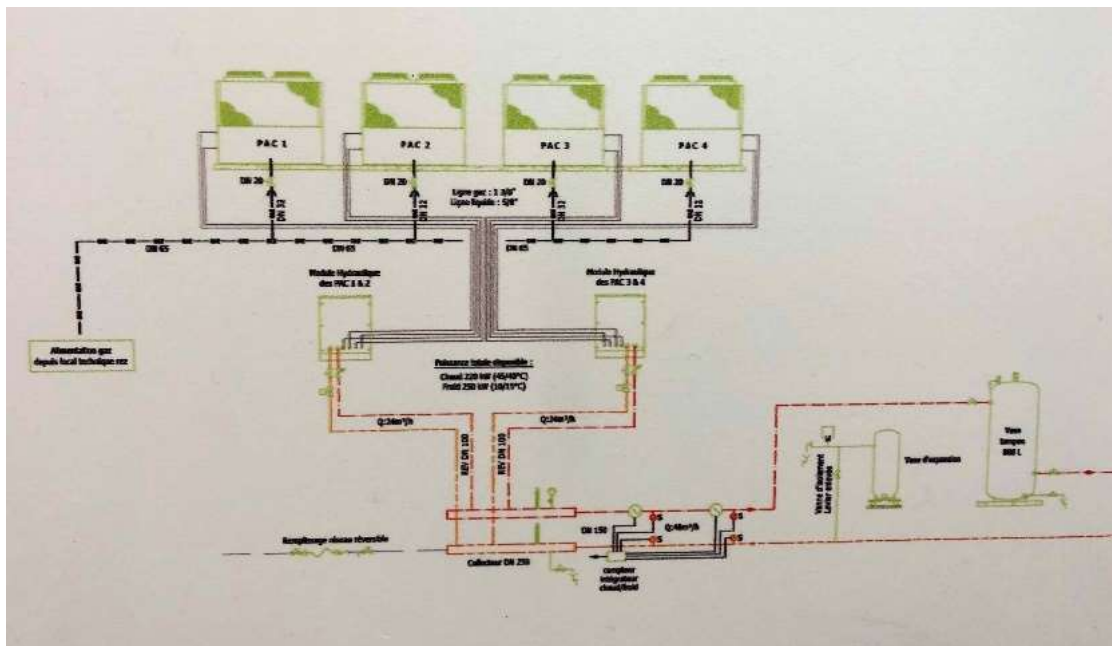


Figure 3-11 les 4 pompes a chaleurs - multi-combinaison 4x AWGP450F1 Toyota - carte mécanique

Étant donné que les personnes âgées sont très sensibles, la température du bâtiment est maintenue constamment à 24,5°C tout au long de l'année.

3.1.3.3 Panneaux solaires



Figure 3-12
caractéristiques
techniques des panneaux
solaires thermiques 98X
T031-EN-05-Optisun 245

	Optisun 245 H	Optisun 245 V
Item code	101.023	101.024
Orientation	Horizontal (landscape)	Vertical (portrait)
Gross area following EN 12975	2,65 m²	
Aperture area following EN 12975	2,45 m²	
Dimensions (Length x width x thickness)	2.356 mm x 1.120 mm x 85 mm	
Performance following EN 12975	$\eta_{0,0} = 82,4\%$; $a_0 = 2,905 \text{ W/m}^2\text{K}$; $a_1 = 0,030 \text{ W/m}^2\text{K}^2$	
Coefficient for SOLO calculation	B=86%; K=5,31 W/m²K	
Frame material	Aluminium	
Insulation	Rockwool (40 mm on the back, 10 mm on the side)	
Effective heat capacity	6,8167 kJ/(m²K)	
Glass	Solar glass 4mm, Class U1, $\alpha = 96-91\%$	
Absorber capacity	3,01 liters	2,44 liters
Absorber	Collector : CUØ22 x 0,8 ; Coil: CUØ10 x 0,5	
Heat transfer fluid	Optifluid only (glycol with corrosion inhibitor)	
Stagnation T°C following EN 12975	208°C	
Maximum working pressure	6 bar	
Weight	+/- 49 kg	
Hydraulic fittings	Use Opticonnect fittings specially designed for these sensors	
Certification	Solar Keymark, CE conformity	
Mounting	Flat roof (10°-80°), Slope roof (10°-80°) or roof integration (20°-60°)	

Tableau 3-4 caractéristiques techniques des panneaux solaires thermiques 98X T031-EN-05-Optisun 245 - fiche technique

Le bâtiment est équipé de 98 panneaux solaires thermiques (Figure 3-12, Tableau 3-4) chacun mesure 2,45 m² qui alimentent un réservoir de 3000 L. Le premier objectif de cette quantité est l'eau chaude sanitaire, un chauffe-eau qui fonction au gaz viens en complément lorsque les panneaux solaires ne répondent pas au besoin en hiver. Ce système est totalement séparé du réseau de la pompe à chaleur. La température de l'eau est fixée à 65 degrés Celsius pendant la journée, tandis que la température de l'eau baisse de dix degrés la nuit pour économiser de l'énergie.

3.1.3.4 Chambre froide

Le rez-de-chaussée comprend quatre chambres froides destinées à la conservation des aliments (Figure 3-13). Ces chambres sont refroidies par des groupes frigorifiques électriques, qui sont des systèmes de refroidissement puissants et efficaces. Ces groupes ont une puissance comprise entre 4,5 et 2,7 kilowatts

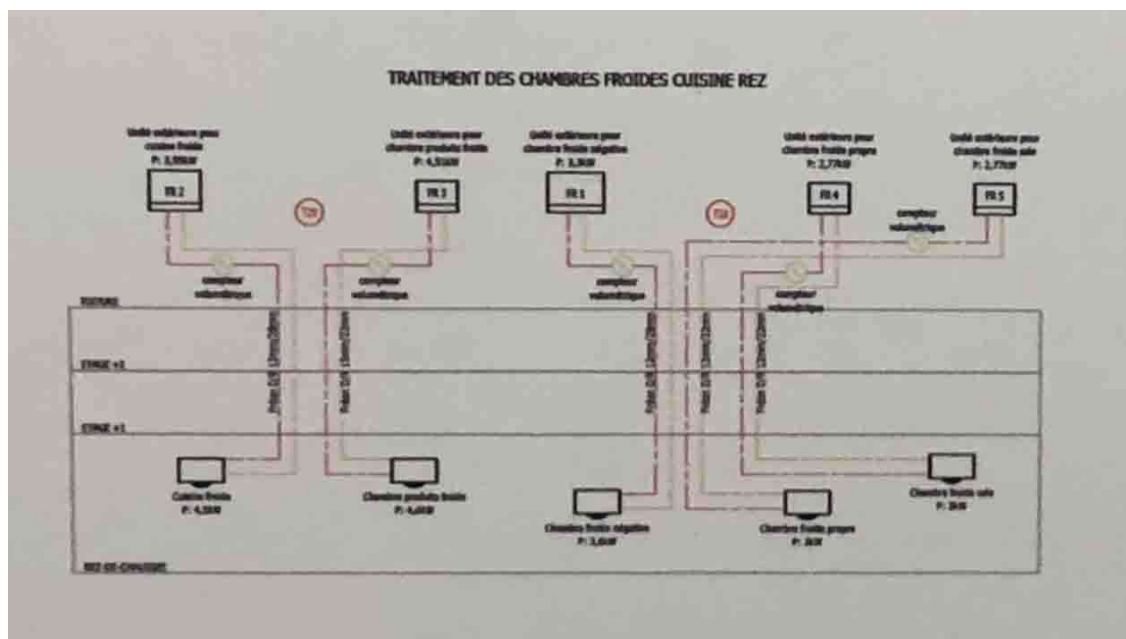


Figure 3-13 système de groupe frigorifique - carte mécanique

3.2 Opérationnalisation : variables, indicateurs

Les modèles énergétiques du bâtiment permettent de simuler les interactions entre l'environnement, l'enveloppe, les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC), ainsi que leurs commandes respectives. Il s'agit d'un processus où chaque élément est interdépendant et a un impact sur les autres. Le bilan thermique du bâtiment est obtenu en effectuant une simple opération arithmétique qui soustrait les pertes aux gains thermiques. Pour obtenir le confort thermique souhaité, qui est l'objectif final, le résultat peut se traduire soit par une consommation d'énergie réduite, soit par une perte ou un gain dans le bilan énergétique.

Dans la Figure 3-14, 3-15, la relation entre les pertes et les gains est quantifiée par un exemple concret de chauffage, illustrant l'impact significatif de l'enveloppe sur la performance énergétique du bâtiment.

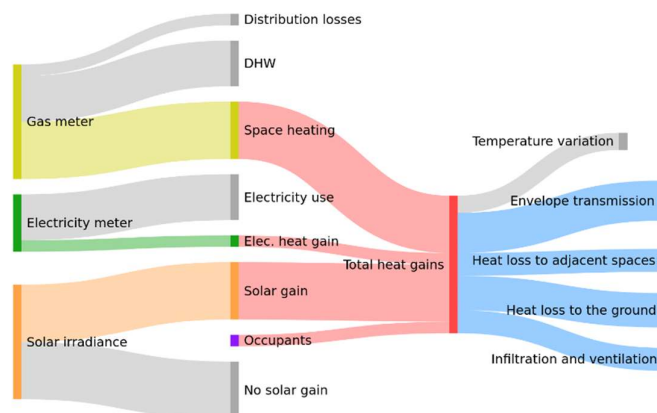


Figure 3-14 Décomposition des gains et des pertes de chaleur dans une zone chauffée - Building energy statistical modelling. (n.d).

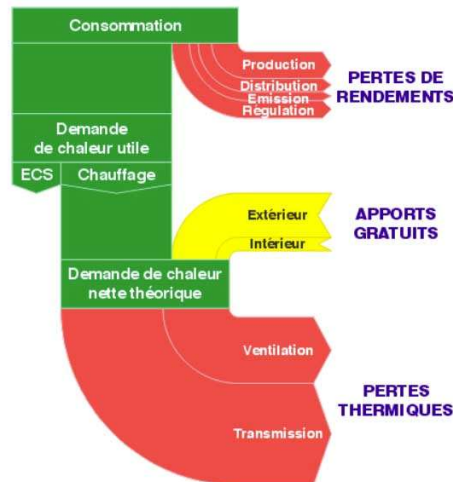


Figure 3-15 Techniques de construction durable des bâtiments II Enveloppe

3.2.1 Variables

Pour cette étude, les variables causales et les variables effectrices ont été classées par catégories, chaque variable a une sous variable et indicateur qui détermine son unité de mesure, la norme à travers laquelle nous pouvons évaluer les résultats et l'outil utilisé pour obtenir sa valeur.

3.2.1.1 Variables causales

Parmi les variables causales, il y a les variables externes et internes (Tableau 3-5). Par exemple, la température extérieure qui est un paramètre non modifiable. Il est obtenu à partir des données météorologiques et est elle-même produite par MAR (Modèle Atmosphérique Régional) qui a été adaptée et validée par des météorologues en Belgique.

variable	Sous-variable	indicateur	standard	outil
Température extérieure	Fichier climat régional	Contemporain-mi-futur-futur	TMY	Excel
Gain interne	Masse thermique appareils_Personnes	KWh/m²	EN1397	EnergyPlus
Système d'ombrage	Intérieur extérieur	Ratio d'ombre	Standard Maison Passive	Revit
Caractéristiques du mur	Valeur U	m² du mur	Standard Maison Passive	Design Builder
Système de ventilation	Mécanique naturel ou	changement du volume d'air	Standard Maison Passive	Design Builder
Caractéristiques des fenêtres	Valeur U	m² de fenêtre	Standard Maison Passive	Design Builder
AWD	Vague de chaleur	Degré Celsius	EN16798	Design Builder
Façade vitrée	Ratio fenêtre/mur	m² de vitre	Standard Maison Passive	Revit

Tableau 3-5 variables de cause

Un avantage de ce modèle est que les données météorologiques générées ont une grande précision spatiale et temporelle (Figure 3-16). Ces données sont disponibles pour plusieurs périodes de temps et pour trois scénarios, Contemporain-mi-futur- et futur; Ces scénarios fournissent un ensemble de prévisions futures sur le changement climatique et l'ampleur des augmentations de température attendues jusqu'en 2100 (Doutreloup et al. 2022)

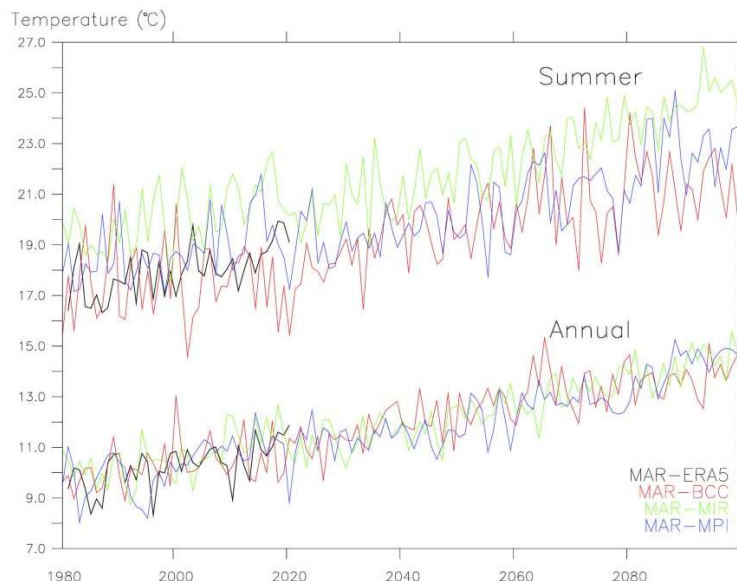


Figure 3-16 Legends entre 1980 et 2100 selon le scénario SSP5-8.5

L'utilisation de ce type de fichiers climatiques dans les simulations aide à comprendre l'avenir ou le devenir du bâtiment et des utilisateurs. D'autant que les simulations

traitent d'une maison de soin, les températures élevées dans les bâtiments affecte négativement la santé des usagers, et fait grimper le niveau des décès, notamment pour ceux qui souffrent de problèmes de santé. (Liu, et all. 2017).

Parmi les variables internes, il y a les caractéristiques de l'enveloppe, les systèmes de protection solaire, la CVC. Toutes ces variables sont sujettes à modification. Par exemple, il est possible de contrôler la quantité d'air pompé, en ajustant le pourcentage d'ombrage ou le coefficient de gain solaire des fenêtres. Chacune de ces variables est analysée par rapport à son impact sur le confort thermique et la consommation d'énergie.

Troisièmement, AWD (ambient warmnes degree) qui transmettant la gravité de la chaleur extérieure, ou $T_{out,a,i}$ est la température de bulbe extérieur humide.

$$AWD = \frac{\sum_{i=1}^N [(T_{out,a,i} - T_b)^+ \times t_i]}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad (4)$$

La canicule en Belgique a été divisée en deux types, le premier est une vague de chaleur régressive avec une température maximale supérieure à 25 et une période plus courte de 5 jours , à condition que 3 de ces jours soient avec des températures supérieures à 30 (RMI, 2020). Tandis que l'autre, qui est la vague de chaleur attendue, aura une température maximale de 29,6, voire plus, et pas moins de 18,2 pour trois jours consécutive (Brits et al., 2009).

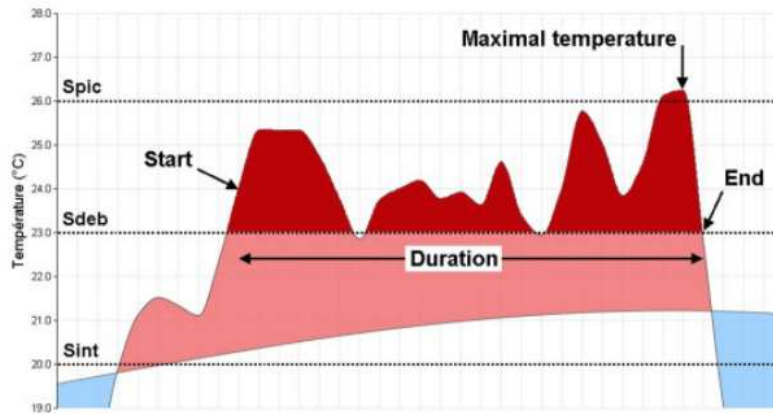


Figure 3-17 Ouzeau et al. (2016) : La zone rouge est le point de début et fin de la canicule à condition que les températures ne descendent pas en dessous des frontières de la zone rose.

3.2.1.2 Variables effectrices

variable	Sous-variable	indicateur	standard	outil
CCOR	IOD	Degré Celsius	EN16798	Design Builder
Confort thermique	Heures surchauffe	de heures d'heures annuelles de températures supérieures à 26 C.	EN16798	Transyst
Confort d'occupation	PMV / PPD	Taux de travail / taux métabolique	EN 16798	Testo
Consommation d'énergie	Consommation d'énergie annuelle	Kwh/m²	EN 13979	Energyplus
Émission de dioxyde de carbone	Émissions annuelles de carbone	Equi. Kg/co2/ans	EN 15978	Totem

Tableau 3-6 variables d'effet

Les variables effectrices font référence aux paramètres ou aux facteurs qui influencent directement la consommation d'énergie d'un bâtiment ou ses performances énergétiques. Ces variables peuvent être ajustées ou modifiées pour évaluer l'impact sur la consommation d'énergie et identifier les opportunités d'amélioration de l'efficacité énergétique (Tableau 3-7).

Le bâtiment est basé sur le Code wallon de l'Action sociale et de la Santé AVIQ CWASS, qui définit le confort thermique comme 18°C (hiver extrême) et max 27°C (été extrême) pour protéger les personnes âgées. Aujourd'hui, cependant, le bâtiment maintient une température constante de 24,5 degrés tout au long de l'année. Ainsi, le confort thermique sera évalué sur la base d'une norme fixe et invariable basée sur le résultat thermique que nous obtiendrons grâce au Design Builder.

CCORF (Climate change overheating resistivity) est l'indicateur de résistivité qui quantifie la surchauffe dans le bâtiment par couplage de l'ambiance extérieur et l'ambiance intérieur (AWD et IOD). il faut que cette valeur soit toujours CCOR >1 pour pouvoir faire face à l'excès de contraintes thermiques externes (Rahif et all. 2022).

$$\frac{1}{CCOR} = \frac{\sum_{Sc=1}^{Sc=M} (IOD_{Sc} - \overline{IOD}) \times (AWD_{Sc} - \overline{AWD})}{\sum_{Sc=1}^{Sc=M} (AWD_{Sc} - \overline{AWD})^2} \quad (5)$$

Sc est le compteur de scénario météo et M est le nombre des scenarios

IOD est l'indicateur de performance (Indoor Overheating Degree), qui quantifier la gravité du risque de surchauffe pour multizone du bâtiment, en tenant compte de la sévérité et de la fréquence des températures intérieures élevées (Rahif et all. 2021). Cette intensité est déterminée par le processus arithmétique :

$$IOD = \frac{\sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^{N_{occ}(z)} [(T_{op,i,z} - T_{comf,z,i})^+ \times t_{i,z}]}{\sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^{N_{occ}(z)} t_{i,z}} \quad (6)$$

IOD est la somme de la valeur positive de la différence entre la température opérative intérieure des zones ($T_{op,i,z}$) et les limites de confort adaptative ($T_{comf,z,i}$) moyenne sur le nombre total d'heures d'occupation dans la zone (Rahif et al. 2022).

Le confort thermique est le rapport de la satisfaction d'une personne à son environnement thermique, il est subjectif et peut varier d'une personne à l'autre. Il est affecté par les vêtements, le type de nourriture, l'activité physique, la production d'énergie par le métabolisme et d'autres facteurs externes tels que la température opérative, l'humidité, la vitesse de l'air et les échanges radiatifs avec l'environnement.

Afin d'évaluer ce confort, deux critères ont été retenus : statique et adaptative (PMV/PPD) (Figure 3-18). ISO 7730 "Ergonomie des ambiances thermiques". PMV (**Predicted Mean Vote**) prédit les sentiments d'un groupe d'individus en votant dans un rapport compris entre -3 et 3 du plus chaud au plus froid, zéro étant le niveau de confort le plus élevé. tandis que le PPD (**Predicted Percentage of Dissatisfied**) prédit le pourcentage de personnes insatisfaites.

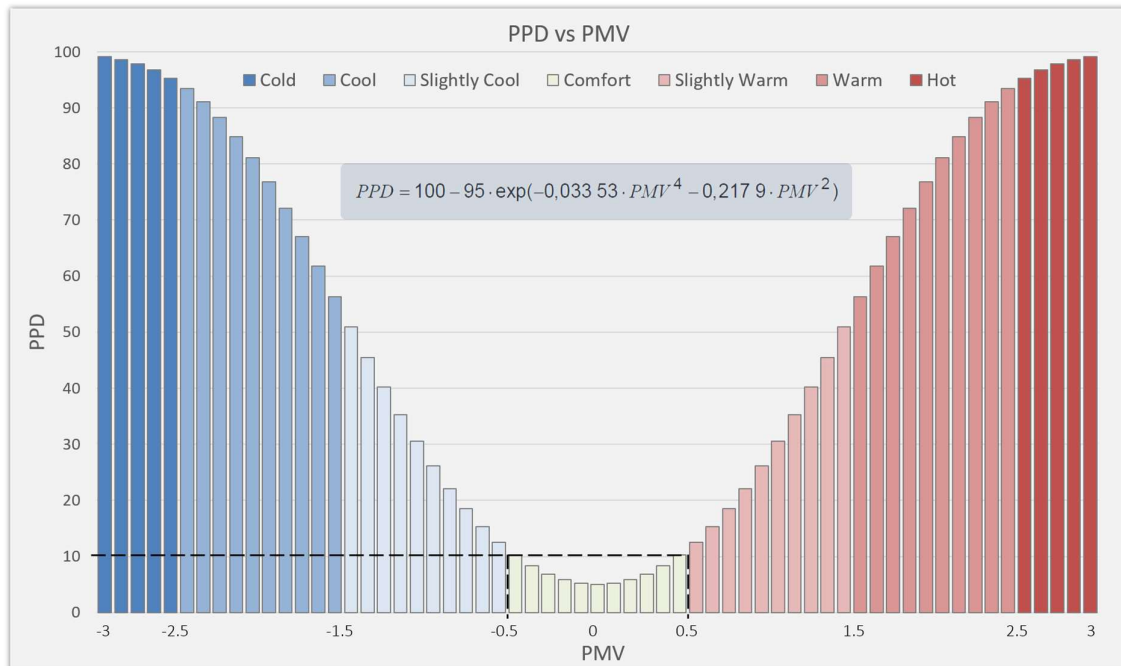


Figure 3-18 Kumar, P. (2019), *Insatisfaction prévue en pourcentage vs Vote moyen prédit*

Le bâtiment est basé sur le Code wallon de l'Action sociale et de la Santé AVIQ CWASS, qui définit le confort thermique comme 18°C (hiver extrême) et max 27°C (été extrême) pour protéger les personnes âgées. Aujourd'hui, cependant, le bâtiment maintient une température constante de 24,5 degrés tout au long de l'année. Ainsi, le confort thermique sera évalué sur la base d'une norme fixe et invariable basée sur le résultat thermique que nous obtiendrons grâce au Design Builder.

La consommation d'énergie est l'une des variables les plus influentes, car elle est liée au comportement des utilisateurs et aux changements climatiques et il est difficile de la fixer.

Afin de déterminer la bonne consommation d'énergie dans le bâtiment, il n'est pas possible de se fier uniquement à la période estivale, mais la consommation doit être étudiée tout au long de l'année. Charge annuelle de refroidissement et puissance annuelle de la source de refroidissement en (KWh/m²), Charge de chauffage annuelle et puissance annuelle de la source de chauffage en (KWh/m²), et le charge de pointe en (KW) (Attia et all. 2021)

3.3 Collecte des données

3.3.1 Visite de bâtiment

Nous avons effectué notre première visite du bâtiment avec une équipe de chercheurs de l'Université de Liège (SBDL) dirigée par S. Attia, A. Deepak et R. Rahif, ainsi que MK Engineering (bureau d'étude énergétique) représentée par M. Velickovic. Durant cette visite, nous avons découvert le bâtiment lors d'une visite extérieure, qui nous a permis de prendre des photos avec un appareil photo numérique, ainsi qu'une vidéo aérienne filmée à l'aide d'un drone offert par SBDL ULG. Cette vidéo nous a permis de visualiser le toit ainsi que le nombre de panneaux solaires, et elle a grandement contribué au processus de conception 3D.

