

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Évaluation du risque de surchauffe d'une maison QZEN et du potentiel de la ventilation naturelle nocturne et de la masse thermique : Un cas d'étude wallon

Auteur : Poskin, Jean-Loup

Promoteur(s) : Andre, Philippe

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master : ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en "urban and environmental engineering"

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/25227>

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.



« Évaluation du risque de surchauffe d'une maison Q-ZEN et du potentiel de la ventilation naturelle nocturne et de la masse thermique : Un cas d'étude wallon »

Auteur : Jean-Loup POSKIN

Master Ingénieur Civil Architecte, à finalité spécialisée en Urban and Environmental Engineering
Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées (FSA)

Promoteur : Prof. Philippe ANDRÉ¹

Membres du jury : Prof. Shady ATTIA², Prof. Vincent LEMORT³, Ir Alanis ZEOLI³

¹ Building Energy Monitoring and Simulation, Arlon Campus Environnement, Faculté des Sciences, Université de Liège, Belgique

² Sustainable Building Design Lab, Urban and Environmental Engineering Department, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique

³ Thermodynamics Laboratory, Aerospace and Mechanical Engineering Department, Faculté des Sciences appliquées, Université de Liège, Belgique

REMERCIEMENTS

J'adresse mes premiers remerciements à mon promoteur, Monsieur Philippe André. Sa grande disponibilité tout au long du quadrimestre, son expertise dans le domaine de l'énergie des bâtiments et du logiciel TRNSYS, ainsi que sa bienveillance à mon égard, m'ont permis de mener à bien et de concrétiser ce travail.

Je remercie également chaleureusement Monsieur Shady Attia, pour le soutien qu'il m'a apporté dans la réalisation de ce travail, pour la suggestion du cas d'étude et la mise à disposition des données relatives au bâtiment, ainsi que pour son aide dans l'élaboration d'un cadre méthodologique cohérent.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Vincent Lemort et Madame Alanis Zeoli d'avoir accepté de faire partie de mon jury et d'avoir consacré leur temps et leur expertise à la lecture et à l'évaluation critique de ce travail.

Je souhaite remercier les personnes qui ont marqué de manière significative mon parcours académique, en particulier Marjorie Wilket, Patricia Tossings, Thierry Drèze, Grégoire Bourdouch, Séverine Louwette, Alice Daminet et Théophile Goethals, qui ont chacun contribué, à leur façon, à ma construction en tant qu'ingénieur civil architecte et en tant que personne.

Enfin, j'exprime toute ma gratitude à ma famille - ma mère, mon père, ma belle-mère, mon beau-père, ma sœur et mon frère - qui ont été des piliers constants tout au long de ma vie et de mon parcours. Je remercie également Gloria pour sa présence et son soutien durant la réalisation de ce travail.

RÉSUMÉ

L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments résidentiels a permis de réduire significativement les besoins de chauffage. Parallèlement, le risque de surchauffe estivale a considérablement crû et reste sous-évalué par les outils de simulation quasi-statique, historiquement orientés vers la demande de chauffage. Dans un contexte de changement climatique, cette problématique devient particulièrement critique pour les logements hautement isolés et étanches en Belgique, où les stratégies de refroidissement passif sont à privilégier par rapport aux systèmes actifs.

Ce travail vise à évaluer le risque de surchauffe et le bilan énergétique d'une maison unifamiliale située en Wallonie. Les objectifs sont multiples : i) quantifier le risque de surchauffe à l'aide de simulations dynamiques et d'indicateurs de performance reconnus, ii) évaluer le potentiel de la ventilation naturelle nocturne et de l'augmentation de l'inertie thermique quotidienne comme stratégies passives d'atténuation, iii) analyser le bilan énergétique QZEN du bâtiment, incluant son interaction avec le réseau électrique et l'impact potentiel d'une batterie de stockage.

La méthodologie repose sur des simulations dynamiques réalisées avec le logiciel TRNSYS, sur base d'un pas de temps horaire. Le risque de surchauffe est évalué à l'aide des indicateurs *Indoor Overheating Degree* (IOD) et *Ambient Warmness Degree* (AWD), appliqués selon des critères de confort thermique fixes et adaptatifs. Plusieurs scénarios sont étudiés, intégrant différents débits de ventilation, plusieurs niveaux d'inertie contrastés, ainsi que des projections climatiques futures issues du modèle climatique régional MAR selon les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5.

Les résultats montrent que la ventilation naturelle nocturne constitue une stratégie passive très efficace, d'un potentiel actuel de 86% selon le modèle confort considéré, et que l'augmentation de la masse thermique apporte un effet modéré mais complémentaire. Toutefois, l'impact des conditions extérieures sur la surchauffe du bâtiment demeure fort élevé dans les scénarios climatiques futurs et témoigne du manque de résilience des bâtiments QZEN. L'analyse du bilan énergétique met en évidence le décalage temporel important entre production photovoltaïque et demande électrique, partiellement atténué par l'intégration d'une batterie.