Par la suite, nous sommes entrés dans le bâtiment et avons découvert tous les services internes. La visite a été guidée par le responsable technique du bâtiment, qui nous a expliqué les différents systèmes en place et nous a offert une vue sur l'ensemble depuis le grenier. Nous avons ensuite rencontré le responsable technique et le gestionnaire du bâtiment pour discuter de certains problèmes liés aux systèmes de ventilation, de refroidissement, à la structure du bâtiment ainsi qu'au nombre d'utilisateurs et aux variables rencontrées depuis l'ouverture du bâtiment. Nous avons pris soin de noter toutes les informations recueillies, que nous avons ensuite rassemblées dans un livre de blog pour nous assurer que nous étions tous d'accord sur les points clés.

Au cours de cette visite, l'appareil Testo 400 offert par SBDL ULG a été présenté aux participants et une autorisation a été obtenue pour son installation lors de la prochaine visite. Le responsable technique et le gestionnaire ont également été informés de l'objet de notre étude ainsi que de son importance pour l'avenir du bâtiment et des usagers.

3.3.2 Base de données

La collecte de données pour cette étude a été réalisée à partir de différentes sources. MK Engineering a fourni les plans d'urbanisme, les fiches techniques, les rapports liés à la fonctionnalisation du bâtiment (PHPP, PEB...) ainsi qu'une présentation expliquant le bilan énergétique du bâtiment. IMK Engineering également parrainé l'étude.

Pour mesurer le confort dans le bâtiment, un appareil Testo 400 a été installé à l'intérieur d'une pièce en été pour recueillir des données relatives à la température, à

l'humidité et à la vitesse de l'air (Figure 3-19). Le bâtiment a été visité chaque mois pendant la période de collecte d'informations pour vérifier le bon fonctionnement de l'appareil et extraire les informations collectées. Les infirmières ont également été interrogées sur les comportements de vie des patients à l'intérieur du bâtiment.



Figure 3-19 installation de l'appareil Testo 400 - Taha Safi

Les factures d'électricité, de gaz et d'eau ont été fournies par le directeur de la maison de soins, L. Samyn. Ces factures ont servi de base pour les simulations et ont permis de connaître la consommation réelle du bâtiment.

La disponibilité de données météorologiques précises et fiables est essentielle pour soutenir les efforts de recherche et de développement visant à améliorer la performance énergétique des bâtiments et à promouvoir un avenir plus durable et plus respectueux de l'environnement. Toutes les données météorologiques générées SSP ont été prises à partir du référentiel en ligne ouvert Zenodo (<https://doi.org/10.5281/zenodo.5606983>, Doutreloup et Fettweis, 2021), et sont produites dans le cadre du projet de recherche OCCuPANT (<https://www.occupant.uliege.be/> - ULiège).

Il est important de souligner que toutes ces données sont accessibles librement et sont mises à disposition de la communauté scientifique dans le but de faciliter la recherche et le développement dans le domaine des simulations énergétiques des bâtiments.

3.3.3 Entretien

Des entretiens avec le chercheur R. Rahif ont permis d'obtenir des informations sur la résistance du bâtiment à la chaleur extérieure et sur l'utilisation de fichiers climatiques.

Des experts du domaine de l'énergie du bâtiment ont été interrogés à l'extérieur de l'université afin de mieux comprendre les données recueillies.

Une série d'entretiens a eu lieu avec le chercheur M. Amer, spécialisé dans le domaine de l'énergie du bâtiment, pour comprendre la structure du système mécanique complexe dans le bâtiment et pour comprendre les plans mécaniques.

Des chercheurs dans le domaine de la météorologie au Liban ont été consultés pour obtenir plus d'informations sur les fichiers météorologiques futurs.

Les scénarios proposés ont été discutés avec le chercheur A. Deepak et finalement approuvés à l'unanimité lors de la réunion de SBDL.

3.4 Analyse des données

Le problème de la consommation non renouvelable des ressources énergétiques est aujourd'hui l'un des enjeux les plus importants en termes environnementaux et économiques pour les bâtiments. Les ingénieurs et chercheurs ont donc recours à des logiciels de simulation pour garantir des résultats énergétiques, modéliser le fonctionnement énergétique du bâtiment et évaluer les consommations avant la construction, et ce grâce à des modèles numériques (Revue pratique des logiciels de simulation énergétique dynamique).

3.4.1 DesignBuilder

Il existe différents logiciels de simulation sur le marché, et les meilleurs sont choisis après évaluation et feedback par les utilisateurs. De plus, le logiciel est testé en utilisant Bestest (Judkoff, R. et Neymark, J. 1995), ce qui permet aux développeurs d'évaluer les performances de leurs outils d'audit pour la modélisation de la consommation d'énergie.

Dans ce projet, DesignBuilder a été utilisé comme interface visuelle externe pour Energy Plus. Cette interface permet l'analyse de la consommation d'énergie et du confort thermique en divisant le bâtiment en différentes zones proportionnelles à des charges thermiques similaires. Energy Plus, développé aux États-Unis par le Department of Energy (DOE), est utilisé par des ingénieurs, des architectes et des chercheurs (Bertrand, S. et Université de Liège). Design Builder est facile à utiliser et se compose de deux plateformes (Figure 3-20) : la première traite toutes les données liées au bâtiment, telles que le système de construction, les propriétés des matériaux, le chauffage, le refroidissement et la ventilation ; la seconde affiche tous les résultats et extraits fournis par le logiciel.

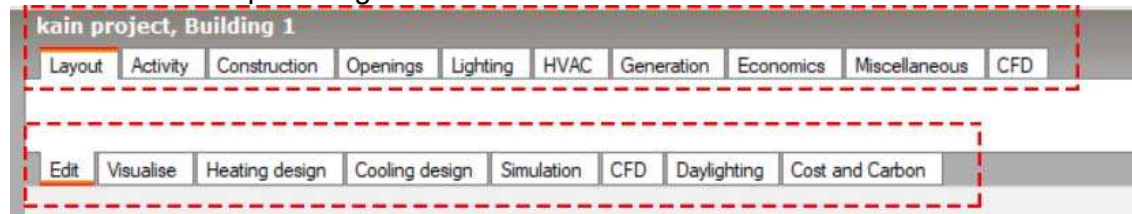


Figure 3-20 plateformes de DesignBuilder

Le choix de Design Builder pour cette étude s'explique par sa facilité d'utilisation et ses outils simples. Cependant, il convient de noter que ce logiciel présente certaines limites en ce qui concerne les formes et les blocs géométriques libres. Étant donné que le bâtiment étudié est principalement composé de blocs géométriques, cela ne pose pas de problème particulier.

3.4.2 Grasshopper

Grasshopper et DesignBuilder sont deux outils logiciels différents utilisés dans des contextes différents, bien qu'ils soient tous deux utilisés dans l'analyse et la modélisation de la performance des bâtiments.

Grasshopper est une interface de programmation visuelle pour Rhino, un logiciel de modélisation 3D. Grasshopper permet aux utilisateurs de créer des algorithmes graphiques pour contrôler la géométrie de Rhino, automatiser des tâches répétitives et analyser des données.

3.4.2.1 Ladybug

Ladybug est un plug-in pour Grasshopper qui fournit des outils avancés pour l'analyse environnementale dans la conception de bâtiments durables.

L'utilisation de Ladybug pour personnaliser la visualisation d'un graphique 2D en utilisant le composant "Legend Parameters" est une technique courante pour améliorer la compréhension des données présentées dans le graphique (Figure 3-21). En utilisant ce composant, il est possible de modifier la légende du graphique afin de rendre les données plus compréhensibles pour les utilisateurs.

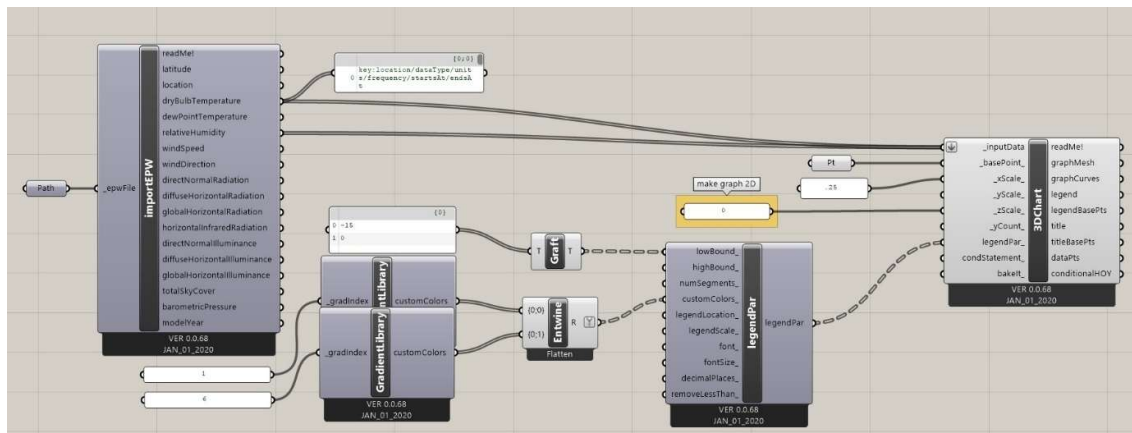


Figure 3-21 Customize weather data visualization with 2D chart - algorithm Grasshopper

Le workflow dans la figure 3-22 décrit une méthode pour générer un fichier EPW (EnergyPlus Weather) correspondant à une année météorologique réelle (AMY) à partir d'un fichier EPW d'année météorologique typique (TMY) existant et de données horaires accessibles au public téléchargées à partir du National Climatic Data Center (NCDC). Cette méthode consiste à traduire toutes les données horaires disponibles à partir des données NCDC téléchargées dans le fichier EPW résultant, et à utiliser la relation entre la couverture nuageuse du ciel et le rayonnement solaire dans le fichier TMY pour estimer le rayonnement solaire AMY. Cette méthode à être utilisée pour générer un fichier EPW correspondant à l'année météorologique réelle de Lille Lesquin en 2022.

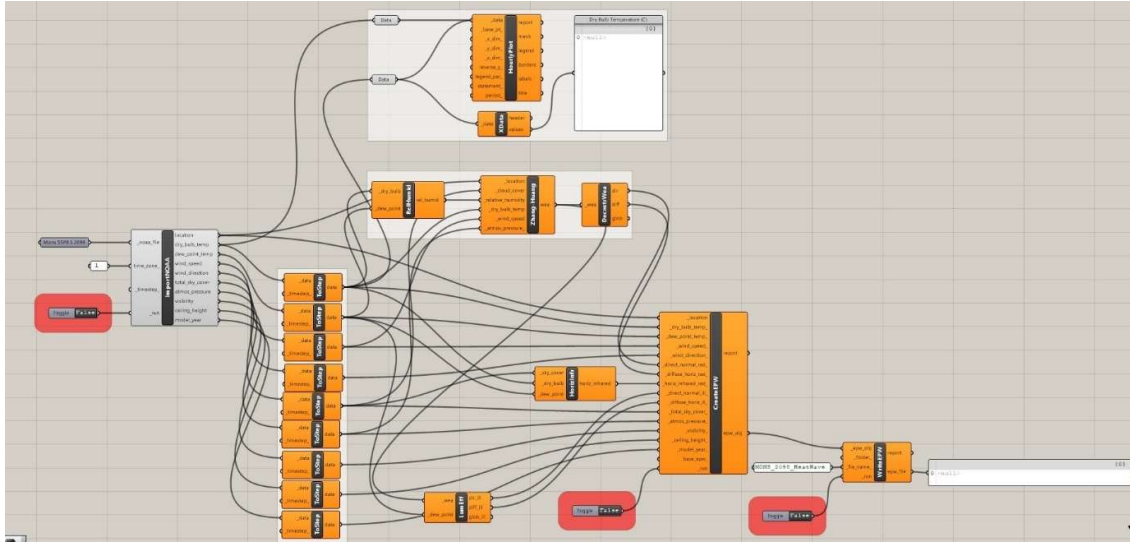


Figure 3-22 Création de l'année météorologique réelle EPW- algorithme Grasshopper

3.4.2.2 Grasshopper Math

Dans le but d'obtenir des résultats optimaux et se rapprochant le plus possible de la réalité, 204 simulations ont été effectuées à partir d'un serveur en local, Environ 390 heures simulées. Afin de vérifier la qualité de l'ajustement du modèle thermique et énergétique du bâtiment (Cacabelos et All. 2017), deux indices ont été utilisés. Le premier indice correspond à l'erreur de biais moyen (MEB) (équation (7)), tel qu'illustré dans la première équation, tandis que le deuxième indice est le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CV (RMSE)), comme illustré dans l'équation (8).

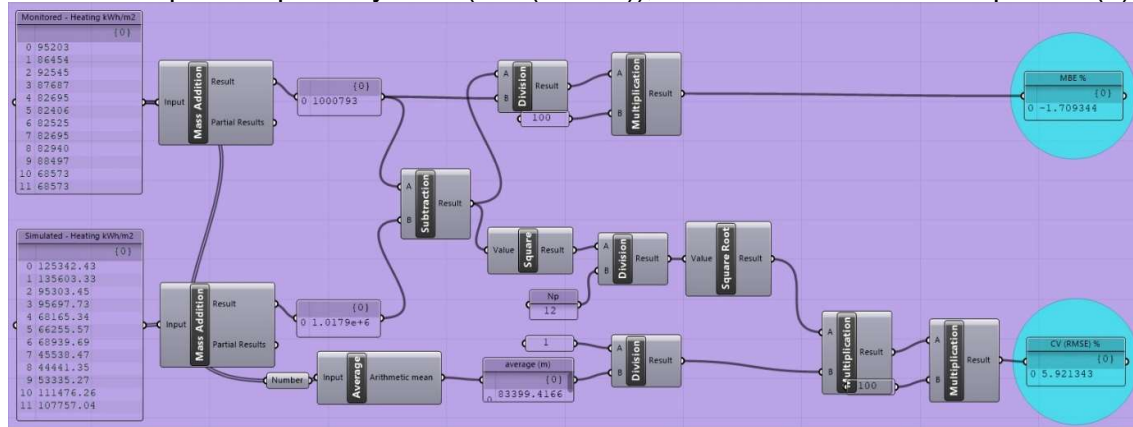


Figure 3-23 Calibration de l'électricité - algorithme Grasshopper

Les deux formules sont combinées en un seul algorithme afin de produire des résultats directs en utilisant 12 points de consommation sur une année (Figure 3-23). Cette méthode permet d'éviter d'avoir à effectuer des calculs distincts pour chaque formule et de simplifier le processus de calcul

$$MEB = \frac{\sum_{i=1}^{Np} (m_i - s_i) / \sum_{i=1}^{Np} m_i [\%]}{NP} \quad (7)$$

$$CV(RMSE) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{Np} (m_i - s_i)^2 / NP [\%]}{NP}} \quad (8)$$

En se basant sur les directives de l'ASHRAE 14-2002 et 2014, des seuils maximum ont été fixés pour le MBE. Pour les données calibrées mensuellement, ce seuil est de 5%. Pour ce qui est du CV (RMSE), un seuil maximal de 15% a été fixé pour les données calibrées mensuellement. Ces critères ont été utilisés pour s'assurer que les résultats de simulation soient optimaux et proches de la réalité.

3.4.3 Fiches techniques

Les plans CAO ont été utilisés pour mesurer les zones et les dessiner dans Design Builder. Ensuite, les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment, des cloisons intérieures et des planchers ont été identifiées à partir des fichiers PEB et PHPP. Les fichiers techniques du système de pompe à chaleur, les panneaux solaires thermiques, l'unité de ventilation et les cartes mécaniques ont également été utilisés pour définir les caractéristiques des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC).

3.5 Conditions aux limites

Nous avons décidé de nous concentrer sur l'étude des fichiers climatiques les plus sévères contemporains, moyens et futurs afin d'être plus efficaces dans l'utilisation de notre temps. Au départ, nous avons envisagé de prendre en compte les scénarios de coupure électrique, mais après avoir examiné de manière approfondie les équipements du bâtiment, nous avons constaté que cette option pouvait être éliminée, étant donné que le bâtiment dispose de systèmes d'alimentation électrique de secours qui fonctionnent en cas de panne. De plus, les coupures d'électricité sont rares en Belgique.

Nous avons choisi de nous concentrer sur l'étude du confort thermique futur des patients, car le bâtiment est de catégorie A en termes de performance énergétique. En outre, la santé humaine est notre priorité absolue dans la vie, d'où l'importance de réduire la consommation d'énergie du bâtiment tout en maintenant un niveau de confort thermique adéquat pour les patients.

4 Résultats

4.1 Modèle de référence

Cette section présente l'ensemble de données concernant une maison de soins à consommation d'énergie quasi nulle située à Kain, Tournai (Figure 4-1), ainsi que les caractéristiques énergétiques de ce bâtiment et les résultats de validation de son modèle de simulation (Tableau 4-1).

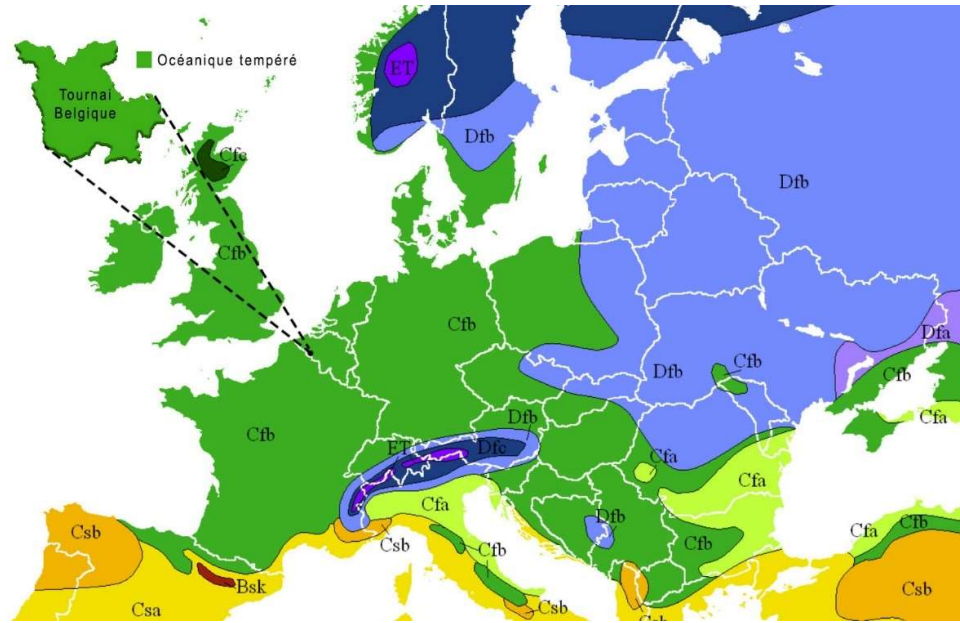


Figure 4-1 La zone climatique selon la classification de Köppen-Geiger [45] et la référence de l'emplacement du bâtiment en Belgique

Descriptif du bâtiment	Valeur
Nombre d'étages	3
Superficie totale (m2)	8000
Occupants (m2)	0.12
Volume total (m3)	24933.33
Superficie des murs extérieurs	9665.18
Superficie du toit	2666.66
Surface de plancher	2666.66
Surface des fenêtres	1458.38
Valeur U fenêtres	0.6
Valeur G fenêtres	0.56
Absorption de la surface du mur (ac/h)	0.575
Valeur U du mur (W/m²K)	0.14
Coefficient U du toit (W/m²K)	0.13
Valeur U du sol (W/m²K)	0.15
Valeur U du grenier (W/m²K)	non isolé

Table 4-1 Description générale du bâtiment

4.1.1 Base de données du bâtiment

Le tableau 4-2 présente les superficies du bâtiment ainsi que les caractéristiques de son enveloppe, y compris celles des murs, des plafonds, des planchers et des fenêtres. Ces informations ont été obtenues à partir des rapports de PEB et PHPP.

La valeur g (facteur de transmission solaire) des fenêtres est de 0,56, ce qui indique que la fenêtre laisse passer environ la moitié de la chaleur solaire à travers le vitrage. Cette valeur peut être considérée comme modérée. Par ailleurs, une valeur U (coefficient de transmission thermique) de 0,6 peut être considérée comme raisonnablement bonne. Les fenêtres ne représentant qu'environ 15 % de la surface totale des murs.

4.1.2 Caractéristiques énergétiques du bâtiment

Date de construction	Surface [m²]	Occupant [p/m²]	Besoin d'énergie de chauffage [KWh/m²*an]	Intensité de consommation d'énergie [KWh/m²/an]	Étanchéité à l'air [ac/h]	Compacité [V/S]
2016	8000	0,03	32.60	201.54	0.575	3.11

Table 4-2 Jeu de données du bâtiment de référence

La table ci-dessus présente les indicateurs de performance énergétique les plus significatifs, ainsi les caractéristiques du bâtiment en ce qui concerne la surface, le volume, l'occupation, l'étanchéité à l'air et la compacité.

Ces résultats ont été obtenus à travers les factures d'électricité et de gaz et également à travers les rapports de test d'étanchéité à l'air. La nécessité en énergie de chauffage représente 16 % de l'intensité de consommation énergétique par mètre carré (Figure 4-2). Cependant, cela est considéré comme élevé pour un bâtiment à énergie quasi nulle (Figure 4-3).

Le besoin en énergie électrique est élevé en raison du besoin accru de refroidissement du congélateur et du système de ventilation, ainsi que du comportement des occupants.

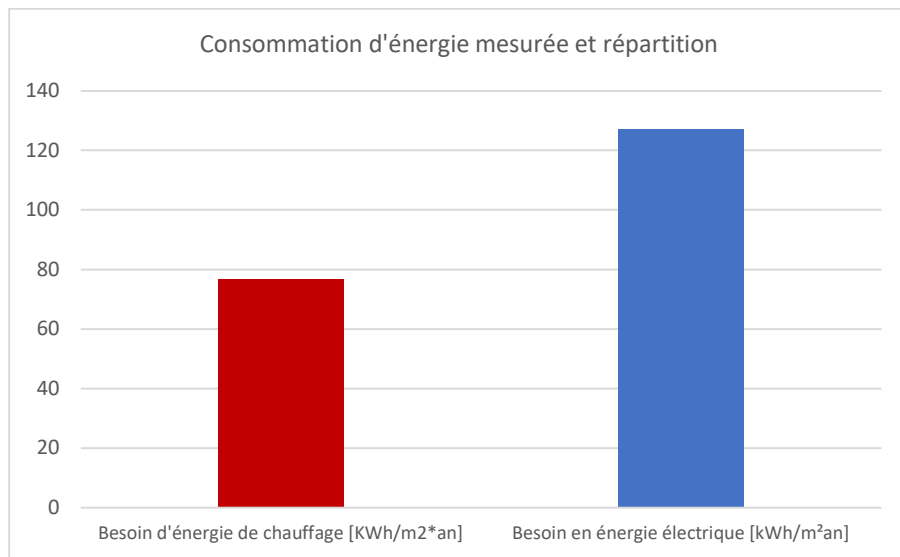


Figure 4-2 Consommation d'énergie mesurée et répartition du modèle

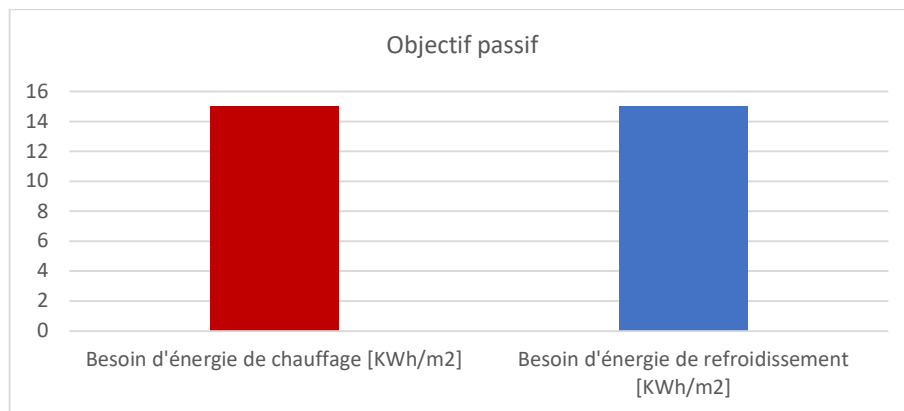


Figure 4-3 L'objectif de la consommation d'énergie d'une maison passive

4.1.3 Intensité de consommation énergétique

Le bâtiment a été initialement classé comme étant de la classe Passive, ce qui signifie que sa consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement est égale ou inférieure à 15 kWh/m², ce qui correspond à une classification A (96). Cependant, les factures d'énergie ont montré des valeurs plus élevées que la consommation d'énergie prévue, ce qui correspond à une classification énergétique de niveau E (54), ce qui indique une consommation élevée (Figure 4-4).

Il est important de noter que le classement initial en tant que bâtiment passif est basé sur des calculs théoriques et des estimations, tandis que les factures d'énergie reflètent la consommation réelle du bâtiment. Les raisons de la consommation d'énergie élevée peuvent être liées à des défauts dans la construction, des équipements inefficaces ou un comportement des occupants qui ne correspond pas aux hypothèses de conception.

Energy Efficiency Rating		
	Proposed	Current
<i>Very energy efficient - lower running costs</i>		
(92-100) A	96	
(81-91) B		
(69-80) C		
(55-68) D		
(39-54) E		54
(21-38) F		
(1-20) G		
<i>Not energy efficient - higher running costs</i>		

Figure 4-4 L'objectif de la consommation d'énergie d'une maison passive

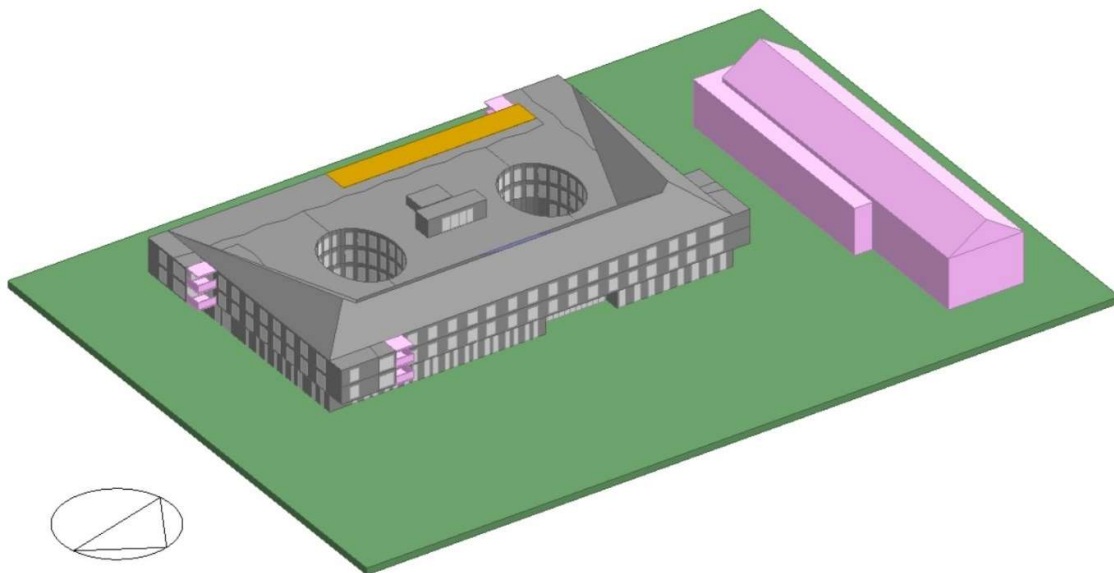


Figure 4-5 Vue 3D du modèle de bâtiment de référence - Design Builder

Le bâtiment est une maison de retraite de 3 étages, représenté par une simple boîte rectangulaire avec un grenier utilisé comme espace technique (Figure 4-5). Les étages se composent d'un hall central avec deux patios extérieurs et d'une série de chambres réparties autour de la façade, tandis que le rez-de-chaussée abrite la distribution de services (atelier, restaurant, bureaux, etc.) (Figure 4-6). Le bâtiment a été construit entre 2014 et 2016 et a été labellisé comme une maison passive, équipée de panneaux thermiques sur le toit.

Le modèle énergétique du bâtiment est subdivisé en plusieurs zones thermiques, où chaque zone a une charge thermique et un calendrier d'utilisation différents.

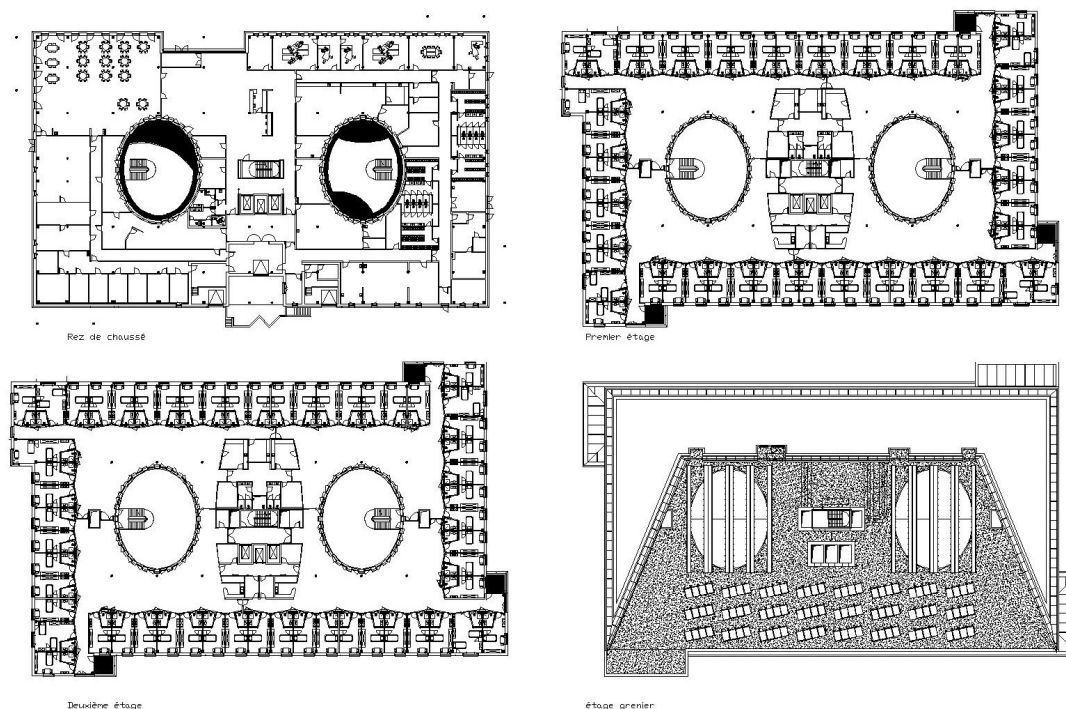


Figure 4-6 L'objectif de la consommation d'énergie d'une maison passive

Selon l'analyse de la consommation énergétique du bâtiment, il a été déterminé que la quantité d'énergie utilisée qui dépend du gaz s'élève en moyenne à 88,59 kWh/m² pour la zone chauffée. Cette estimation comprend non seulement les besoins en énergie gaz pour le chauffage et le refroidissement, car la pompe à chaleur fonctionne au gaz pour ces deux fonctions, mais également pour la production d'eau chaude domestique et l'énergie utilisée dans la cuisine pour la cuisson, qui sont toutes deux également alimentées par le gaz (Tableau 4-2)

Besoin moyen de chauffage [KWh/m ² /an]	Besoin moyen en électricité [KWh/m ² /an]	Intensité énergétique moyenne [KWh/m ² /an]
88.59	125.13	213.72

Tableau 4-1 Besoin de chauffage, besoin d'électricité et intensité de consommation d'énergie.

La consommation électrique moyenne du bâtiment, incluant l'éclairage, l'équipement et les appareils intérieurs, ainsi que les ventilateurs et pompes nécessaires au bon fonctionnement du bâtiment, s'élève à 125,13 kWh/m²/an. De plus, l'utilisation de la machine à froid pour la chambre froide dans la cuisine est également prise en compte dans ce chiffre.

4.1.4 Intensité de la charge branchée

La norme ISO 18523-2:2018 fournit des directives pour l'évaluation des performances énergétiques des appareils de cuisine et des chambres, les fours, les plaques de cuisson, les lave-vaisselle, les lave-linge, les sèche-linge, etc. En utilisant cette norme, on peut déterminer la proportion de bâtiments qui ont un appareil spécifique installé

(taux de pénétration) et la proportion de bâtiments avec un appareil spécifique qui l'utilisent régulièrement (taux de saturation). Tandis que toutes les informations sur le système CVC (chauffage, ventilation, climatisation) ont été fournies dans les plans mécaniques, y compris pour la bobine de chauffage, les ventilateurs, la réfrigération, etc.

4.1.5 Consommation de la cuisine et de l'eau chaude sanitaire

L'analyse des factures de gaz a permis de déterminer la consommation d'énergie de référence pour la production d'eau chaude sanitaire, la pompe à chaleur et la cuisson dans la cuisine du bâtiment. La consommation d'eau totale par personne a également été mesurée, ce qui a permis de déterminer une moyenne de 24,4 m³ par personne, soit 66,8 L/personne/jour. Les activités de cuisson ont été estimées à environ 2-3 heures par jour pour servir les 120 patients trois repas par jour.

Au total, 134 panneaux solaires thermiques sont installés pour alimenter des réservoirs d'une capacité de 3000 L. Leur rôle est de préchauffer l'eau, avant que celle-ci ne soit chauffée davantage par les pompes à chaleur. Pour garantir un confort optimal pour les occupants tout en optimisant la consommation énergétique, la température de consigne de l'eau chaude sanitaire est réglée à 65 °C pendant la journée et à 55 °C pendant la nuit, où l'eau n'est pas utilisée.

4.1.6 Système de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) et température de consigne

Les informations fournies décrivent en détail le système de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) du bâtiment. Pour assurer le confort des occupants âgés, les zones chauffées sont maintenues à une température moyenne de 24,5°C tout au long de l'année. Chaque zone est équipée d'une micro-bobine pour réguler la température de l'air d'admission, tandis que les unités de traitement d'air (UTA) sont à volume d'air variable et disposent d'une récupération de chaleur pour minimiser la consommation d'énergie. Le débit d'air d'admission est conçu pour être de 100 m³/h pour une personne et de 150 m³/h pour deux personnes, garantissant ainsi une qualité d'air intérieur appropriée pour les occupants. La température d'air d'admission est de 19°C pour le refroidissement et de 25-30°C pour le chauffage. Il y a 4 unités extérieures et 2 unités intérieures pour les pompes à chaleur (PAC). Elles fonctionnent en cascade, soit 2, soit 4 fonctionnent, ce qui signifie que toutes sont soit en mode refroidissement, soit en mode chauffage, sans chauffage et refroidissement simultanés.

4.1.7 Occupation

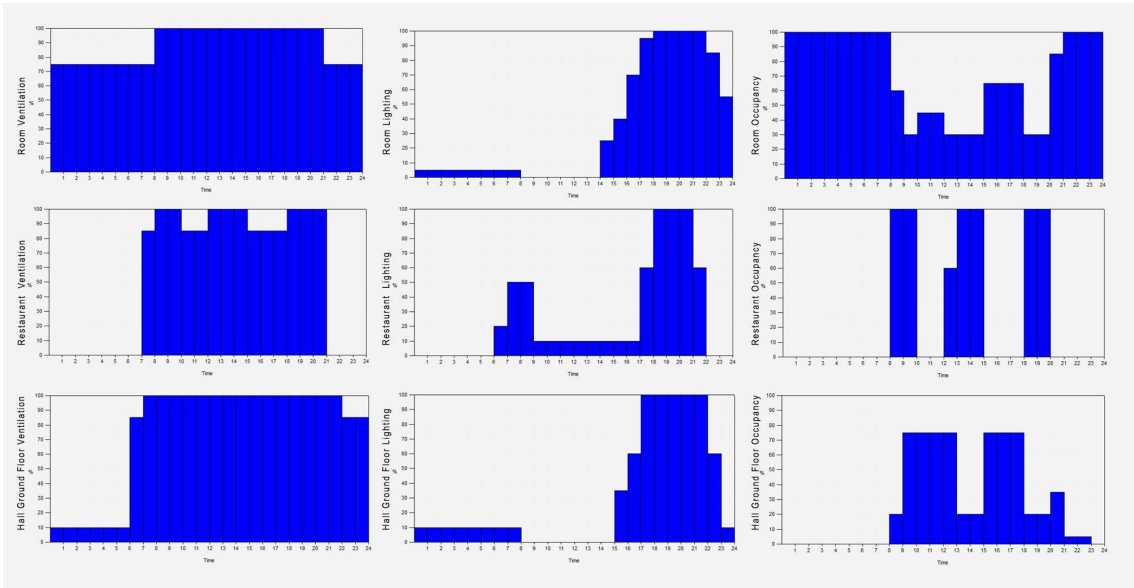


Figure 4-7 ventilation, éclairage et calendrier d'occupation

2021		120p-patients	10p-administratifs	12p-soins infirmiers	6p-soins de nuit	3p-médecins	5p-kitchen staff	9p-service
horaire quotidien	05:00 - 08:00	Régulièrement	-	Régulièrement	-	-	Régulièrement	Régulièrement
	08:00 - 12:00	Régulièrement	Régulièrement	Régulièrement	-	Rarement	Régulièrement	Régulièrement
	12:00 - 15:00	Souvent	Régulièrement	Régulièrement	-	Rarement	Régulièrement	Régulièrement
	15:00 - 17:00	Régulièrement	Régulièrement	Régulièrement	Régulièrement	Rarement	Tôt	Tôt
	17:00 - 23:00	Régulièrement	Rare	-	Régulièrement	Rare	Régulièrement	Régulièrement
	23:00 - 05:00	Régulièrement	-	-	-	-	-	-

Tableau 4-2 état d'occupation du bâtiment

La Figure 4-7 montre que le système de ventilation est optimisé pour la journée lorsque la salle et le restaurant sont occupés, alors qu'il est presque éteint pendant la nuit. De plus, afin de réduire les niveaux de bruit pendant la nuit, le système de ventilation est conçu pour diminuer le débit d'air vers les zones des chambres.

Nom	Date de début	Date de fin	Nombre de jours
Vacances de pâques	30/03/2021	05/04/2021	7
Vacances d'été	01/08/2021	15/08/2021	15
Vacances de la Toussaint	28/10/2021	05/11/2021	7
vacances de Noël	24/12/2021	01/01/2021	7

Tableau 4-3 Calendrier des jours fériés pour l'année 2021

L'emploi du temps d'éclairage pour le bâtiment comprend l'allumage des lumières dans la zone de la chambre et du couloir du coucher du soleil jusqu'à avant minuit. Dans la zone du restaurant, les lumières sont allumées pendant le petit déjeuner et le dîner. En raison de la forte probabilité de journées nuageuses, il y a peu d'occasions de compter sur l'éclairage pendant la journée.

Le planning d'occupation des chambres indique que les occupants passent la plupart de leur temps dans leur chambre la nuit, mais sont également actifs pendant la journée (Tableau 4-3). Les repas sont pris au restaurant, qui est accessible aux occupants pour le petit déjeuner, le déjeuner et le dîner, à l'exception d'un petit groupe de personnes qui ne peuvent pas se servir eux-mêmes. Les occupants peuvent également participer à diverses activités pendant la journée, telles que des jeux de société ou des exercices physiques. Le hall est un espace commun où les résidents peuvent se rencontrer, discuter et socialiser. Ce planning d'occupation est conçu pour répondre aux besoins des occupants et favoriser une atmosphère communautaire.

Ce bâtiment est exclu des jours fériés, sauf pour certains personnels administratifs (Tableau 4-4).

4.1.8 La calibration du modèle numérique

Indices statistiques	MBE(%)	CV(RMSE)(%)
Calibration mensuelle (Gaz)	3.9	13.7
Calibration mensuelle (électricité)	1.7	5.9

Tableau 4-4 Calendrier des jours fériés pour l'année 2021

210 tours d'itérations ont été effectués en se basant sur diverses mesures de validation des entrées. Deux indices, l'erreur de biais moyen (MBE) et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CV (RMSE)), ont été utilisés pour vérifier la qualité de l'ajustement du modèle énergétique et thermique. Les valeurs de MBE et CV (RMSE) pour le besoin de chauffage mensuel sont égales à 3,9 % et 13,7 %, respectivement, et pour le besoin d'électricité mensuel, elles sont égales à 1,7 % et 5,9 %, respectivement (Tableau 4-5). Ces valeurs de calibration garantissent la fiabilité du modèle de simulation pour une utilisation future dans les analyses. Figures 4-8 et 4-9 montrent la consommation estimée de gaz et d'électricité du bâtiment représentatif. Le calibrage a été effectué sur la moyenne des trois dernières années,

car il y avait des différences de consommation entre ces années, en raison des restrictions liées à la Covid-19.

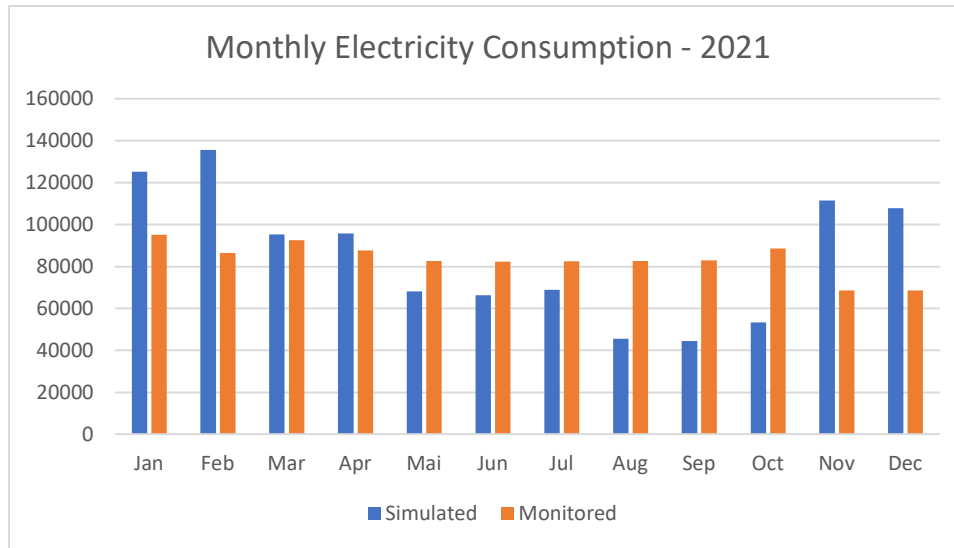


Figure 4-8 Consommation mensuelle d'électricité de modèle de référence mesurée et simulée

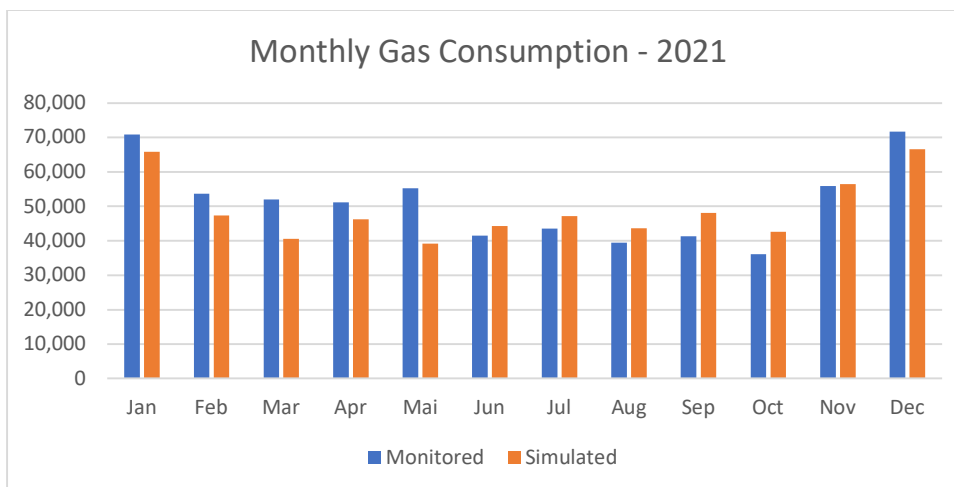


Figure 4-9 Consommation mensuelle de gaz de modèle de référence mesurée et simulée

Le tableau 4-6 présente l'intensité normalisée d'utilisation de l'énergie après correction météorologique. Les jours de chauffage HDD (Heating Degree Days) de Tournai ont été extraits du site web d'Eurostat pour les années 2019 à 2021 [46]. La consommation d'énergie du bâtiment a été comparée à l'intensité de la consommation d'énergie observée extraite des factures d'énergie. La différence entre les valeurs de degrés de chauffage varie entre -8,1° et +9,2° HDD. La correction météorologique a permis de neutraliser l'effet de la météo et de valider les résultats présentés dans le Tableau 3.

Indices statistiques	2019	2020	2021
Intensité énergétique en (KWh/m ² /an)	216.4	217.4	203.8
Jours de degrés de chauffage (HDD) à une base de température de 15°C (KWh/m ² /an)	2337	2150	2556
La différence par rapport au moyenne 2348 HDD (2019-2021)	+0.5%	+9.2%	-8.1%
Intensité énergétique normalisée (KWh/m ² /an)	217.4	237.4	187.2

Tableau 4-5 Intensité normalisée d'utilisation de l'énergie entre 2019 et 2021

4.1.9 Confort thermique

La figure 4-10 présentent les différences de température entre les mesures de température simulées et réelles pour une chambre de patients au premier étage, façade nord, sur une période de trois mois, de juin à août. Les simulations montrent une stabilité thermique entre 24 et 26 degrés, tandis que les températures réelles dans le bâtiment sont souvent plus élevées que les températures simulées. Il est à noter qu'entre le 6 juillet et le 2 août, ainsi qu'entre le 18 août et le 24 août, les températures à l'intérieur de la chambre ont augmenté, dépassant le niveau de confort thermique la plupart des après-midi. Les températures ont également augmenté de manière significative les 8 et 9 juillet, atteignant des niveaux dangereux pour la santé des patients, avec des températures supérieures à 28 degrés Celsius.

Il est soupçonné que deux facteurs principaux sont responsables de ces températures élevées : une capacité de refroidissement insuffisante si le groupe de climatisation n'est pas en mesure de répondre à la demande en cas de changements climatiques inattendus ou de canicules, et une isolation mal maîtrisée pouvant permettre à l'air froid de s'échapper de la pièce ou à l'air chaud d'entrer, provoquant ainsi une surchauffe (D. Amaripadath et al. 2022).

Il est important de noter qu'il n'y a pas eu d'effet sur le comportement des patients car la chambre était vide et n'a pas été utilisée pendant toute la période de mesure.

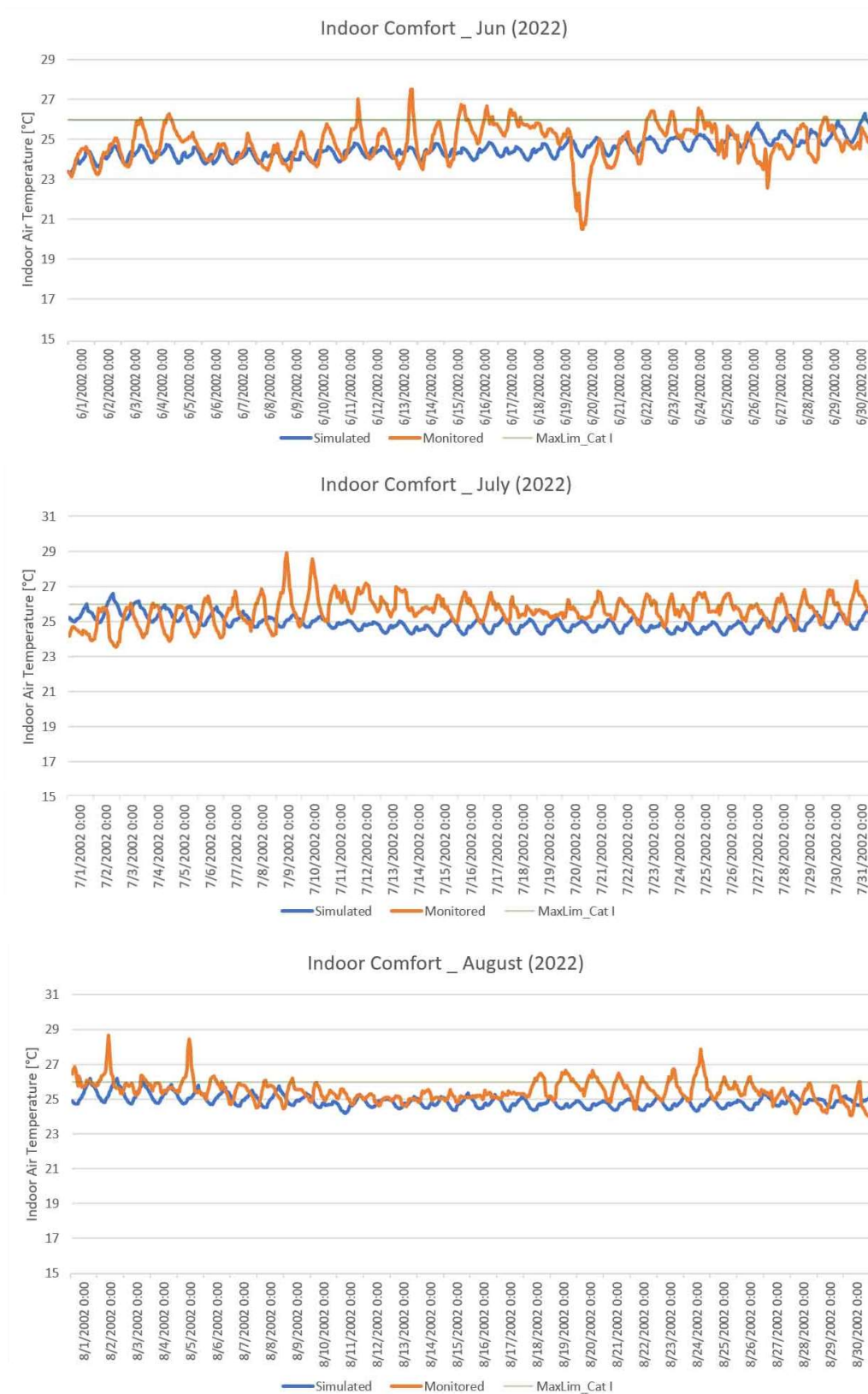


Figure 4-10 Mesure et simulation du modèle de référence de température opérative

Le modèle de référence utilisé est un modèle thermique qui prend en compte plusieurs paramètres d'entrée. Ces paramètres sont calibrés et normalisés afin de refléter les conditions météorologiques réelles de la région où se trouve l'EHPAD.