Mots clés :

Risque de surchauffe

Confort thermique

Simulation dynamique des bâtiments

Stratégies de refroidissement passif

Indicateurs de performance

Performance énergétique des bâtiments Q-ZEN

ABSTRACT

The improvement of the energy performance of residential buildings has led to a significant reduction in heating demand. At the same time, summer overheating risk has increased considerably and remains inaccurately addressed by quasi-static simulation tools, which were historically designed with a primary focus on heating needs. In the context of climate change, this issue becomes particularly critical for highly insulated and airtight dwellings in Belgium, where passive cooling strategies should be preferred over active systems.

This study aims to assess the overheating risk and the energy balance of a single-family dwelling located in Wallonia. We have several objectives: (i) to quantify overheating risk using dynamic simulations and recognized performance indicators, (ii) to evaluate the potential of nocturnal natural ventilation and increased daily thermal inertia as passive mitigation strategies, and (iii) to analyze the building's Q-ZEN energy balance, with particular attention to its interaction with the electricity grid and the potential contribution of battery storage.

The methodology is based on hourly dynamic simulations performed with TRNSYS software. Overheating risk is assessed using the *Indoor Overheating Degree* (IOD) and *Ambient Warmness Degree* (AWD) indicators, applied under both fixed and adaptive thermal comfort criteria. Several scenarios are investigated, including varying ventilation rates, contrasted levels of thermal mass, and future climate projections derived from the regional climate model MAR under the SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios.

The results show that nocturnal natural ventilation is a highly effective passive cooling strategy, with a current mitigation potential of up to 86% depending on the comfort model considered. Increasing thermal mass provides a more moderate but complementary effect. However, the influence of external climatic conditions on building overheating remains very strong under future climate scenarios, highlighting the limited resilience of Q-ZEN buildings. The energy balance analysis reveals a significant temporal mismatch between photovoltaic electricity production and building demand, which can be partially mitigated through the integration of battery storage.

Key words:

Overheating risk

Thermal comfort

Dynamic building simulation

Passive cooling strategies

Performance indicators

Energy Performance of Q-ZEN building

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	i
RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT	iii
SOMMAIRE	iv
1. INTRODUCTION	1
2. ETAT DE L'ART	6
2.1. Définition des concepts et théorie	6
2.1.1. Bâtiment Q-ZEN	6
2.1.2. Surchauffe et théorie du confort thermique.....	8
2.1.3. Stratégies de refroidissement	9
2.1.4. Outils et approches de modélisation	10
2.2. Études similaires	12
2.3. Trou dans les connaissances	14
3. METHODOLOGIE.....	15
3.1. FRAMEWORK.....	15
3.2. WORKFLOW.....	16
3.3. MODELE 0 : PARAMETRES FIXES	17
3.3.1. CAS D'ÉTUDE.....	18
3.3.2. DONNEES GEOMETRIQUES.....	18
3.3.3. ZONES	20
3.3.4. ENVELOPPE : MATERIAUX	20
3.3.5. ENVELOPPE : COEFFICIENTS DE TRANSFERT	22
3.3.6. ENVELOPPE : PAROIS (INITIALES)	22
3.3.7. FENÊTRES.....	22
3.3.8. CHAUFFAGE	23
3.3.9. INFILTRATION	25
3.3.10. VENTILATION (INITIALE)	25
3.3.10.1. Mécanique	25
3.3.10.2. Naturelle	26
3.3.10.3. « Couplings »	26
3.3.11. REROIDISSEMENT ACTIF	27
3.3.12. GAINS INTERNES ET PERTES	27
3.3.13. DEMANDE ÉLECTRIQUE	28