La calibration du modèle consiste à ajuster les paramètres d'entrée pour correspondre aux mesures de température réelle. Cela permet de garantir que le modèle produit des résultats précis et fiables. Les paramètres calibrés comprennent la capacité thermique de la chambre, la conductivité thermique des murs, le coefficient de transfert de chaleur et la puissance de chauffage et de refroidissement de la climatisation (D. Amaripadath et al. 2023).

En utilisant le modèle de confort thermique PMV/PPD de la norme EN 16798 (2019) pour évaluer le confort thermique des patients, nous avons constaté la présence de quelques points rouges qui se situent en dehors de la plage de confort thermique de la catégorie de bâtiment I (Figure 4-11). L'analyse de la tendance de la température extérieure moyenne actuelle (en °C) entre 15 et 24 degrés indique une direction des points plus à droite, ce qui confirme l'instabilité du confort thermique en été.

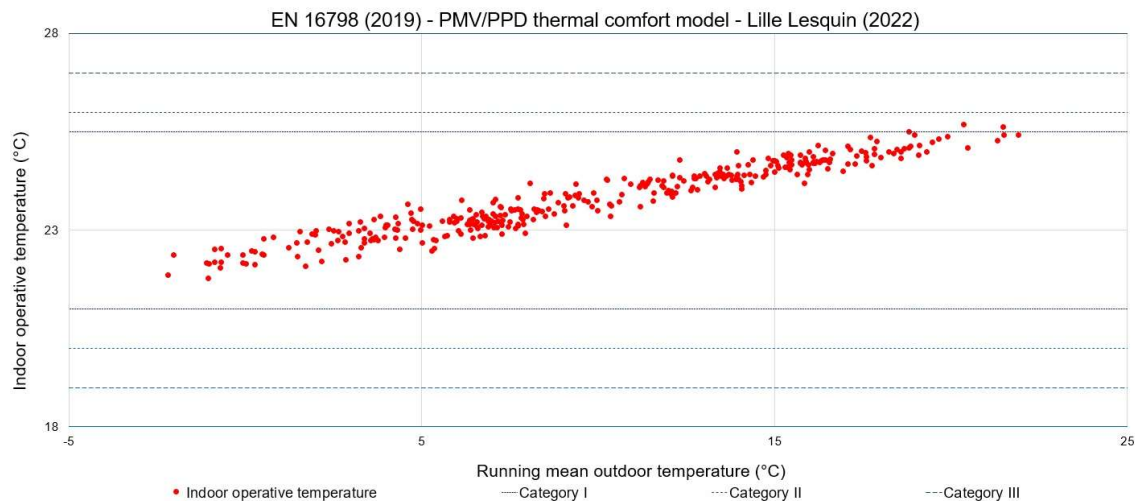


Figure 4-11 EN 16798 (2019) - Modèle de confort thermique PMV/PPD - Lille Lesquin (2022)

La normalisation météorologique consiste à prendre en compte les conditions météorologiques de la région où se trouve l'EHPAD, telles que la température de l'air extérieur, l'humidité relative, la vitesse du vent et l'ensoleillement. Cela permet d'ajuster les paramètres du modèle pour refléter les conditions météorologiques réelles de la région.

De plus, les paramètres d'entrée de l'enveloppe du bâtiment ont été affinés grâce à la surveillance des valeurs U et à des mesures d'étanchéité à l'air. Les valeurs U finales de l'enveloppe du bâtiment et des planchers internes sont présentées dans le Tableau 4-7.

Mesures d'entrée du modèle		
Enveloppe	Rapport fenêtre/mur (WWR en %)	30
	Conductivité des ouvertures [W/m ² K]	0.687
	Coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC)	0.248
	Transmission lumineuse (LT)	0.357
	Protection solaire (Externe)	Store à lames à réflectivité moyenne
	Valeur U du murs = [W/(m ² K)]	0.14
	Valeur U du toit = [W/(m ² K)]	0.13
	Étanchéité à l'air (à 50 Pa m ³ /hm ²)	26
	Étanchéité à l'air (à 4 Pa m ³ /(hm ²))	5
Système de chauffage, ventilation et climatisation	COP Système de chauffage	2
	Température de consigne pour le chauffage [C°]	24.5
	Température de consigne de réduction [C°]	12
	Taux de ventilation (pièces) (m ³ /h)	100-150
	Taux de ventilation (restaurant) (m ³ /h)	5600
	Taux de ventilation (hall) (m ³ /h)	420
	Efficacité de récupération de chaleur de la ventilation mécanique	92%
	Système de chauffage	Pompe à chaleur air-eau
	Combustible de chauffage	Gaz
Éclairage	Éclairage. densité de puissance [w/m ²]	34.5
Occupation	Nombre de personnes	165
	Densité d'occupation [m ² /personne]	0.02
	Ouverture de fenêtre	Pendant l'été
Total	Consommation moyenne [kWh/m ² /an)	201.5

Tableau 4-6 Résumé des paramètres d'entrée pour le modèle de référence après la calibration et la normalisation météorologique

4.2 Scénarios

4.2.1 conditions météorologiques

Le Shared Socioeconomic Pathways (SSP) est un cadre développé par la communauté scientifique pour explorer les futurs possibles en termes de développement socio-économique et d'émissions de gaz à effet de serre. Il fournit cinq scénarios contrastés qui décrivent différentes trajectoires socio-économiques mondiales jusqu'en 2100. Les scénarios SSP sont utilisés pour évaluer les conséquences du changement climatique, en combinant des informations sur les facteurs démographiques, économiques, technologiques, politiques et environnementaux.

Le MAR BCC (Modèle Atmosphérique Régional) est un modèle climatique régional développé par le Beijing Climate Center (BCC) en Chine. Il est utilisé pour simuler les conditions climatiques régionales à l'échelle mondiale en prenant en compte des variables telles que la température, les précipitations, les vents, etc. Le MAR BCC est basé sur des données observées et des projections climatiques futures, et il peut être utilisé pour évaluer les impacts du changement climatique sur différentes régions du monde.

Ainsi, on peut utiliser le scénario SSP dans le cadre du modèle MAR BCC pour étudier les impacts climatiques futurs sur les régions spécifiques en fonction des différents socio-économiques futurs envisagés. Cela permet de mieux comprendre les conséquences du changement climatique et d'orienter les politiques d'adaptation et d'atténuation en conséquence.

La figure 4-12 présente des cartes thermiques qui illustrent la répartition de la température extérieure, en se concentrant sur les années où les températures maximales ont été les plus élevées, à savoir 2019, 2047 et 2098. Selon les résultats, une augmentation de la température moyenne annuelle de 2,6 degrés est prévue d'ici vingt-quatre ans, et une augmentation de 5 degrés est prévue d'ici la fin du siècle. Le cadre avec une ligne pointillée met en évidence l'évolution des vagues de chaleur au fil des années.

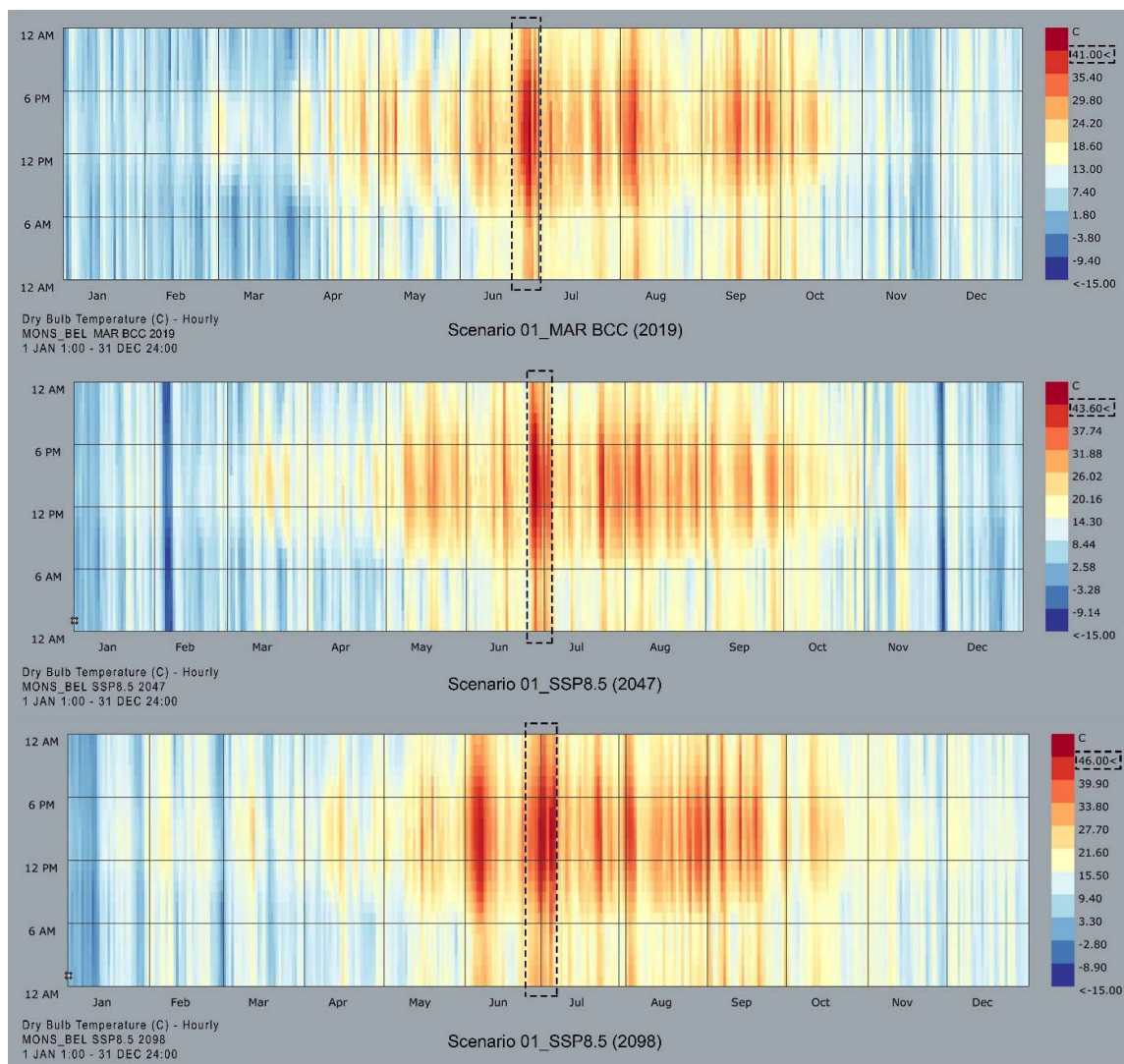


Figure 4-12 La visualisation des cartes de chaleur et le résumé météorologique à l'aide de Grasshoper pour le scénario MAR BCC en 2019 et SSP8.5 en 2047 et 2098

L'analyse du graphique révèle des tendances intéressantes, en particulier pour l'année 2098. On observe une diminution des teintes froides et une prédominance des teintes chaudes, en particulier vers la fin de l'année. Cette observation suggère une possible extension de la saison estivale, avec des températures élevées qui persistent plus longtemps.

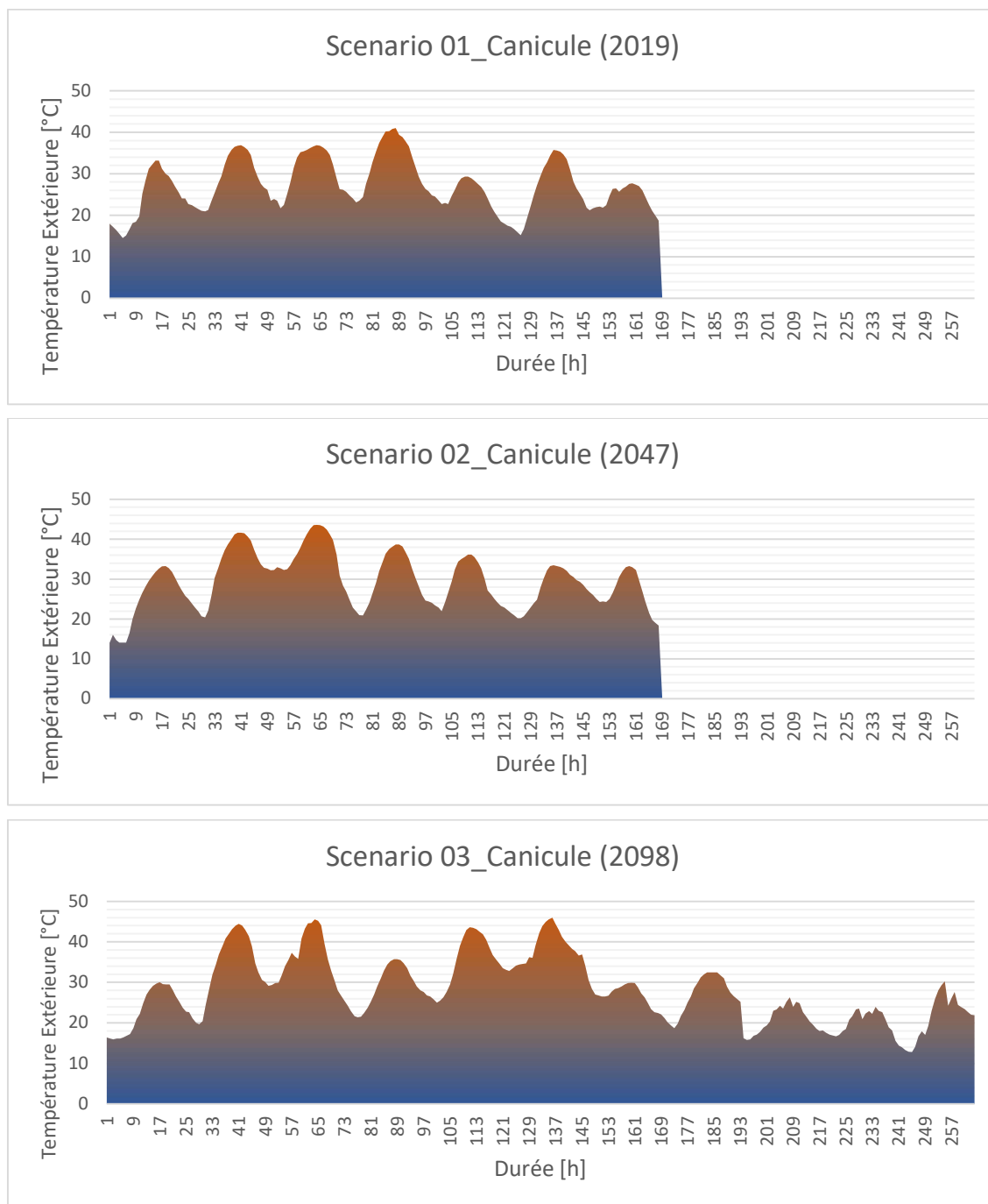


Figure 4-13 Évolution horaire de la température extérieure lors des vagues de chaleur atteignant les températures maximales les plus élevées détectées en 2019 pour la période 2001-2020, en 2047 pour la période 2041-2060, et en 2098 pour la période 2081-2100

Les résultats présentés dans la figure 4-13 et le tableau 4-8 mettent en évidence des tendances alarmantes liées aux vagues de chaleur et à l'augmentation des températures. Le graphique 5 montre clairement comment la température extérieure évolue de manière horaire pendant les périodes de vagues de chaleur les plus intenses.

	Scenario 01_Canicule (2019)	Scenario 02_Canicule (2047)	Scenario 03_Canicule (2098)
Date	23 Juin – 30 Juin	24 Juin – 01 Juillet	25 Juin – 06 juillet
Durée [jours]	7	7	10.7
Intensité [-]	6.7	6.98	8.29
température maximale de l'air [°C]	41.00	43.60	46.00
température moyenne de l'air [°C]	28.61	29.63	32.16

Tableau 4-7 Synthèse des principaux paramètres décrivant les trois vagues de chaleur (2019-2047-2098) avec les températures maximales les plus élevées

En utilisant une méthode statistique (Ouzeau et al., 2016) basée sur les percentiles de la température moyenne quotidienne entre 2001 et 2020, il a été possible de détecter les vagues de chaleur en se basant sur les seuils établis, tels que Sint, Sdeb et Spic. Ces seuils définissent les valeurs seuils au-delà desquelles une période est considérée comme une vague de chaleur.

Les résultats indiquent que les vagues de chaleur les plus intenses se produisent généralement fin juin et se terminent fin juin ou début juillet, en fonction de leur durée. En extrapolant ces tendances, il est prévu que la durée des vagues de chaleur augmente de manière significative au fil du temps. Par exemple, la plus longue vague de chaleur enregistrée en 2019 a duré 169 heures (sept jours), mais cette durée s'étendra à 257 heures (presque onze jours) d'ici 2098.

En ce qui concerne les températures pendant ces vagues de chaleur, les résultats montrent une augmentation notable. Comparée à l'année 2019, la température moyenne pendant les vagues de chaleur détectées augmentera de 6,341% en 2047 et de 12.195% en 2098. Cela signifie que les périodes de chaleur extrême seront plus longues et que les températures atteindront des niveaux plus élevés, ce qui aura des répercussions significatives sur la santé humaine.

L'intensité des vagues de chaleur est également un aspect important à considérer. Elle est mesurée en calculant la différence cumulée entre la température de l'air et le seuil Sdeb, puis en la divisant par la différence entre Sdeb et Spic. Les résultats indiquent une augmentation de 134.23% de l'intensité des vagues de chaleur d'ici 2047 et une augmentation de 385.51% d'ici 2098. Cette augmentation est principalement attribuable à l'élévation des températures et à la prolongation des vagues de chaleur.

4.2.2 Analyse du confort thermique lors de périodes de canicule

4.2.2.1 Analyse zonale

L'analyse zonale est une méthode utilisée pour étudier et évaluer les variations de température à l'intérieur d'un bâtiment dans différentes zones spécifiques. Elle permet de comprendre comment les conditions thermiques varient d'une zone à l'autre et d'identifier les zones les plus affectées par les changements de température.

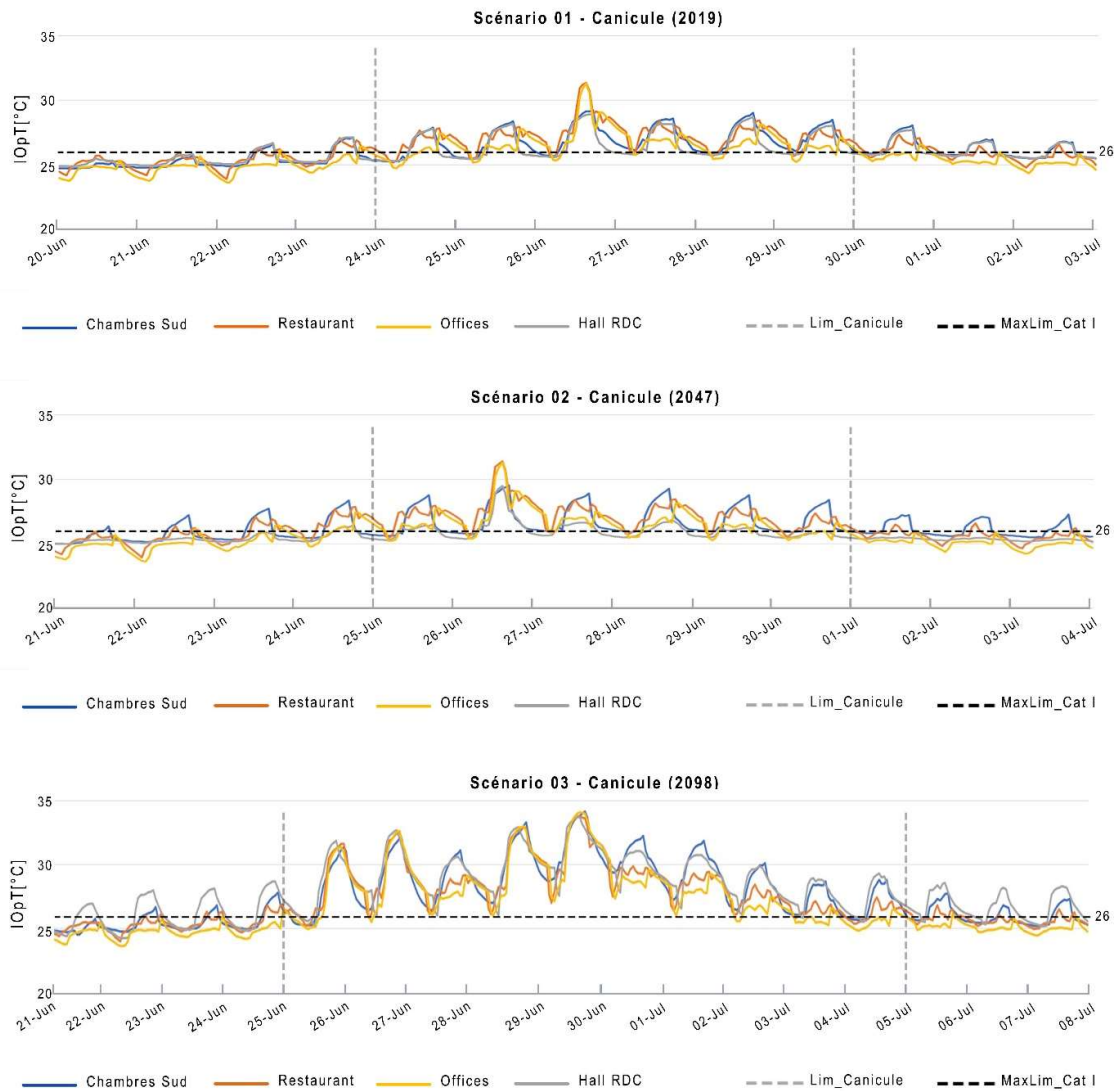


Figure 4-14 Évaluation de la température opérative des 4 zones pendant les trois scénarios de canicule, incluant une période de 3 jours avant et après chaque canicule

Dans cet exemple, la figure 4-14 présente les résultats de l'analyse zonale pour quatre zones différentes dans le bâtiment. Les scénarios de canicule étudiés sont le scénario 01 canicule (2019), le scénario 02 canicule (2047) et le scénario 03 canicule (2098). Les simulations ont été réalisées sur une année complète, mais seules les périodes de canicule et les périodes de transition de trois jours sont représentées sur les graphiques. Les périodes de transition servent à indiquer l'état thermique du bâtiment avant et après la survenue de la canicule.

Les résultats indiquent que la température opérative maximale atteint 31,95 °C dans la zone du restaurant et du bureau lors de la canicule de 2019, et augmente jusqu'à 34,42 °C dans la plupart des zones lors de la canicule de 2098. Cela montre une augmentation significative de la température intérieure au fil du temps, ce qui peut avoir des conséquences sur le confort des occupants et sur la santé.

L'analyse zonale met également en évidence l'impact différencié de la température sur chaque zone. Par exemple, la zone de la chambre sud est identifiée comme étant la plus critique, car elle est fortement influencée par les variations de température. On

observe que la courbe bleue est dominante pendant les périodes de canicule, ce qui indique que cette zone atteint des niveaux de température plus élevés par rapport aux autres zones; Bien que des rideaux de protection extérieurs et un système de refroidissement soient installés, ils ne parviennent pas à maintenir un niveau de confort thermique adéquat dans cette zone. Cependant, il est intéressant de noter que pendant l'après-midi du 26 juin, la température dans cette zone est relativement plus basse. Cela peut être attribué à la forte occupation du restaurant pendant l'heure du déjeuner, ce qui génère une source de chaleur supplémentaire dans cette zone.

En comparant les différents scénarios de canicule, on constate une légère augmentation de la température intérieure entre 2019 et 2047. Cependant, la différence devient beaucoup plus marquée dans le scénario de canicule de 2098. Cela se reflète clairement dans le graphique, où l'on peut observer que, du 26 juin au 2 juillet, la température dans les quatre zones dépasse les 26 degrés

4.2.2.2 Résistance à l'impact de la surchauffe dans le bâtiment

	2019 MAR BCC	2047 SSP8.5	2098 SSP8.5
IOhD	0.10	0.14	0.17
IOcD	0.00	0.00	0.01
AWD	4.07	4.67	5.88
ACD	5.86	5.57	4.32
CCOhR	28.15		
CCOcR	-213.31		

Tableau 4-8 IOhD, IOcD, AWD, ACD, CCOhR, CCOcR à long terme

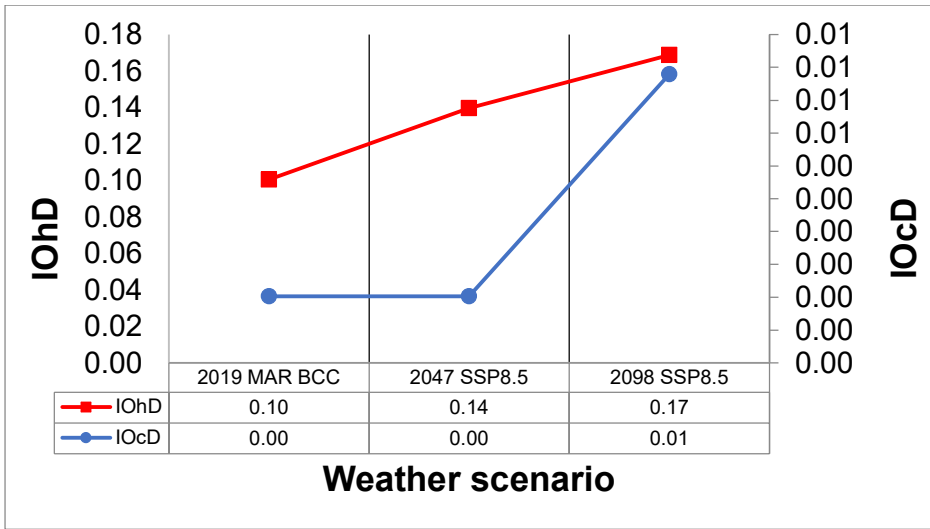


Figure 4-15 IOhD, IOcD à long terme

	2019 MAR BCC	2047 SSP8.5	2098 SSP8.5
IOhD	1.04	1.00	2.10
IOcD	0.00	0.00	0.00
AWD	7.07	8.99	9.51
CCOhR	3.23		
CCOcR	0.00		

Tableau 4-9 IOhD, IOcD, AWD, ACD, CCOhR, CCOcR à court terme (canicules)

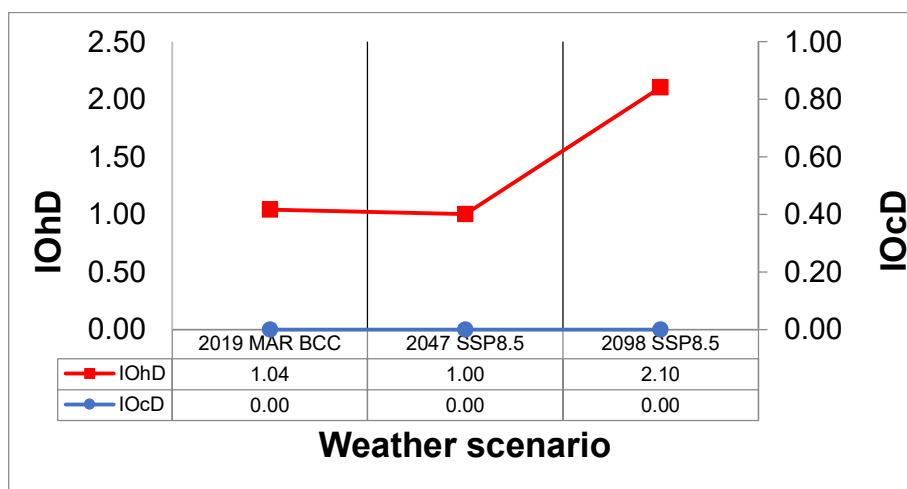


Figure 4-16 IOhD, IOcD à long terme (canicules)

Dans cette section, nous présentons les analyses du Degré de Chaleur Ambiant (AWD), du Degré de Surchauffe Intérieure (IOhD) et de la Résistance à la Surchauffe due au Changement Climatique (CCOR). L'IOhD permet d'évaluer la fréquence et l'intensité de la surchauffe en appliquant des critères de confort spécifiques à chaque zone. L'AWD reflète la sévérité thermique extérieure en calculant les heures de refroidissement moyennées sur les heures d'occupation totales du bâtiment. Le CCOR associe l'IOhD à l'AWD (c'est-à-dire qu'il lie les environnements intérieurs et extérieurs) pour quantifier la variation de l'IOhD correspondant à une variation de l'AWD. En d'autres termes, le CCOR est l'inverse de la pente de la droite de régression linéaire entre l'IOhD et l'AWD. Comme illustré dans les tableaux 4-9 et 4-10, il existe une corrélation directe entre l'IOhD et l'AWD, ce qui signifie que lorsque l'AWD augmente, l'IOhD augmente également.

Nous avons étudié l'impact de l'AWD et de l'IOhD à la fois sur le long terme et le court terme (vagues de chaleur). À partir de la courbe de figure 4-14, nous avons observé une augmentation de l'IOhD dans le futur, respectivement de 0,1, 0,14 et 0,17 pour les scénarios de 2019, 2047 et 2098. Le tableau 4-9 montre également une augmentation de l'Ambient Warmness Degree (AWD) avec des valeurs de 4,07 pour 2019, 4,67 pour 2047 et 5,88 pour 2098.

En ce qui concerne le court terme, la sévérité des vagues de chaleur est représentée par l'AWD dans le tableau 4-10 et la figure 4-16, avec des valeurs respectives de 7,07 °C pour la vague de chaleur de 2019, 8,99 °C pour celle de 2047 et 9,51 °C pour celle de 2098.

Le niveau d'IOhD diffère selon qu'il est mesuré sur une longue période de temps ou sur une période courte de vague de chaleur. Cette différence s'explique par le fait que, sur une courte période, on étudie le degré de surchauffe intérieure, dont la plupart des valeurs dépassent le niveau de confort thermique, en plus de la force de la vague de chaleur pendant cette période. En revanche, lorsqu'il est étudié sur une année entière, il calcule le degré de surchauffe intérieure sur une période estivale, par exemple. Cependant, en considérant le nombre total de jours dans une année, ce nombre est relativement faible par rapport à l'étude sur la période de la vague de chaleur.

Le CCOR reflète cette différence, car il étudie le cas le plus affecté par le climat. Il est clair que le bâtiment sera davantage affecté par la chaleur sur une période d'un an que pendant de courtes périodes de vagues de chaleur. Cela est confirmé par les valeurs de CCOR pour les scénarios d'un an, qui s'élèvent à 28,15, comparées à une valeur de 3,23 pour les scénarios de courtes vagues de chaleur (tableau 4.9 et 4.10).

En résumé, les analyses de l'IOhD, de l'AWD et du CCOR permettent d'évaluer l'impact de la surchauffe dans les bâtiments. L'IOhD mesure la fréquence et l'intensité de la surchauffe intérieure, tandis que l'AWD évalue la sévérité thermique extérieure. Le CCOR quantifie la relation entre l'IOhD et l'AWD, reflétant ainsi l'ampleur de la variation de l'IOhD en fonction de l'AWD.

Il convient de noter que les résultats présentés dans cette section mettent en évidence une corrélation directe entre l'AWD et l'IOhD, indiquant que lorsque la sévérité thermique extérieure augmente, la fréquence et l'intensité de la surchauffe intérieure augmentent également.

4.2.2.3 Modèle de confort thermique PMV/PPD

Le PMV représente une évaluation numérique de la sensation thermique moyenne attendue par un groupe de personnes, tandis que le PPD indique le pourcentage prévu de personnes insatisfaites avec les conditions thermiques. Le chart statique permet de déterminer les plages de température qui offrent un niveau de confort optimal pour les occupants du bâtiment de catégorie I, en veillant à ce qu'ils ne ressentent ni trop chaud ni trop froid.

La figure 4-17 présente les résultats du modèle de confort thermique PMV/PPD de la norme EN 16798-1 (CEN, 2019) pour les catégories I, II, III et IV, en termes de confort thermique intérieur. Les valeurs quotidiennes de la température opérative intérieure sont calculées et comparées à la température extérieure moyenne en temps réel (outdoor mean running temperature).

Il est remarqué que la plage de température opérative intérieure se situe en dehors des limites de confort, à la fois selon le modèle PMV/PPD et les critères de confort thermique statique de la catégorie I, dans les trois scénarios. Cela indique que les températures mesurées à l'intérieur dépassent les plages de confort recommandées, ce qui témoigne de conditions de confort thermique insatisfaisantes.

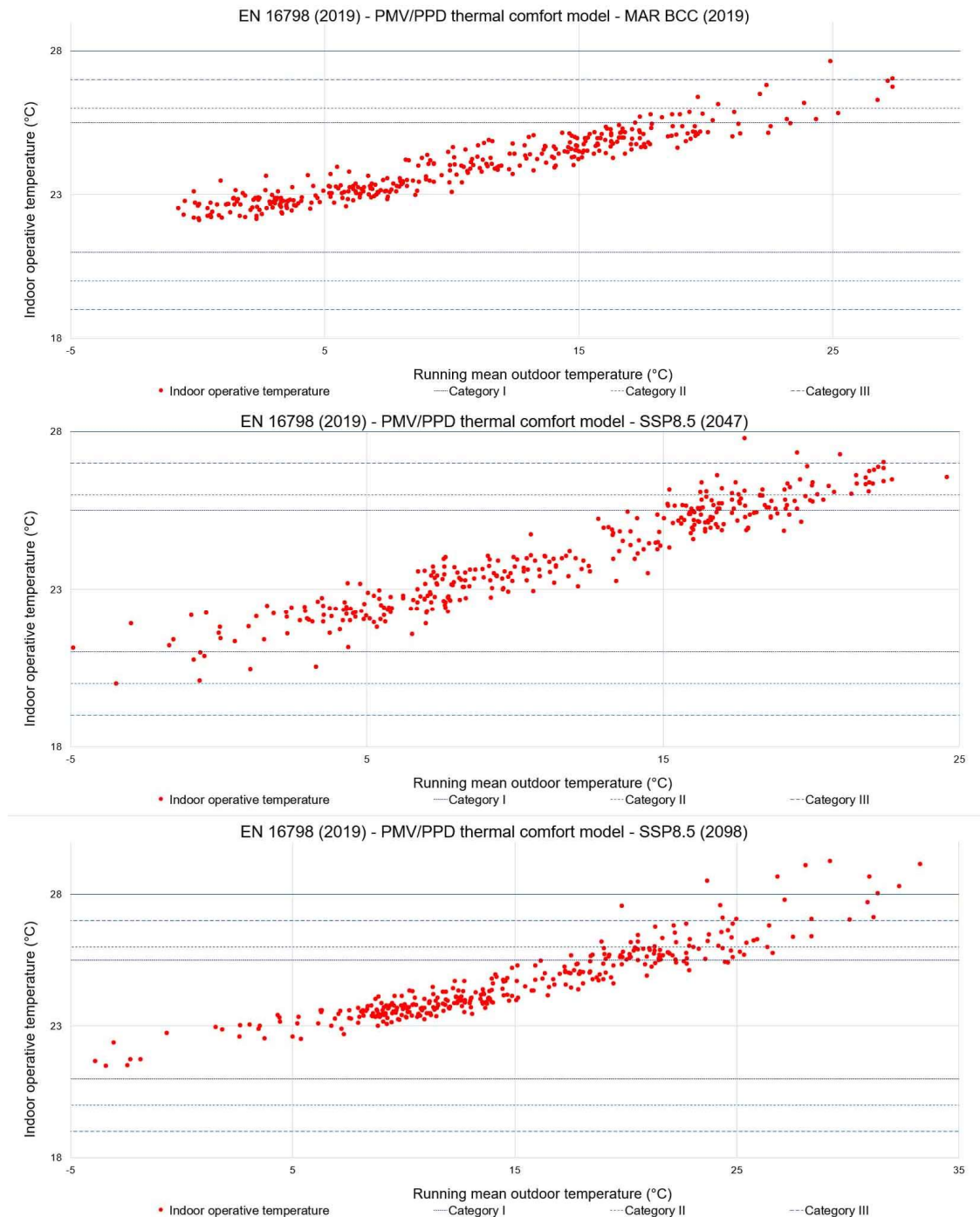


Figure 4-17 EN 16798 (2019-2047-2098) - Modèle de confort thermique PMV/PPD

L'évolution de la température extérieure moyenne en temps réel (outdoor mean running temperature) est frappante, avec une augmentation prévue jusqu'à 33°C en 2098, comparée à un maximum de 28°C en 2019. Le scénario de 2019 met en évidence une violation du niveau de confort thermique pendant l'été, où l'on constate que les points rouges sortent des limites de la catégorie I lorsque la température

extérieure moyenne atteint entre 23 et 27 degrés. Cependant, tous les points restent dans la zone de confort pendant l'hiver.

Le scénario de 2047 montre une expansion de la plage d'inconfort, avec des points qui se dispersent, révélant un léger inconfort thermique en hiver et une augmentation plus marquée de la température opérative en été, frôlant les 28 degrés. De plus, plusieurs points se situent en dehors de la plage de confort thermique.

En revanche, le scénario de 2098 présente une forte remontée des points rouges. La tendance se dirige nettement vers le haut, dépassant le niveau de confort thermique. Pendant l'été, plus d'un tiers des points ont franchi le seuil de la catégorie I, témoignant d'une violation claire du confort thermique.

Il est important de noter que ces résultats mettent en évidence les changements climatiques projetés et les défis croissants liés au maintien du confort thermique à l'intérieur des bâtiments.

4.2.3 Bilan thermique

Le bilan thermique du bâtiment met en évidence l'importance d'avoir à la fois des systèmes de climatisation et de chauffage efficaces pour assurer un confort optimal dans toutes les saisons. Cela est particulièrement essentiel pour un bâtiment de catégorie I qui abrite des personnes âgées, nécessitant une attention particulière pour leur bien-être et leur santé.

La figure 4-18 présente le bilan thermique pour la climatisation sensible de la zone, le chauffage sensible de la zone, l'occupation et les gains solaires. Il aurait été difficile de représenter toutes les sources de gain, car cela aurait compliqué la lecture du graphique.

Lorsqu'on examine l'équilibre thermique, on constate que la climatisation sensible de la zone et le chauffage sensible de la zone sont presque équivalents en été et en hiver dans les scénarios de 2019. Il est intéressant de noter que la climatisation sensible de la zone n'est pas nulle en hiver, cela est dû au système de refroidissement utilisé pour la salle de réfrigération des aliments. En avril et mai, on observe une situation où le chauffage et la climatisation sont utilisés simultanément. Cela s'explique par le fait que le bâtiment est de grande taille, et certaines journées, la façade sud est exposée aux gains solaires, ce qui rend l'utilisation de la climatisation nécessaire, tandis que la façade nord est plus froide et nécessite du chauffage.

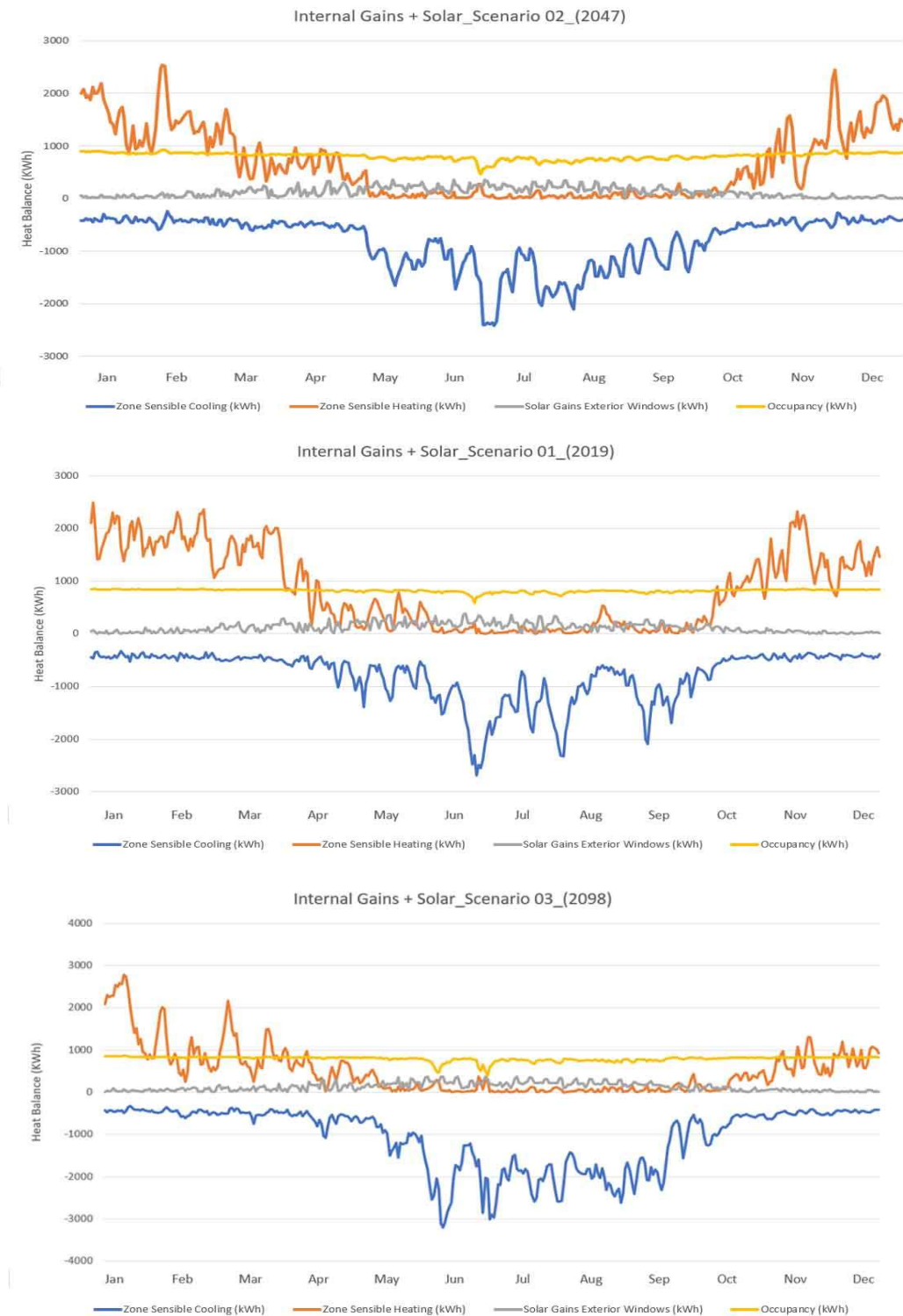


Figure 4-18 Les gains internes et les gains solaires pour les scénarios de 2019, 2047 et 2098

Étant donné que le bâtiment est classé dans la catégorie I et qu'il accueille principalement des personnes âgées, il est impératif que les systèmes de climatisation et de chauffage soient disponibles tout au long de l'année. Dans le scénario de 2047, on observe une tendance à la baisse des besoins en chauffage, ce qui peut être attribué à une amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment et à des facteurs externes tels qu'une augmentation de la température extérieure. En revanche, la demande de climatisation augmente, probablement en raison de la hausse des températures estivales.

Dans le scénario de 2098, la demande de climatisation continue de croître de manière significative, dépassant les 3000 kilowatts en juin. Cela suggère que les températures estivales sont devenues extrêmement élevées, nécessitant une climatisation plus importante pour maintenir des conditions de confort thermique à l'intérieur du bâtiment. La demande de climatisation se prolonge également jusqu'en octobre, indiquant une extension de la période de besoin de refroidissement.

Quant aux gains solaires et à l'occupation, ils restent relativement stables et ne varient pas significativement d'un scénario à l'autre. Cela suggère que les apports de chaleur provenant de ces sources ne sont pas les principaux facteurs contribuant aux changements observés dans les besoins de chauffage et de climatisation.

4.2.4 Bilan énergétique

La figure 4-19 met en évidence la diminution progressive des gains et des pertes pour les trois scénarios étudiés (2019-2047-2098). Cette réduction peut être expliquée par divers facteurs. En examinant la figure 4-20, on observe également une diminution graduelle de la consommation électrique. Tout d'abord, les scénarios futurs (2047-2098) présentent des températures plus élevées et une radiation solaire horizontale cumulée annuelle plus importante, ce qui se traduit par un nombre accru de jours ensoleillés.

Étant donné que le bâtiment est équipé de 98 panneaux solaires thermiques, cela signifie une utilisation réduite de l'énergie. Plus les températures sont élevées tout au long de l'année, moins nous utilisons de chauffage, et la réduction du chauffage peut être inférieure aux nouveaux besoins en refroidissement. Il s'agit là d'une question interconnectée.