3.3.14.	DEMANDE D’EAU CHAUDE SANITAIRE (ECS).....	29
3.3.15.	DATA METEO (INITIAL)	31
3.4.	CALIBRAGE.....	32
3.4.1.	Indicateurs du calibrage	32
3.4.2.	Demande électrique	32
3.4.3.	Demande de chauffage	35
3.4.3.1.	Data de référence.....	35
3.4.3.2.	Essai 1 : Essai initial.....	36
3.4.3.3.	Calibrage : Travaux précédents	37
3.4.3.4.	Calibrage : Nos modifications / Nos paramètres.....	39
3.4.3.5.	Essai 2 : Modification du vitrage	39
3.4.3.6.	Essai 3 : Ajout de nightcooling.....	43
3.4.3.7.	Essai 4 : Influence du fichier météo.....	45
3.4.3.8.	Essai 5 : Modification des gains internes.....	49
3.4.3.9.	WORKFLOW SYNTHÉTIQUE DU CALIBRAGE	49
3.5.	BILAN Q-ZEN : MISE A JOUR DES SYSTEMES	50
3.5.1.	INTRODUCTION	50
3.5.2.	CHAUFFAGE : PAC et émetteurs.....	50
3.5.3.	PANNEAUX PHOTOVOLTAIQUES (Q-ZEN)	52
3.5.4.	BATTERIE ÉLECTRIQUE.....	53
3.5.5.	INDICATEURS BILAN Q-ZEN	53
3.6.	SIMULATION SURCHAUFFE	54
3.6.1.	INTRODUCTION	54
3.6.2.	VARIABLE : VENTILATION NATURELLE.....	54
3.6.3.	VARIABLE : INERTIE THERMIQUE.....	55
3.6.4.	VARIABLE : DATA METEO	58
3.6.5.	INDICATEURS DE SURCHAUFFE	59
3.6.6.	VARIABLE : CONFORT THERMIQUE	61
3.6.7.	RÉSUMÉ DES VARIABLES ET COMBINAISONS.....	62
4.	RESULTATS.....	63
4.1.	BILAN Q-ZEN	63
4.2.	SURCHAUFFE ET POTENTIEL DU N.C. ET DE LA M.T.	67
5.	DISCUSSION	71
5.1.	REFORMULATION DU BUT DE L’ÉTUDE	71
5.2.	RÉSULTATS CLÉS, RECOMMANDATION	71
5.3.	FORCES ET LIMITES.....	74

5.4. IMPLICATIONS SUR LA PRATIQUE ET TRAVAUX FUTURS	76
6. CONCLUSION	77
7. BIBLIOGRAPHIE.....	79
LISTE FIGURES, EQUATIONS, TABLEAUX	I
Liste des figures	I
Liste des tableaux	III
Liste des équations.....	III
ANNEXES.....	V
Annexe 1 : Études similaires pertinentes, tableaux comparatifs.....	V
Annexe 2 : Propriétés des matériaux et compositions des parois initiales.....	VII
Annexe 3 : Profils de consommations électriques par pièce	XII
Annexe 4 : Fiche technique des panneaux solaires et du ballon solaire.....	XV
Annexe 5 : Influence du châssis sur les consommations mensuelles de chauffage	XIX
Annexe 6 : Températures hivernales des fichiers météo TMY 1991-05, 2001-20 et 2006-20.....	XX
Annexe 7 : Influence des gains internes sur les consommations mensuelles de chauffage.....	XXIV
Annexe 8 : Fiche technique de la PAC	XXV
Annexe 9 : Fiche technique des panneaux photovoltaïques.....	XXVII

1. INTRODUCTION

Selon la commission européenne (Commission européenne, 2020), les bâtiments figurent parmi les plus gros consommateurs d'énergie en Europe, à hauteur de 40% de la consommation globale européenne. Cette consommation s'explique notamment par les exigences de confort fixées dans les bâtiments : il faut les maintenir chauds en hiver, frais en été. 80% de l'énergie utilisée dans les foyers européens sert au chauffage, à la climatisation et à la production d'eau chaude sanitaire (ECS). L'Agence européenne pour l'environnement (AEE) indique que le secteur du bâtiment est responsable de 34% des émissions de gaz à effet de serre (GES) pour l'année 2022 (European Environment Agency (EEA), 2024). Ces émissions sont directement liées aux combustibles fossiles utilisés pour chauffer le bâtiment (chaudières au gaz et au mazout) et indirectement liées à la production d'électricité pour le refroidissement, l'ECS, etc.

On constate depuis plusieurs décennies une diminution drastique des émissions de GES liées au secteur du bâtiment. Les politiques en matière d'efficacité énergétique ont permis de réduire de 34% les émissions totales de GES du secteur du bâtiment, entre 2005 et 2022 (European Environment Agency (EEA), 2024), comme illustré Figure 1.