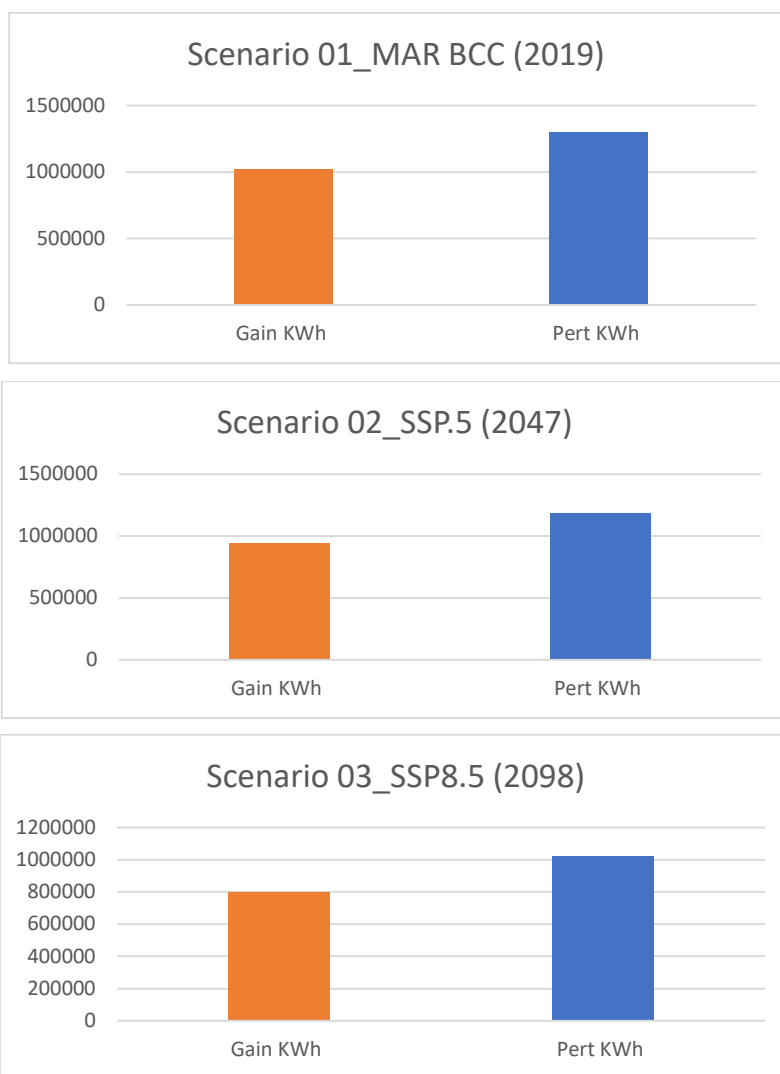


Figure 4-19 Les gains et pertes totaux du bâtiment pour les trois scénarios : 2019, 2047 et 2098

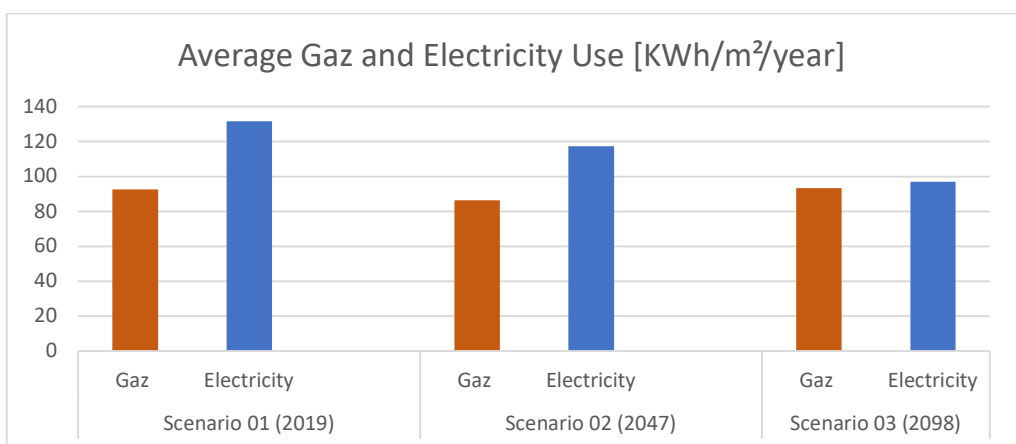


Figure 4-20 Consommation moyenne de gaz et d'électricité pour les trois scénarios : 2019, 2047 et 2098

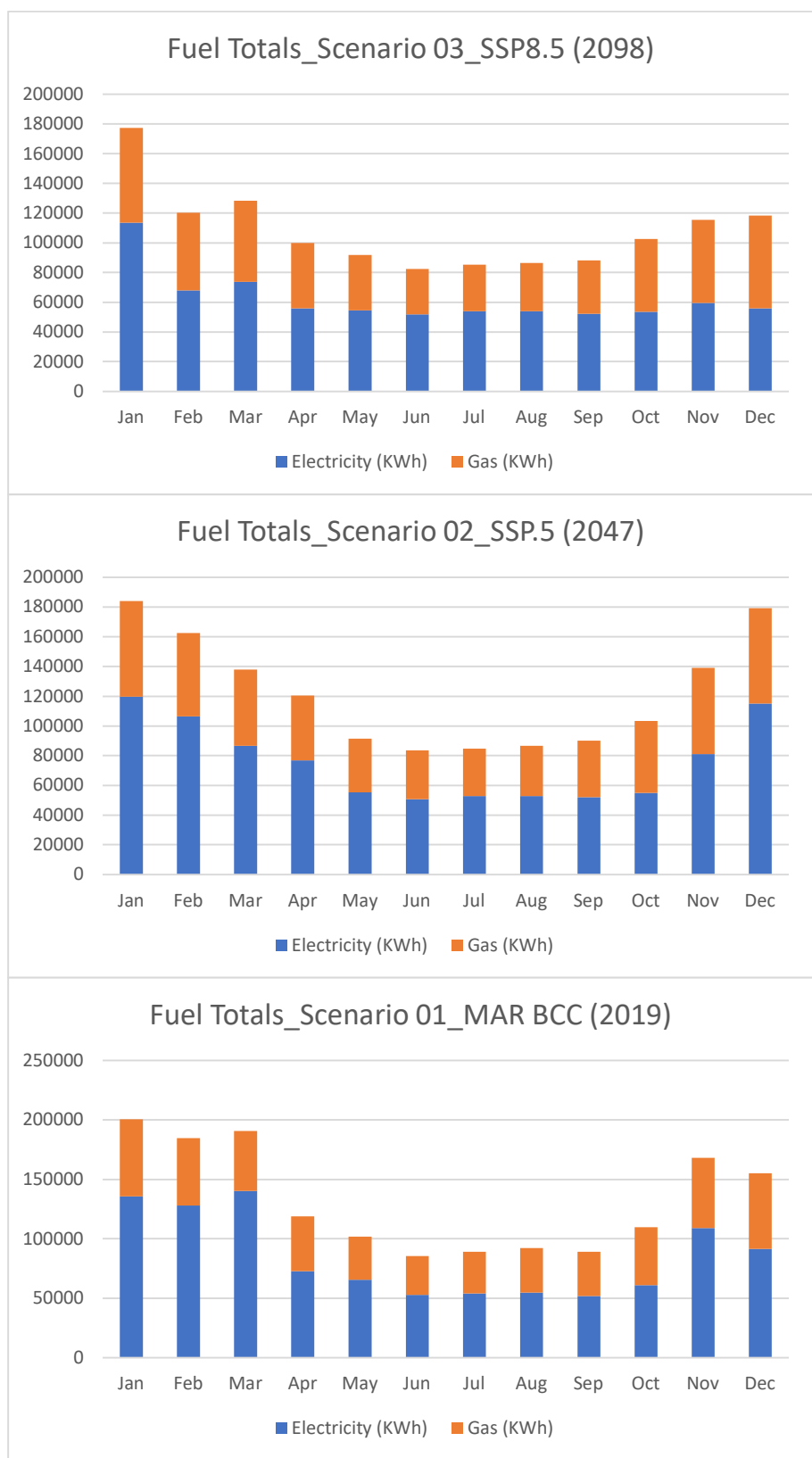


Figure 4-21 Consommation mensuelle de gaz et d'électricité pour les trois scénarios : 2019, 2047 et 2098

La figure 4-21 confirme les observations précédentes en ce qui concerne les niveaux de consommation de gaz, qui sont presque équivalents dans les trois scénarios. Cependant, on peut remarquer quelques différences avec le scénario 02. En effet, le taux de consommation de gaz est plus élevé en hiver et plus faible en été. En revanche, dans le scénario 03, nous constatons une superposition des saisons et une chute brusque et spectaculaire de la consommation de gaz entre mars et avril.

En ce qui concerne la consommation d'électricité, le scénario 01 présente une consommation importante au mois de janvier, suivie d'une baisse progressive de la consommation. Pour les mois suivants, la consommation d'électricité se maintient autour de 60 000 KWh.

Le scénario 02 montre une diminution de la consommation d'électricité, mais avec une consommation régulière tout au long de l'année. Il est normal de constater une consommation plus faible en été par rapport à l'hiver, en raison de l'utilisation accrue de l'éclairage pendant cette période.

Le scénario 03 se caractérise par une diminution plus importante du taux de consommation d'électricité. La forme de consommation d'électricité est très similaire à celle de la consommation de gaz. De plus, on observe une réduction des écarts entre les mois d'avril et de novembre.

Ces observations mettent en évidence les variations de consommation d'énergie entre les différents scénarios et permettent de mieux comprendre les tendances saisonnières et les différences entre la consommation de gaz et d'électricité.

5 Discussion

Ce chapitre regroupe la synthèse de la thèse, commençant par les principales découvertes et recommandations qui en découlent. Ensuite, il met en évidence les interprétations, les points forts, les limitations et les difficultés de l'étude. Enfin, il examine les implications pratiques et les orientations de recherche à venir.

5.1 Réaffirmation de l'objectif de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le confort des utilisateurs et la performance énergétique d'un bâtiment de maison de repos à énergie quasi-zéro pendant les périodes de canicule en Wallonie. L'étude se concentre spécifiquement sur les vagues de chaleur et cherche à comprendre comment le bâtiment réagit aux conditions climatiques extrêmes. À cette fin, trois ensembles de données météorologiques représentant des années particulièrement sévères ont été utilisés : contemporain 2019 (MAR-BCC), mi-futur 2047 (SSP8.5) et futur (SSP8.5). Cela permet d'analyser les effets à court et à long termes. Les objectifs spécifiques de l'étude incluent l'évaluation du confort thermique des occupants en utilisant le modèle PMV/PPD, ainsi que des indices tels que le Degré de Chaleur Ambiant (AWD) et le Degré de Surchauffe Intérieure (IOhD). L'étude comprend également une analyse du bilan énergétique du bâtiment et une identification des problèmes de surchauffe potentiels. De plus, l'étude vise à évaluer la résistance du bâtiment aux changements climatiques à court et à long termes, ainsi qu'aux événements climatiques extrêmes, en utilisant l'indice de la Résistance à la Surchauffe due au Changement Climatique (CCOR). En fin de compte, l'objectif final est de fournir une évaluation complète du confort des utilisateurs, de la performance énergétique et de la résilience du bâtiment face aux conditions climatiques extrêmes, en mettant particulièrement l'accent sur les vagues de chaleur.

5.2 Résultats et recommandations

5.2.1 Observations et constatations

- Selon le modèle de confort thermique PMV/PPD le bâtiment dépasse déjà toutes les catégories de confort en atteignant une température intérieure de 27 degrés pour une température extérieure moyenne de 25 degrés pendant le mois de juin 2019 (Figure 4-17). Cela démontre que le bâtiment est incapable de répondre aux exigences de confort thermique requises pour la catégorie I des bâtiments.
- Après avoir comparé la consommation réelle avec la consommation prévue lors de la conception, il a été observé que la consommation d'électricité actuelle est d'environ 127 kWh/m²/an (Figure 4-2). Par conséquent, la consommation réelle est environ 8 fois supérieure à la consommation attendue pour une maison passive, qui est de 15 kWh/m²/an (Figure 4-3). En

ce qui concerne la consommation réelle de gaz, qui s'élève à 76 kWh/m²/an, elle est environ 5 fois supérieure à la consommation attendue (Figure 4-2). Cela est principalement dû à des problèmes de conception dans l'enveloppe du bâtiment et des problèmes dans le système de chauffage, ventilation et climatisation (CVC).

Cependant, les factures d'énergie ont révélé des valeurs plus élevées que la consommation d'énergie prévue, ce qui correspond à une classification énergétique de niveau E (54).

- Le bâtiment présente des gains internes très élevés, ce qui entraîne des charges de refroidissement et de chauffage également élevées. Ces charges sont principalement dues à deux raisons. Tout d'abord, la température de consigne est maintenue très basse (24°C) et cela s'applique à la plupart des zones accessibles aux personnes âgées dans le bâtiment. Deuxièmement, le bâtiment abrite des activités nécessitant une quantité importante de refroidissement, telles que des salles de conservation des aliments. Il y a trois chambres de 42 m² destinées à la conservation des aliments surgelés avec une température de consigne de 0°C, ainsi que quatre chambres de 64 m² pour la conservation des aliments froids avec une température de consigne entre 2°C et 4°C.
- L'un des problèmes les plus importants concerne la toiture, qui avait été initialement conçue comme un toit vert dans le modèle énergétique initial. Cependant, dans la réalité, cet élément n'est pas présent. Le toit vert est pourtant un élément essentiel pour réduire les gains de chaleur pendant l'été. Il offre plusieurs avantages en termes d'efficacité énergétique et de confort thermique. En été, le toit vert aide à réduire la chaleur absorbée par le bâtiment en raison de l'effet de refroidissement naturel des plantes et de l'évapotranspiration. Cela permet de diminuer la charge de refroidissement nécessaire pour maintenir des températures confortables à l'intérieur du bâtiment.

Un autre problème majeur concerne la conception du toit est le positionnement des entrées d'air et des sorties d'air dans le grenier non isolé. Pendant l'été, la température y augmente considérablement, ce qui nécessite un refroidissement supplémentaire avant que l'air n'entre dans le bâtiment. De plus, la qualité de l'air n'est pas du tout satisfaisante, ce qui a un impact significatif sur le confort thermique et la santé des occupants.

- L'étude des scénarios à long terme a révélé que les niveaux de confort thermique dépasseront les exigences de confort thermique pour le bâtiment de catégorie I au fil du temps. Il est prévu que la température interne dans le bâtiment dépasse les 27°C d'ici 2047, et qu'elle atteigne même 30°C d'ici 2098 (Figure 4-17). Ces températures élevées auront des répercussions graves sur la santé des personnes âgées. En ce qui concerne le bilan énergétique, il a été constaté que le taux de consommation globale passera de 224 kWh/m²/an en 2019 à 190 kWh/m²/an d'ici 2098 (Figure 4-20). Cette diminution de la consommation est due à des

températures plus élevées prévues à l'avenir et à une période prolongée de températures chaudes au printemps et en automne. Cela a un impact positif sur la réduction des besoins de chauffage, mais a un impact négatif sur les besoins de refroidissement.

Il convient de souligner que le taux de chauffage, qui a été rationalisé, dépasse la proportion des besoins de refroidissement. Cela indique une asymétrie entre les besoins de chauffage et de refroidissement dans le bâtiment, avec une plus grande dépendance au chauffage.

- En étudiant les scénarios à court terme, il a été constaté que les chambres destinées aux personnes âgées situées sur la façade sud sont les plus touchées par les vagues de chaleur de courte durée. Alors que le bâtiment a connu une température maximale dans le restaurant à midi le 26 juin, et que nous constatons une augmentation soudaine allant jusqu'à 32 degrés, il est probable que la raison en soit une occupation élevée à cette heure. De plus, dans les bâtiments passifs, une forte occupation a un impact plus important sur l'augmentation de la température par rapport aux autres types de bâtiments (Attia, 2020). En effet, les températures internes de ces chambres peuvent dépasser les 28°C le 26 juin 2019 et devraient atteindre 34 °C à la fin juin 2098 (Figure 4-14).

En ce qui concerne le degré de surchauffe intérieure (IOhD), nous observons une augmentation significative de 1,04 pour l'année 2019 et de 2,1 pour l'année 2098 (Figure 4-16). Cela est dû au fait qu'en 2098, nous assisterons à des vagues de chaleur à intervalles de 10 jours, tandis qu'elles s'étendaient sur 7 jours en 2019. Cependant, la résistance du bâtiment à ces vagues de chaleur de courte durée sera faible, avec un indice de résistance à la surchauffe due au changement climatique (CCOhR) égal à 3,23 (Tableau 4-10).

- Le bâtiment peut être performant partiellement en ce qui concerne la demande de refroidissement et en même temps partiellement en ce qui concerne la demande de chauffage (Figure 4-18).

5.2.2 Orientations

Dans le cas de bâtiments de ce type, il est généralement recommandé d'effectuer une modélisation dynamique à haute résolution. Cela permet d'obtenir une représentation détaillée des caractéristiques thermiques et énergétiques du bâtiment. Une approche courante consiste à créer un modèle de simulation multizones en se basant sur des cas de référence similaires, ce qui permet de prendre en compte les variations internes du bâtiment.

Lors de la modélisation, il est conseillé d'utiliser des fichiers météorologiques futurs plutôt que des données historiques. Cela permet de tenir compte des changements climatiques prévus et d'évaluer la performance énergétique du bâtiment dans des conditions météorologiques réalistes à long terme. Il est également important de tester le bâtiment en simulant des vagues de chaleur extrêmes à court terme afin de vérifier sa capacité à maintenir le confort thermique et à minimiser la consommation d'énergie dans de telles conditions.

En ce qui concerne le système de chauffage, ventilation et climatisation (CVC), il est préférable d'opter pour une solution simple et adaptée aux besoins du bâtiment. Par exemple, l'utilisation d'un foyer au gaz ou d'un refroidisseur central électrique peut être appropriée, en fonction des normes et des recommandations en vigueur dans la région. Actuellement, l'utilisation du gaz est encore courante en Belgique, mais si cela n'est plus recommandé à l'avenir, le choix d'un refroidisseur central électrique est judicieux.

Il est essentiel de s'assurer que la construction réelle corresponde fidèlement au projet initial. Des écarts entre la conception et la réalisation peuvent entraîner des problèmes de performance et de fonctionnement du bâtiment. Il est donc nécessaire de suivre de près le processus de construction et de réaliser des vérifications régulières pour garantir la conformité.

Des mesures supplémentaires doivent être envisagées pour équilibrer efficacement les besoins de confort et optimiser les performances énergétiques globales du bâtiment.

Il est toujours judicieux de consulter des experts en conception et en ingénierie du bâtiment pour obtenir des recommandations spécifiques à votre projet, en tenant compte des réglementations locales et des meilleures pratiques du secteur.

5.3 Points forts et limites

5.3.1 Force

- La calibration du modèle sera, basée sur des mesures réelles, avec une caractérisation détaillée accumulée pour affiner les modèles de simulation. Cela permet d'améliorer la précision des prévisions et des performances des bâtiments en utilisant des données concrètes et spécifiques.
- L'établissement de partenariats avec le bureau d'ingénierie MK Engineering et le bureau consultant, cela permet d'accéder à l'expertise des spécialistes de ces bureaux, d'obtenir des informations détaillées sur les bâtiments et de renforcer les travaux de modélisation et de simulation.
- L'utilisation de programmes de simulation multizone régulièrement mis à jour pour modéliser de manière plus précise le comportement des bâtiments, ces programmes prennent en compte les interactions thermiques et énergétiques entre les différentes zones d'un bâtiment, ce qui permet d'obtenir des résultats plus réalistes.
- L'utilisation de fichiers météorologiques à long terme et à court terme, ces fichiers prennent en compte les variations saisonnières et les événements météorologiques spécifiques, ce qui permet d'évaluer les performances énergétiques des bâtiments sous différentes conditions climatiques.
- L'utilisation de cadres et d'indices approuvés par des organisations telles que l'IEA (Agence internationale de l'énergie) pour évaluer le risque de surchauffe des bâtiments et mesurer leur résilience face aux conditions climatiques extrêmes.

5.3.2 Contraintes

- Il n'y a qu'une seule année de données énergétiques disponibles. Cette contrainte temporelle peut poser des défis lors de l'analyse et de la modélisation des habitudes de consommation énergétique.
- Il peut exister une grande incertitude dans l'utilisation de fichiers météorologiques futurs. L'incertitude dans les fichiers météorologiques futurs peut rendre les prévisions énergétiques moins fiables et par conséquent affecter la précision des résultats.
- L'utilisation de dispositifs de mesure multiples et une plus longue période de collecte de données peuvent contribuer à améliorer la précision des résultats et à renforcer la fiabilité des modèles énergétiques.

5.4 Implications sur la pratique et les travaux futurs

5.4.1 Implications sur la pratique

Il est nécessaire d'introduire des mesures de sécurité pour les bâtiments de catégorie I, en mettant l'accent sur les maisons de retraite et les hôpitaux, et de réaliser une évaluation spécifique des risques de surchauffe ainsi qu'une évaluation de la résilience.

Un Soft-landing progressif détaillé avec feedback des utilisateurs sur une longue période, couvrant les périodes les plus rigoureuses de l'année (hivers et étés extrêmes), avec un Digital Twin (Figure 5-1) permettant de simuler la vie du bâtiment et d'accéder aux données à tout moment, pour n'importe quelle période depuis l'ouverture du bâtiment.

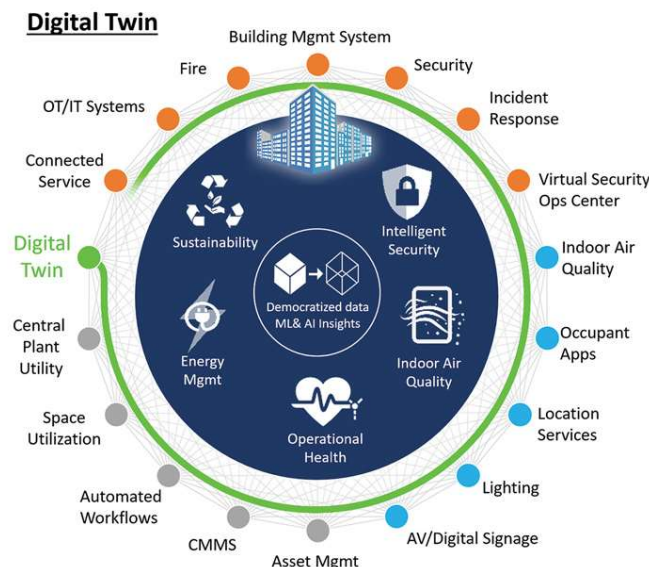


Figure 5-1 Digital Twin, Smith, J. (2021)

5.4.2 Perspectives pour les travaux futurs

Dans les travaux futurs, il serait bénéfique de prolonger l'étude actuelle sur une période plus longue en entreprenant une thèse de doctorat. Cela permettrait d'approfondir les résultats obtenus jusqu'à présent et de réaliser de nouvelles découvertes significatives.

Une autre direction de recherche prometteuse serait d'étudier la perception individuelle de la satisfaction en termes de confort. Il serait intéressant d'explorer les facteurs subjectifs qui influencent la perception du confort thermique, tels que les préférences individuelles, les attentes et les expériences antérieures. Il est essentiel de réaliser des enquêtes internes dédiées à chaque élément influençant le confort environnemental afin de garantir la satisfaction des utilisateurs. Ces enquêtes visent à évaluer la clarté de la température intérieure, le taux d'humidité, la vitesse de l'air, ainsi que d'autres aspects similaires (Attia et al., 2019). Cependant, il est crucial de corriger et d'améliorer ces enquêtes en fonction des résultats obtenus et des normes applicables. Par exemple, la norme ISO 7730 fournit des directives pour évaluer le confort thermique, tandis que la norme ISO 16813 traite de la qualité de l'air intérieur.

Un aspect important des travaux futurs consisterait à approfondir l'étude de la qualité de l'air intérieur. Comprendre les facteurs qui influencent la qualité de l'air, tels que les niveaux de polluants, l'humidité, la ventilation et la qualité microbiologique, est essentiel pour le bien-être et la santé des occupants.

Une autre approche intéressante consisterait à réaliser une étude de sensibilité globale pour évaluer l'impact des paramètres de conception passive sur le confort statique et la consommation excessive d'énergie (Mahar et al., 2020). Cela permettrait de pallier les incertitudes concernant les facteurs les plus influents sur le confort thermique et la consommation d'énergie dans les projets d'envergure.

6 Conclusion

6.1 Établir des conclusions

Avec le changement climatique croissant et les canicules qui touchent l'Europe chaque année, le problème de surchauffe et son impact sur les personnes, en particulier les personnes âgées, suscitent bien de préoccupations. Parallèlement, la demande croissante en énergie dans les bâtiments a conduit à la nécessité de rationaliser leur consommation. C'est pourquoi les maisons passives sont devenues rapidement une norme pour les nouveaux bâtiments. Cependant, ce système présente des limites, car il ne répond plus aux exigences de confort thermique dans les maisons de soins en raison du problème de surchauffe.

Dans ce contexte, l'étude vise à évaluer le confort thermique, la résilience estivale et la consommation énergétique d'une maison de soins à consommation d'énergie quasi nulle à Kain en Wallonie. Un modèle énergétique zonal est utilisé pour prédire avec précision les performances réelles du bâtiment. Le modèle est validé et calibré en se basant sur les valeurs de référence de l'ASHRAE 55 et des mesures réelles. Ensuite, des prévisions sont effectuées en utilisant différents scénarios météorologiques extrêmes (MAR BCC 2019, SSP8.5 2047 et SSP8.5 2098).

La qualité du confort thermique est évaluée à l'aide du modèle PMV/PPD. La surchauffe à l'intérieur du bâtiment est évaluée en utilisant deux indices récents, l'IOhD (Indoor Overheating Degree) et l'AWD (Ambient Warmness Degree). La résistance du bâtiment à la surchauffe est évaluée en utilisant l'indice CCOR (Climate Change Overheating Resistivity). Enfin, un bilan énergétique est réalisé pour expliquer les changements de consommation dans les différents scénarios.

Les résultats révèlent une surconsommation d'énergie du bâtiment estimée à environ 7 fois supérieure à celle prévue, entraînant une incapacité à faire face aux épisodes de chaleur. Lors de la canicule de 2019, le système de refroidissement s'est avéré insuffisant pour assurer un confort thermique adéquat, entraînant une défaillance du bâtiment. Les scénarios futurs prévoient une défaillance encore plus importante en raison de températures intérieures extrêmement élevées, tandis que la consommation énergétique a diminué en raison de besoins réduits en chauffage.

6.2 Recommandations

Il est recommandé d'effectuer une modélisation dynamique à haute résolution pour les bâtiments de ce type, en utilisant des fichiers météorologiques futurs pour tenir compte des changements climatiques prévus. La simulation de vagues de chaleur extrêmes permet de vérifier la capacité du bâtiment à maintenir le confort thermique. Pour le système de CVC, il est conseillé d'opter pour une solution adaptée et simple. Il est essentiel de garantir la conformité entre la conception et la construction réelle pour éviter des problèmes de performance. Des mesures supplémentaires sont nécessaires pour équilibrer confort et performances énergétiques.

En utilisant des critères tels que la taille, la fonctionnalité et la localisation, on peut identifier des bâtiments similaires qui serviront de point de référence pour l'évaluation. Il est important de réaliser une analyse comparative entre la consommation des bâtiments similaires, établis comme référence, et les résultats obtenus à partir des

simulations énergétiques. Cela permet de déterminer si les performances énergétiques du bâtiment en question sont conformes aux normes et aux attentes.

6.3 Suggestions pour de futures recherches

Plusieurs études belges ont examiné l'effet de la surchauffe des bâtiments sur le confort des occupants, mais aucune d'entre elles ne s'est spécifiquement concentrée sur les maisons de soin. Par conséquent, cette étude vise à évaluer la qualité du confort intérieur et à mettre en évidence les risques potentiels pour la santé des résidents de ces établissements. De cette manière, elle vise à sensibiliser les décideurs à adopter des modèles de simulation de bâtiments qui répondent aux exigences de confort dans des conditions climatiques difficiles, tout en tenant compte des caractéristiques réelles des bâtiments.

La recherche future vise à mieux comprendre la perception du confort et la qualité de l'air intérieur. Cela inclut l'exploration des facteurs subjectifs du confort thermique et des préférences individuelles, ainsi que l'analyse approfondie des paramètres de la qualité de l'air tels que les niveaux de polluants, l'humidité, la ventilation et la qualité microbiologique. Ces études permettront d'améliorer le bien-être des occupants en créant des environnements intérieurs plus sains et en répondant aux besoins individuels en matière de confort.

Une approche intéressante serait d'effectuer une étude de sensibilité globale pour évaluer l'impact des paramètres de conception passive sur le confort statique et la consommation d'énergie (Mahar et al., 2020). Cela remédierait aux incertitudes concernant les facteurs influents sur le confort thermique dans les projets d'envergure.

7 Références

- 1- Amada, K., Kim, J., Inaba, M., Akimoto, M., Kashihara, S., & Tanabe, S. ichi. (2022). Feasibility of staying at home in a net-zero energy house during summer power outages. *Energy and Buildings*, 273(112352). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112352>
- 2- Amaripadath, D., Velickovic, M., & Attia, S. (2022). Performance evaluation of a nearly zero-energy office building in temperate oceanic climate based on field measurements. *Energies*, 15, 6755. <https://doi.org/10.3390/en15186755>
- 3- Amaripadath, D., et al. (2023). Climate change sensitive sizing and design for nearly zero-energy office building systems in Brussels. *Energy and Buildings*, 286, 112971. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112971>
- 4- Attia, S. (2020). Spatial and Behavioral Thermal Adaptation in Net Zero Energy Buildings: An Exploratory Investigation. *Sustainability*, 12(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/su12197961>
- 5- Attia, S., Shadmanfar, N., & Ricci, F. (2020). Developing two benchmark models for nearly zero energy schools. *Applied Energy*, 263, 114614. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114614>
- 6- Attia, S., Rahif, R., Corrado, V., Levinson, R., Laouadi, A., Wang, L., Sodagar, B., Machard, A., Gupta, R., Olesen, B., Zinzi, M., Heiselberg, P., & Hamdy, M. (2021). Framework to evaluate the resilience of different cooling technologies. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33998.59208>
- 7- Attia, S., Rahif, R., Fani, A., & Amer, M. (2021, September 1). Comparison of overheating risk in nearly zero-energy dwelling based on three different overheating calculation methods. <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30147>
- 8- Attia, S., & Gobin, C. (2020). Climate Change Effects on Belgian Households: A Case Study of a Nearly Zero Energy Building. *Energies*, 13(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/en13205357>
- 9- Attia, S., Shadmanfar, N., & Ricci, F. (2020). Developing two benchmark models for nearly zero energy schools. *Applied Energy*, 263, 114614. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114614>
- 10- Barriopedro, D., Fischer, E. M., Luterbacher, J., Trigo, R. M., & García-Herrera, R. (2011). The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Science (New York, N.Y.)*, 332(6026), 220–224. <https://doi.org/10.1126/science.1201224>

- 11-Basu, R., & Samet, J. M. (2002). Relation between Elevated Ambient Temperature and Mortality: A Review of the Epidemiologic Evidence. *Epidemiologic Reviews*, 24(2), 190–202.
<https://academic.oup.com/epirev/article/24/2/190/535042>
- 12-Bertrand, S., & Université de Liège > Master ingé. civ. arch., À. F. (2020). Master thesis: The effects of transparent adaptive façades on energy and comfort performances in office buildings.
<https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/9099>
- 13-Brits E., Boone I., Verhagen B., Dispas M., Vanoyen H., Van der Stede Y., and Van Nieuwenhuysse A.: Climate change and health: set-up of monitoring of potential effects of climate change on human health and on the health of animals in Belgium. Unit environment and health, Brussels, Belgium,
https://www.belspo.be/belspo/organisation/publ/pub_ostc/agora/ragjj146_en.pdf
- 14- Cacabelos, A., Eguía, P., Febrero, L., & Granada, E. (2017). Development of a new multi-stage building energy model calibration methodology and validation in a public library. *Energy and Buildings*, 146, 182–199.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.071>
- 15- CEN. (2019). EN 16798-1 - Energy performance of buildings - Ventilation for buildings part 1. CEN, Brussels, Belgium.
https://www.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=197292&p40_language_code=en&p40_detail_id=88831
- 16- Centers for Disease Control and Prevention. (2020, April 14). About Extreme Heat | Natural Disasters and Severe Weather | CDC. Retrieved from
https://www.cdc.gov/disasters/extremeheat/heat_guide.html
- 17- CEU. JRC. (2022). Drought in Europe: August 2022 : GDO analytical report. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/264241>
- 18- 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. *ESSD*, 14(7), 3039–3051. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3039-2022>
- 19- European Parliament. (2023). Energy performance of buildings: Climate neutrality by 2050. News. Retrieved from
<https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20230206IPR72112/energy-performance-of-buildings-climate-neutrality-by-2050>

- 20- Eurostat. (2021). Cooling and heating degree days by NUTS 2 regions - annual data. European Commission, Brussels, Belgium. Retrieved from https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_chddr2_a/default/table?lang=en
- 21- Feist, D. W., Pfluger, D. R., & Kaufmann, D. B. (2007). Specifications for Quality Approved Passive Houses
- 22- Gagnon, D., Schlader, Z. J., Adams, A., Rivas, E., Mulligan, J., Grudic, G. Z., Convertino, V. A., Howard, J. T., & Crandall, C. G. (2016). The Effect of Passive Heat Stress and Exercise-Induced Dehydration on the Compensatory Reserve During Simulated Hemorrhage. *Shock* (Augusta, Ga.), 46(3 Suppl 1), 74–82. <https://doi.org/10.1097/SHK.0000000000000653>
- 23- Goncalves, V., Ogunjimi, Y., & Heo, Y. (2021). Scrutinizing modeling and analysis methods for evaluating overheating risks in passive houses. *Energy and Buildings*, 234, 110701. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110701>
- 24- Hamdy, M., Carlucci, S., Hoes, P.-J., & Hensen, J. (2017). The impact of climate change on the overheating risk in dwellings—A Dutch case study. *Building and Environment*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.031>
- 25- ISO. (2017). DS/ISO 17772-1:2017 Energy performance of buildings – Indoor environmental quality – Part 1: Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings. Geneva, Switzerland
- 26- Ibrahim, A., & Pelsmakers, S. L. (2018). Low-energy housing retrofit in North England: Overheating risks and possible mitigation strategies. *Building Services Engineering Research and Technology*, 39(2), 161–172. <https://doi.org/10.1177/0143624418754386>
- 27- Judkoff, R., & Neymark, J. (1995). International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method. <https://doi.org/10.2172/90674>
- 28- KMI. (2020, 2 octobre). Klimaatverandering: Waarnemingen in België. Récupéré sur <https://klimaat.be/nlbe/klimaatverandering/belgie/waarnemingen-belgie>
- 29- Kovats, R. S., & Hajat, S. (2008). Heat stress and public health: A critical review. *Annual Review of Public Health*, 29, 41–55. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843>
- 30- Laouadi, A., Ji, L., Shu, C., Wang, L. (Leon), & Lacasse, M. A. (2023). Overheating Risk Analysis in Long-Term Care Homes—Development of

Overheating Limit Criteria. *Buildings*, 13(2), Article 2.
<https://doi.org/10.3390/buildings13020390>

- 31- Liu, C., Kershaw, T., Fosas, D., Gonzalez, A. P., Natarajan, S., & Coley, D. (2017). High resolution mapping of overheating and mortality risk. *Building and Environment*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.028>
- 32- Mahar, W. A., Verbeeck, G., Reiter, S., & Attia, S. (2020). Sensitivity Analysis of Passive Design Strategies for Residential Buildings in Cold Semi-Arid Climates. *Sustainability*, 12(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/su12031091>
- 33- Mapsontheweb. (2016, December 5). Köppen climate classification - Europe [Map]. Zoom-Maps. Retrieved from <https://mapsontheweb.zoom-maps.com/post/154761510530/k%C3%B6ppen-climate-classification-europe>
- 34- Maivel, M., Kurnitski, J., & Kalamees, T. (2015). Field survey of overheating problems in Estonian apartment buildings. *Architectural Science Review*, 58(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/00038628.2014.970610>
- 35- McLeod, R. S., Hopfe, C. J., & Kwan, A. (2013). An investigation into future performance and overheating risks in Passivhaus dwellings. *Building and Environment*, 70, 189–209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.024>
- 36- Ouzeau, G., Soubeyroux, J.-M., Schneider, M., Vautard, R., and Planton, S. (2016). Heat waves analysis over France in present and future climate: Application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Clim. Serv.*, 4, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.09.002>
- 37- 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, 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- 38- Rahif, R., Hamdy, M., Homaei, S., Zhang, C., Holzer, P., & Attia, S. (2022). Simulation-based framework to evaluate resistivity of cooling strategies in buildings against overheating impact of climate change. *Building and Environment*, 208, 108599. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108599>
- 39- Rahif, R., Fani, A., Kosiński, P., & Attia, S. (2021, September 1). Climate Change Sensitive Overheating Assessment in Dwellings: A Case Study in Belgium. <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30125>
- 40- Rahif, R., Norouzasas, A., Elnagar, E., Doutreloup, S., Pourkiaei, S., Amaripadath, D., Romain, A., Fettweis, X., & Attia, S. (2022). Impact of climate change on nearly zero-energy dwelling in temperate climate: Time-

- integrated discomfort, HVAC energy performance, and GHG emissions. *Building and Environment*, 223, 109397. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109397>
- 41- Rahif, R., Kazemi, M., & Attia, S. (2023). Overheating analysis of optimized nearly Zero-Energy dwelling during current and future heatwaves coincided with cooling system outage. *Energy and Buildings*, 287, 112998. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112998>
 - 42- Rahif, Ramin, Abdulrahman Fani, Piotr Kosiński, and Shady Attia. (2021). Climate Change Sensitive Overheating Assessment in Dwellings: A Case Study in Belgium
 - 43- Revue pratique des logiciels de simulation énergétique dynamique (SED). (2015)
 - 44- RMI: Rapport climatique 2020 de l'information aux services climatiques, edited by: Gellens, D., Royal Meteorological Institute of Belgium, Brussels, ISSN 2033-8562, https://www.meteo.be/resources/misc/climate_report/RapportClimatique-2020.pdf
 - 45- Rouleau, J., & Gosselin, L. (2021). Impacts of the COVID-19 lockdown on energy consumption in a Canadian social housing building. *Applied Energy*, 287, 116565. doi:10.1016/j.apenergy.2021.116565
 - 46- Rouchier, S. (2022). Building energy statistical modelling. Retrieved February 21, 2023, from <https://buildingenergygeeks.org/modelling.html>
 - 47- Sardon, J.-P., & Robertson, G. D. (2004). Recent Demographic Trends in the Developed Countries. *Population (English Edition, 2002-)*, 59(2), 263–314. doi:10.2307/3654905
 - 48- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M., & Zhou, B. (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1513–1766). Cambridge University Press
 - 49- Sheng, M., Reiner, M., Sun, K., & Hong, T. (2023). Assessing thermal resilience of an assisted living facility during heat waves and cold snaps with power outages. *Building and Environment*, 230, 110001

- 50- Smith, J. (2021, March 15). Optimize with Digital Twin Technology. Facility Executive. Retrieved from <https://facilityexecutive.com/optimize-with-digital-twin-technology>
- 51- Sun, K., Specian, M., & Hong, T. (2021). Nexus of thermal resilience and energy efficiency in buildings: A case study of a nursing home. *Energy and Buildings*, 233, 110801. doi:10.1016/j.enbuild.2021.110801
- 52- Suarez-Gutierrez, L., Müller, W. A., Li, C., & Marotzke, J. (2020). Hotspots of extreme heat under global warming. *Climate Dynamics*, 55, 429-447. doi:10.1007/s00382-019-04984-5
- 53- Techniques de construction durable des bâtiments II Enveloppe | CDC FSA. (n.d.). Retrieved February 21, 2023, from <https://www.cdc-fsa.be/livre/97>
- 54- Tochihara, Y., Ohnaka, T., & Nagai, Y. (1993). Physiological responses and thermal sensations of the elderly in cold and hot environments. *Journal of Thermal Biology*, 18(5-6), 355-361
- 55- United Nations. (2015). Sustainable Development Goals. Retrieved from <https://sdgs.un.org/goals>
- 56- Van de Vel, K., Vandenberghe, D., Bruffaerts, N., De Clercq, E., De Ridder, K., Devleesschauwer, B., Koppen, G., Vanuytrecht, E., & Willen, P. (2019). Impact of climate change on the healthcare system in Belgium: Study commissioned by the Federal Public Service Health, Food Chain Safety and Environment, Final Report
- 57- Vanwynsberghe, H., Sengupta, A., Breesch, H., & Steeman, M. (2022). Evaluating thermal resilience to overheating in a Belgian apartment in shock scenarios. [Conference paper]. Actes du 42e AIVC - 10e TightVent - 8e venticool Conference, 1-10. Rotterdam, Pays-Bas

8 Poster



Evaluation of thermal resilience and energy efficiency in a healthcare facility in Wallonia

Authors: Taha Osman Safi

E-mail: tahaosmansafi@gmail.com
Address: Sustainable Building Design Lab
Quartier Polytech 1
Allée de la Découverte 9
4000 Liège, Belgium
www.sbd.ulg.ac.be
Tel: +32 43.66.91.55
Fax: +32 43.66.29.09

ABSTRACT

This study evaluates the thermal comfort, summer resilience, and energy consumption of a nearly zero-energy care home in Kain, Wallonia. It highlights the challenges posed by building overheating during heatwaves and the need for improvements in the legislative framework for care facilities in Wallonia. The results show significant overconsumption of building energy, difficulty in managing heat during the 2019 heatwave, and potential severe failures in future scenarios with high indoor temperatures. It emphasizes the importance of integrating long-term and short-term indicators for assessing indoor overheating and occupant comfort, as well as using actual and future climate data for accurate estimations.

KEYWORDS

Healthcare facilities - Passive houses - Building energy simulation (BES) - Thermal comfort - Thermal resilience - Energy performance - Future climate scenarios - Extreme heat event

PROBLEM

Due to climate change and annual heatwaves in Europe, the growing problem of overheating and its impact on individuals, particularly the elderly, is a major concern. Furthermore, the increasing energy demand in buildings necessitates more efficient consumption. While passive houses have become the norm for new constructions, they may not adequately address thermal comfort in nursing homes due to overheating issues.

OBJECTIVE

The objective is to evaluate the building's thermal comfort and energy efficiency in extreme climatic conditions, considering both short and long-term scenarios, and assess the impact of severe future scenarios (MAR BCC 2019, SSP8.5 2047 et SSP8.5 2098) on user safety.

AUDIANCE

This work benefits multiple stakeholders, including the director and technical manager of the building, MK Engineering, the Wallonia Agency for Quality of Life, the Federation of Retirement Homes, and building professionals.

RESEARCH QUESTION

What are the short-term and long-term overheating risks in nursing homes in Wallonia?

ORIGINALITY

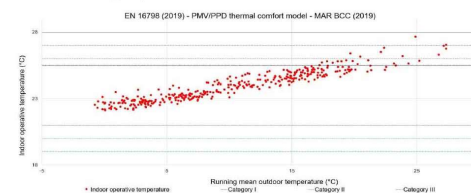
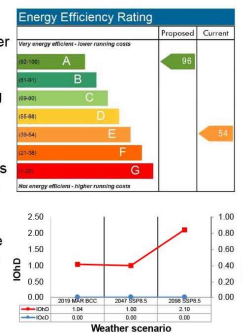
- The model calibration is based on real measurements, which are used to accumulate detailed characterization and refine simulation models
- The use of regularly updated multizone simulation programs to more accurately model the behavior of buildings.
- The use of long-term and short-term weather files, considering seasonal variations and specific weather events.
- The use of frameworks and indices endorsed by organizations such as the IEA (International Energy Agency) to assess the risk of building overheating.

METHODOLOGY

This methodology assesses the energy performance and user comfort of a building through precise modeling and real data. The building's characteristics and energy consumption zones are determined. Thermal comfort is evaluated using the PMV/PPD model, considering user well-being and energy balance. Scenarios test the comfort of occupants, energy performance, and resilience to heatwaves. Recent overheating analysis indicators, namely Indoor Overheating Degree (IOhD), Ambient Warmness Degree (AWD), and Climate Change Overheating Resistivity (CCOR), are utilized (Rahif et al., 2023).

RESULTS

The findings reveal that the building has experienced an energy overconsumption nearly 8 times greater than anticipated, posing difficulties in effectively managing heatwaves. During the 2019 heatwave, the cooling system failed to provide sufficient thermal comfort, leading to a building malfunction. For instance, temperatures in the south-facing rooms surpassed 28°C in June 2019 and are projected to potentially reach a scorching 34°C by June 2098. Disturbingly, future projections indicate an even more severe vulnerability due to excessively high indoor temperatures. Interestingly, energy consumption has decreased owing to reduced heating requirements.



CONCLUSION

To summarize, addressing thermal comfort and energy efficiency challenges requires high-resolution dynamic modeling with future weather files. Suitable HVAC solutions and design-construction compliance are crucial. Comparative analysis with reference buildings informs energy consumption and performance evaluation. Future research should focus on subjective comfort perception and indoor air quality parameters. Creating healthier indoor environments enhances occupants' well-being. Conducting sensitivity analyses of passive design parameters reduces uncertainties in large-scale projects.

Resources

Rahif, R., Kazemi, M., & Attia, S. (2023). Overheating analysis of optimized nearly Zero-Energy dwelling during current and future heatwaves coincided with cooling system outage. *Energy and Buildings*, 287, 112998. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112998>

9 Annexe

9.1 Rapport PHPP

Gains solaires Q_S

Total kWh/(m²a)

Apports internes Q_I

Longueur de la période de chauffe d/a * Puissance des apports internes q_i W/m² * A_{RE} m² = kWh/a kWh/(m²a)

Apports gratuits Q_F $Q_S + Q_I =$ kWh/a kWh/(m²a)

Rapport apports gratuits / déperditions $Q_F / Q_V =$

Valorisation des apports gratuits η_G $(1 - (Q_F / Q_V)^5) / (1 - (Q_F / Q_V)^5) =$

Total des apports Q_G $\eta_G * Q_F =$ kWh/a kWh/(m²a)

Besoin de chauffage Q_H $Q_V - Q_G =$ kWh/a kWh/(m²a)

Valeur limite kWh/(m²a) Le critère est-il respecté ? (oui / non)

9-1 Besoin de chauffage - rapport PHPP

Puissance des gains solaires P_S Total = ou

Puissance des apports internes P_I Puissance spécifique W/m² * A_{EB} m² = $P_{I\ 1}$ W ou $P_{I\ 2}$ W

Apports de chaleur P_G $P_S + P_I =$ $P_{G\ 1}$ W ou $P_{G\ 2}$ W

$P_V - P_G =$ ou

Puissance de chauffage P_H = W

Puissance de chauffage spécifique à la surface habitable P_H / A_{EB} = W/m²

Saisie de la température maximale d'air neuf °C Température maximale d'air neuf $\vartheta_{zu,Max}$ °C Température d'air neuf sans post chauffe $\vartheta_{zu,Min}$ °C °C

Comparaison: puis. max. de chauff., qui peut être véhiculée par l'air neuf $P_{Zuluft,Max}$ = W spécifique: W/m²

Possibilité de chauffer via l'air neuf ? (oui / non)

9-2 Puissance de chauffage - rapport PHPP

Valeur du Ψ pour le conduit d'air neuf ou pulsé

Diamètre nominal	165 mm
Epaisseur de l'isolation	15 mm
Surface réfléchissante ? Saisir une cellule avec "x"!	
x	Oui
	Non
Conductivité thermique	0,04 W/(mK)
Débit d'air nominal	5613 m³/h
$\Delta\theta$	14 K
Diamètre intérieur du conduit	0,165 m
Diamètre intérieur	0,165 m
Diamètre extérieur	0,195 m
α -intérieur	170,82 W/(m²K)
α -superficie	3,44 W/(m²K)
Valeur Ψ	0,869 W/(mK)
Diff. de température de surface	6,093 K

Calcul annexe:

Valeur du Ψ pour le conduit d'air vicié ou extrait

Diamètre nominal	165	mm
Epaisseur de l'isolation:	15	mm
Surface réfléchissante ? Saisir une cellule avec "x"!		
x	Oui	
	Non	
Conductivité thermique	0,04	W/(mK)
Débit d'air nominal	5613	m³/h
$\Delta\theta$	14	K
Diamètre intérieur du conduit	0,16500	m
Diamètre extérieur du conduit	0,16500	m
Diamètre extérieur	0,19500	m
α -intérieur	170,82	W/(m²K)
α -superficie	3,44	W/(m²K)
Valeur Ψ	0,869	W/(mK)
Diff. de température de surface	6,093	K

9-3 Ventilation - rapport PHPP

Calcul des apports de chaleur internes		Occupants		P		Besoin de chauffage		2 kWh/(m²·a)			
internes		Surface réf. éner.		160,0 m²		Période de chauffe		205 d/a			
N° de la colonne		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Utilisation		Existant (1/0) - nombre occupants	Dans le volume protégé (1/0)	Consommation normalisée	Facteur d'utilisation	Fréquence	Energie utile (kWh/a)	Compte dans le bilan électrique ?	Disponibilité	Utilisé pendant la période (par)	Apport de chaleur interne (W)
Vaisselle	1	1	1,5	kWh/usage	1,00	65 /P(a)	15080 *		0,30 /	8,76 =	516
Lessive	1	1	1,4	kWh/usage	1,00	57 /P(a)	12312 *		0,30 /	8,76 =	422
Séchage du linge:	1	1	3,7	kWh/usage	0,88	57 /P(a)	29127 *		1,00 /	8,76 =	3325
Sèche-linge à évac. - électricité	1	1	0,0				0		0,80 /		
Consommation d'énergie par évaporation	1	1	~3,1	kWh/usage	0,60	57 /P(a)	*****	(- 0) *	1,00 /	8,76 =	-1955
Réfrigérateur	1	1	0,7	kWh/d	1,00	365 d/a	252 *		1,00 /	8,76 =	29
Congélateur	1	1	0,8	kWh/d	1,00	365 d/a	299 *		1,00 /	8,76 =	34
ou combinaison réfrigérateur-congélateur	0	1	1,0	kWh/d	1,00	365 d/a	320 *		1,00 /	8,76 =	0
Cuisson	1	1	0,4	kWh/usage	1,00	500 /P(a)	32000 *		0,50 /	8,76 =	1826
Eclairage	1	1	60,0	W	1,00	2,9 kWh/P(a)	27840 *		1,00 /	8,76 =	3178
Electronique	1	1	80,0	W	1,00	0,55 kWh/P(a)	7040 *		1,00 /	8,76 =	804
Petit matériel / autres	1	1	50,0	kWh	1,00	1,0 /P(a)	8000 *		1,00 /	8,76 =	913
Matériel auxiliaire (voir feuille "Electricité auxiliaire")											
Autres installations (voir feuille "Electricité auxiliaire")	0	0	0,0				0 *		0 /	8,76 =	0
Occupants	160	1	80,0	W/P	1,00	8,76 kWh/a	*****		0,55 /	8,76 =	7040
Eau froide	160	1	~5,0	W/P	1,00	8,76 kWh/a					-800
Evaporation	160	1	~25,0	W/P	1,00	8,76 kWh/a	*****		1,00 /	8,76 =	-4000
Total										W	11337
Valeur spécifique										W/m²	1,51
Chaleur apports internes								205 d/a		kWh/(m²·a)	7,4

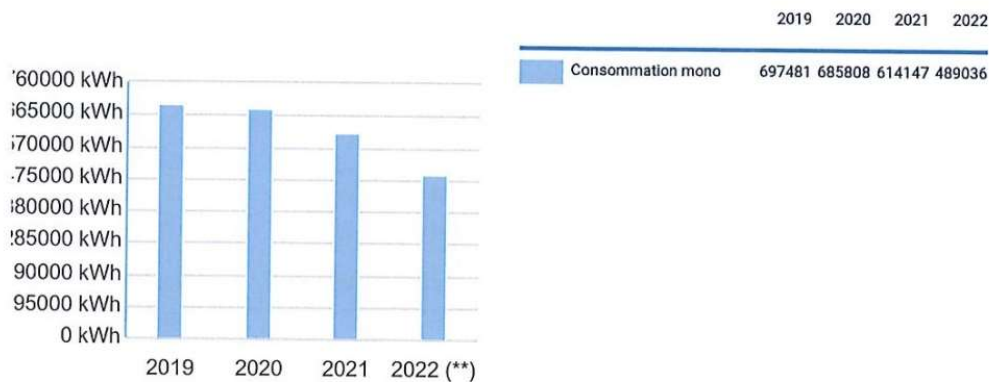
9-4 Apports intern - rapport PHPP

N° de la colonne		Logements		Fraction sol. ECS lave-linge/vaisselle		Fact. d'éner. primaire:		Vecteur d'énergie chauffage / ECS:				
		1	2	0%		Elec 2, 7		Gaz 1, 1				
		Occupants 160, 0 P		Efficacité de la production ECS 0%		kWh/kWh		kWh/kWh				
		Surface Auj. 7483 m²		Efficacité de la production chauffage 0%								
		Besoin de chaleur 2 kWh/(m²a)										
Utilisation		1	2	3	4	5	6	7	8a			
Existant? (1/0)												
Dans le volume protégé? (1/0)												
Consommation normalisée												
Facteur d'utilisation												
Fréquence												
Quantité de ref.												
Energie utile (kWh/a)												
Part d'électricité												
Part non électrique												
Besoin en électricité (kWh/a)												
Besoin additionnel												
Indice d'efficacité												
Fraction solaire												
Besoin non électriques (kWh/a)												
Besoin en énergie primaire (kWh/a)												
Vaisselle	1	1	1,45	kWh/usage	1,00	65	(P*)	###	P = 15080	50%	7540	20358
Raccordement eau chaude	1	1	1,45	kWh/usage	1,00	57	(P*)	###	P = 12312	55%	6772	18283
Lessive	1	1	1,95	kWh/usage	1,00	57	(P*)	###	P = 29127	100%	29127	78643
Raccordement eau chaude	1	1	3,65	kWh/usage	0,88	57	(P*)	###	P = 17127	100%	17127	46400
Séchage du linge	1	1	3,65	kWh/usage	0,60	57	(P*)	###	P = 32000	100%	32000	86400
Sèche-linge à évac.	1	1	3,13	kWh/usage	1,00	365	da	1	HH	100%	252	680
Refrigeration	1	1	0,69	kWh/d	1,00	365	da	1	HH	100%	299	808
Congelation	1	1	0,82	kWh/d	1,00	365	da	1	HH	100%	0	0
ou combinaison	1	1	1,00	kWh/d	1,00	500	(P*)	###	P = 27840	100%	7040	19008
Cuisson	1	1	0,40	kWh/usage	1,00	290	kh(P*)	###	P = 8000	100%	8000	21600
Eclairage	1	1	60	W	1,00	0,55	kh(P*)	###	P = 68	100%	68	184
App. électronique	1	1	80	W	1,00	0,55	kh(P*)	###	P = 0	100%	0	0
App. Electroménager	1	1	50	W	1,00	0,55	kh(P*)	###	P = 0	100%	0	0
Total élec. auxiliaire												
Autres:												
Total												
Indice												
Valeur maximale conseillée												

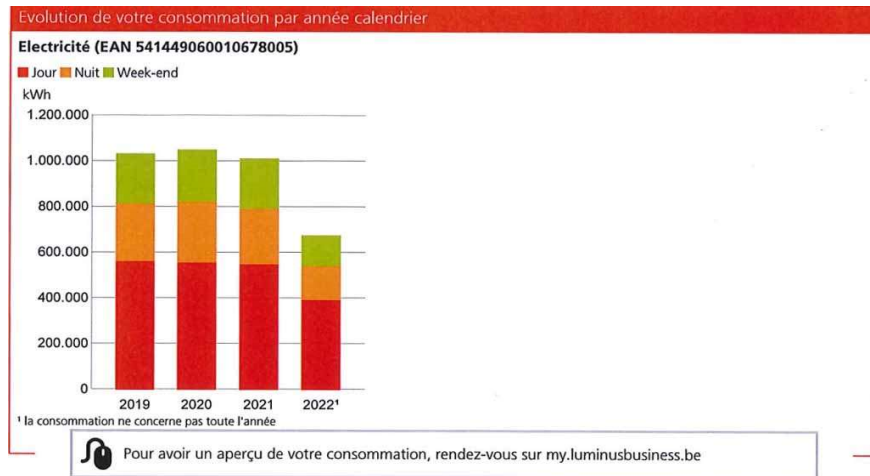
9-5 Besoin en électricité - rapport PHPP

9.2 Facture d'énergie

Evolution des consommations (2019-2022)

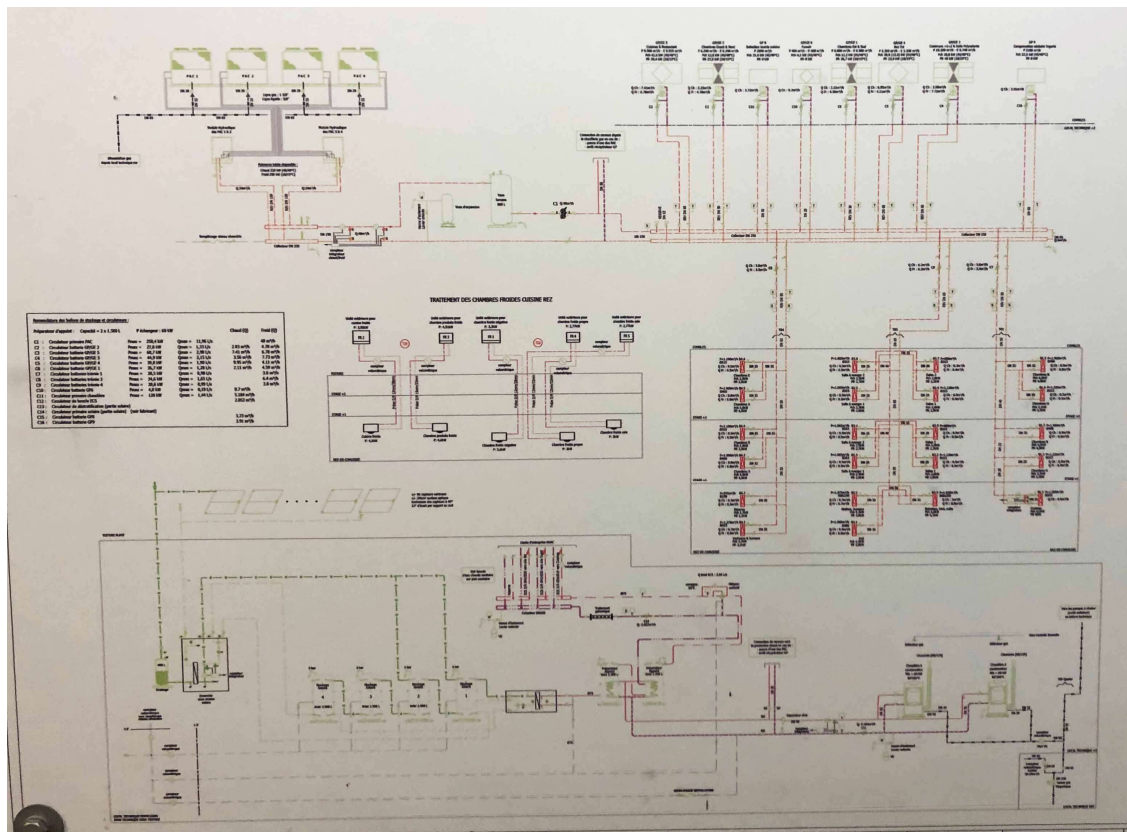


9-6 Consommation réelle de gaz



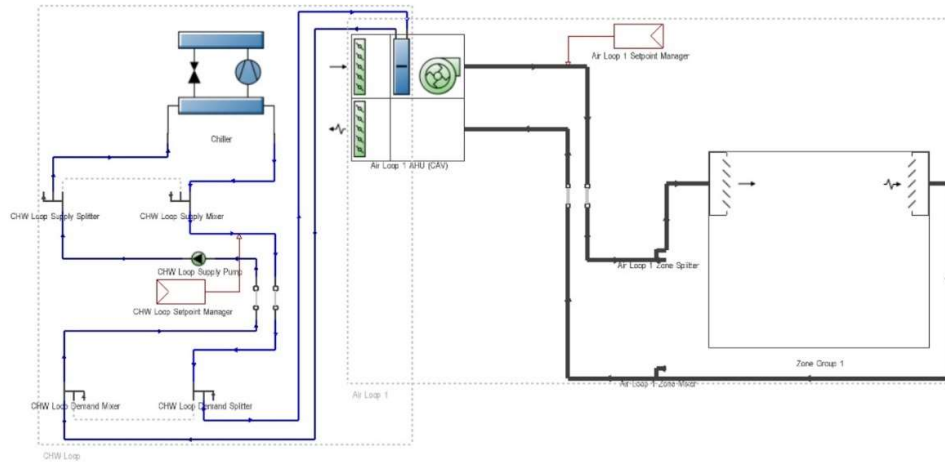
9-7 Consommation réelle d'électricité

9.3 Carte mécanique générale

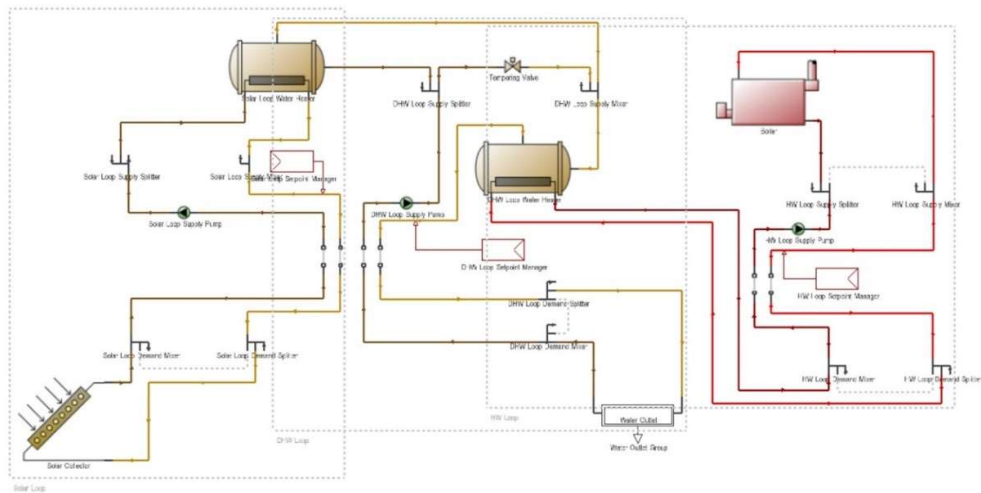


9-8 Carte mécanique générale

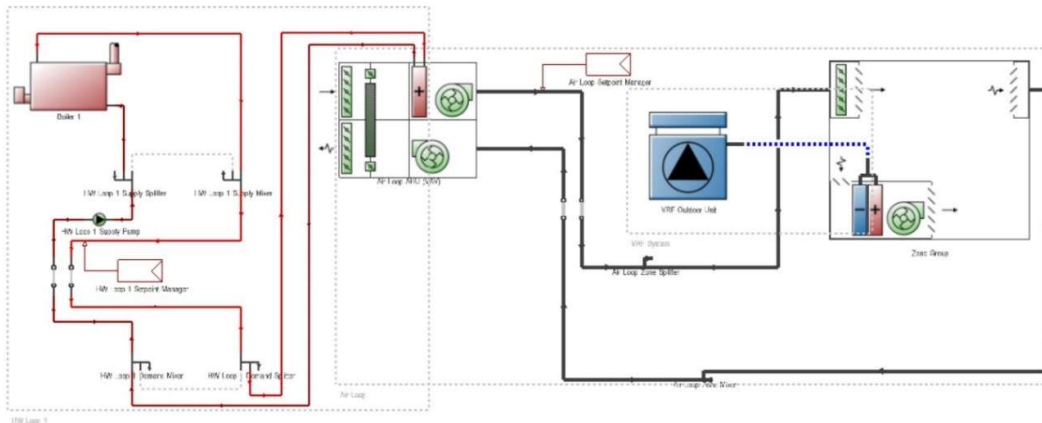
9.4 System de CVC - Design Builder



9-9 refroidisseur de chambre froide – Design Builder



9-10 circuit d'eau chaude sanitaire - Design Builder

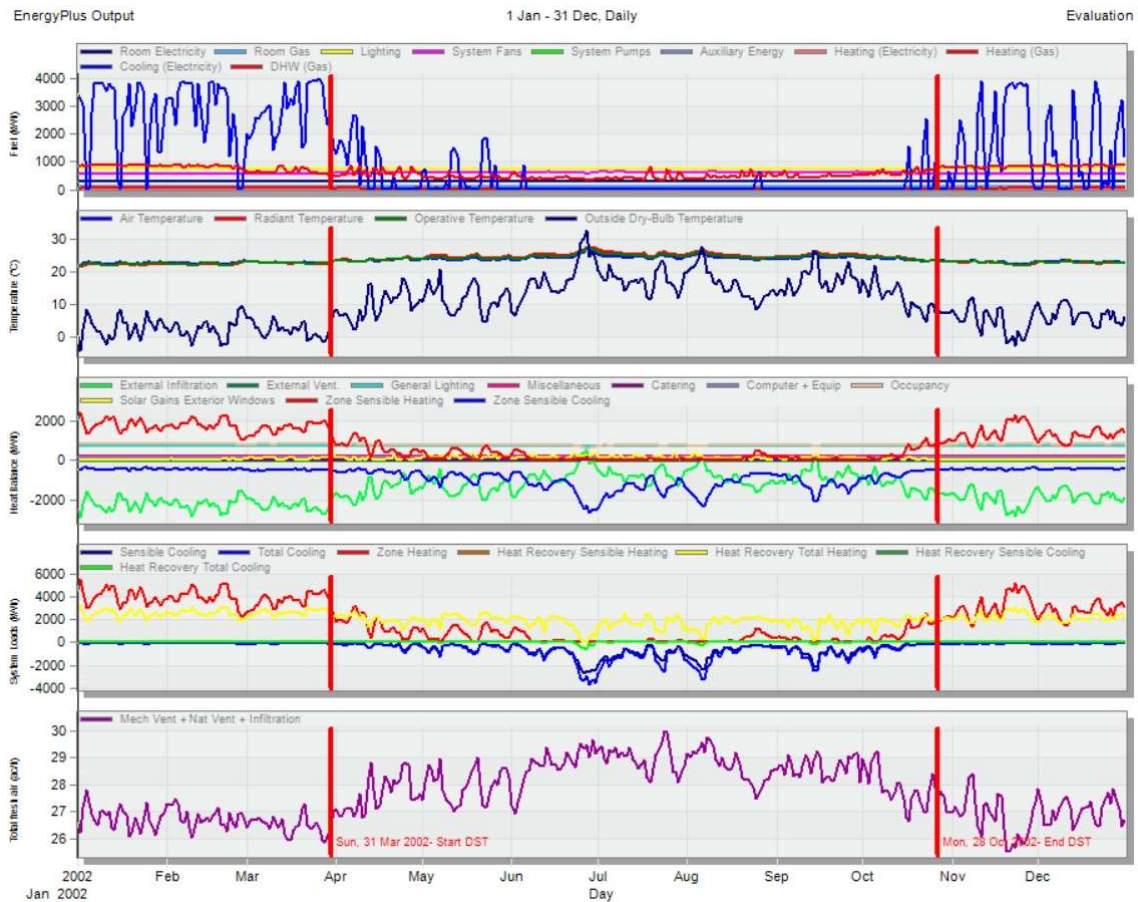


9-11 Système de chauffage, ventilation et climatisation - Design Builder

9.5 Résultat de simulation - Design Builder

	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Gasoline [kWh]	Diesel [kWh]	Coal [kWh]	Fuel Oil No 1 [kWh]	Fuel Oil No 2 [kWh]	Propane [kWh]	Other Fuel 1 [kWh]	Other Fuel 2 [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	3600.45	227364.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	393058.83	142136.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	276000.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	115236.89	38298.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	219278.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	10357.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	35040.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	230939.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3035.91
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	1052572.16	638738.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3035.91

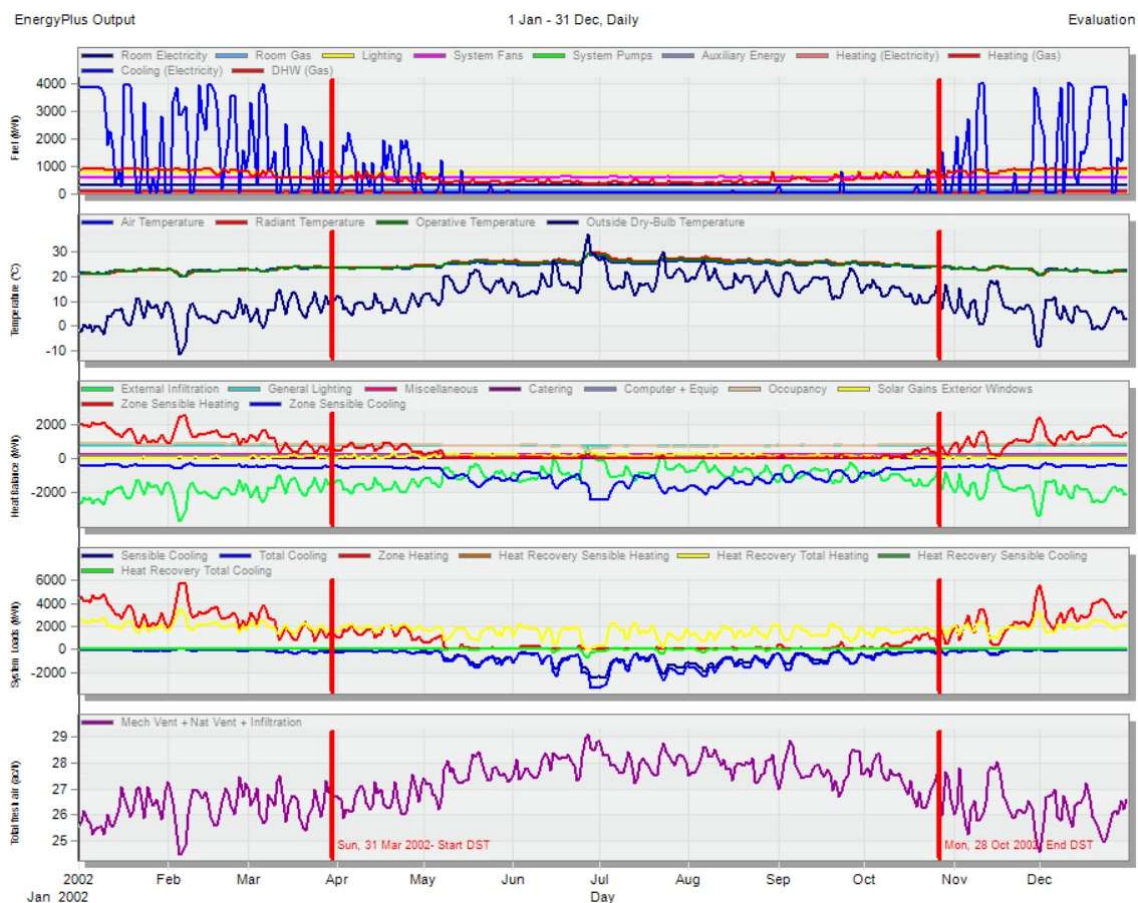
9-12 Consommation énergétique annuelle - scénario 2019



9-13 Température, gains thermiques et consommation énergétique - scénario 2019

	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Gasoline [kWh]	Diesel [kWh]	Coal [kWh]	Fuel Oil No 1 [kWh]	Fuel Oil No 2 [kWh]	Propane [kWh]	Other Fuel 1 [kWh]	Other Fuel 2 [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	2691.28	174355.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	292093.73	156602.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	276839.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	115406.34	38298.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	206874.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	10242.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	35040.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	226415.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3035.91
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	939188.48	595672.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3035.91

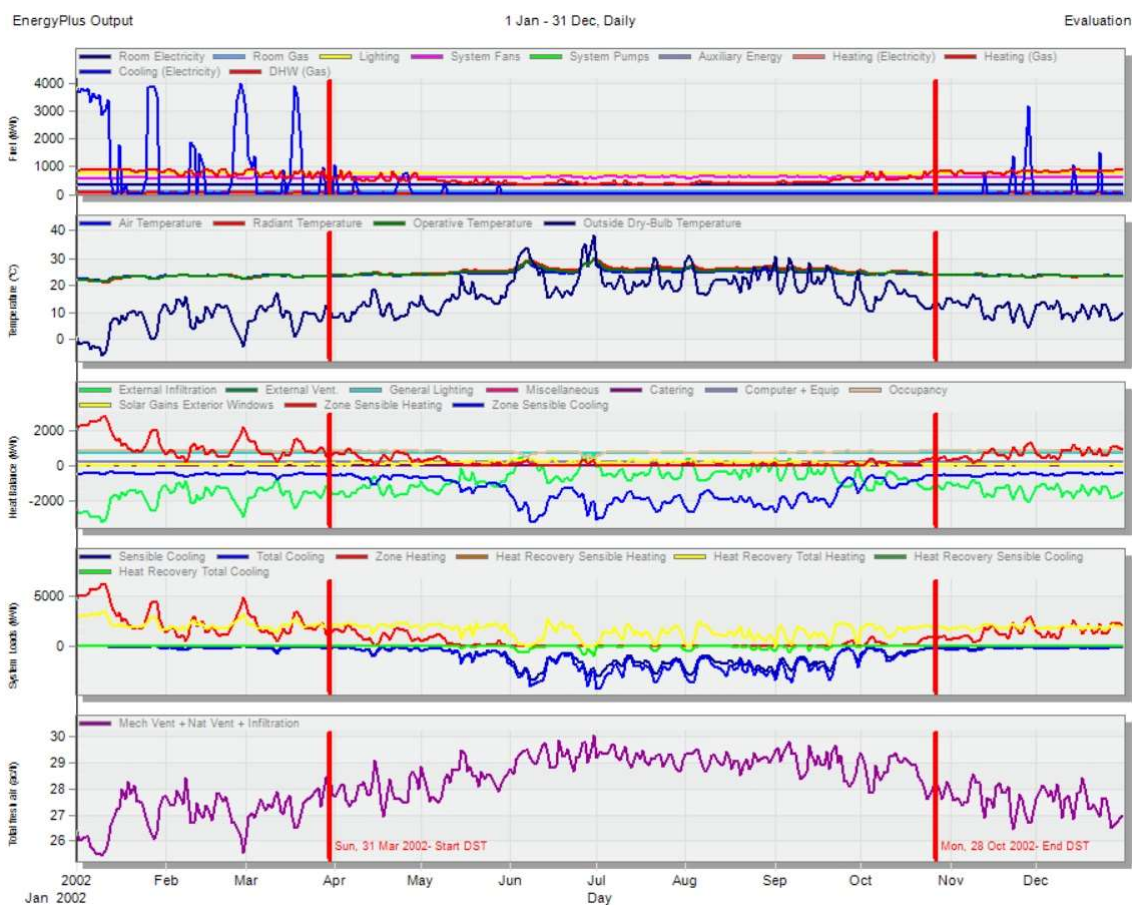
9-14 Consommation énergétique annuelle - scénario 2047



9-15 Température, gains thermiques et consommation énergétique - scénario 2047

	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Gasoline [kWh]	Diesel [kWh]	Coal [kWh]	Fuel Oil No 1 [kWh]	Fuel Oil No 2 [kWh]	Propane [kWh]	Other Fuel 1 [kWh]	Other Fuel 2 [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	2496.50	124337.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	121501.76	257714.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	276000.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	115236.89	38298.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	221269.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	10169.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	35040.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	223147.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3035.91
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	781713.95	643497.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3035.91

9-16 Consommation énergétique annuelle - scénario 2098



9-17 Température, gains thermiques et consommation énergétique - scénario 2098