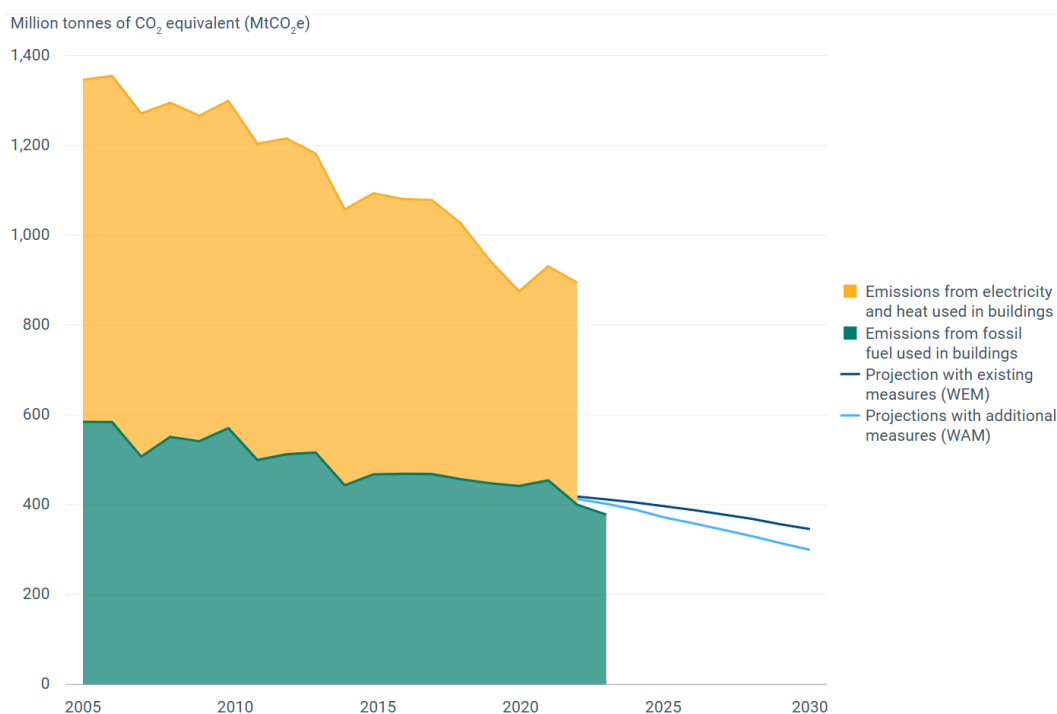


Figure 1 : Émissions de gaz à effet de serre liées à la consommation d'énergie dans les bâtiments en Europe (European Environment Agency (EEA), 2024)

Cependant, cette baisse généralisée des émissions reste fragile et n'est pas inaltérable. La baisse est, d'une part, largement liée aux stratégies de décarbonation de l'Union Européenne, mais elle est aussi corrélée d'autre part à la réduction des besoins de chauffage grâce à des hivers globalement plus doux (European Environment Agency (EEA), 2024), conséquence du dérèglement climatique.

Par exemple, à Malte où les effets du réchauffement climatique sont plus marqués, on a constaté une augmentation des émissions de GES, liée aux besoins grandissant d'électricité pour la climatisation. La tendance à long terme des émissions européennes de GES devrait se poursuivre par une diminution.

Néanmoins, la lecture de la Figure 2 nous apprend que les effets du réchauffement climatiques pourraient, et déjà à court terme, engendrer des augmentations des émissions de GES liées à la consommation en énergie de refroidissement dans les régions les plus touchées, comme à Malte ou au Portugal.

Ils pourraient aussi ralentir la diminution des émissions de GES de pays moins touchés, comme la République Tchèque ou la Roumanie, mais aussi la Belgique si de nouvelles mesures ne sont pas prises, comme illustré Figure 2. En effet nous remarquons un décalage du point bleu, représentant les émissions de GES projetées pour les mesures énergétiques existantes actuelles, vers des abscisses moins négatives (décalage vers la droite). Cela trahit une augmentation des émissions de GES entre 2022 et 2030 si de nouvelles mesures ne sont donc pas prises et appliquées.



Figure 2 : Émissions de GES liées à la consommation d'énergie dans les bâtiments, par pays (European Environment Agency (EEA), 2024)

D'autre part, le sixième rapport d'évaluation (AR6) du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) établit que le réchauffement climatique est un phénomène mondial et que toutes les régions vont connaître des changements climatiques simultanés (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023). Ces changements régionaux sont par exemple l'augmentation des températures annuelles, la prolongation des saisons chaudes, une plus grande fréquence et une intensification des vagues de chaleur. Ces variations régionales des principaux facteurs climatiques montrent que les impacts du changement climatique ne sont pas uniformes géographiquement.

Les données météorologiques du modèle atmosphérique régional (MAR) montrent que la Belgique connaît déjà des températures estivales plus élevées ces dernières années et une augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur (Doutreloup *et al.*, 2022). Ces observations, combinées aux projections climatiques futures, indiquent une aggravation de ces phénomènes sous des scénarios de réchauffement plus élevés.

Une des conséquences de ces changements climatiques et météorologiques est la détérioration du confort thermique au sein des bâtiments. Pour y faire face, un recours possiblement accru aux systèmes de refroidissement actif, énergivores, pourrait être nécessaire en Belgique à l'horizon 2100 (Zeoli et Lemort, 2022). Pendant que la demande en chauffage devrait décroître entre 13% et 22% d'ici les années 2090, tous les scénarios envisagés par (Elnagar, Gendebien, *et al.*, 2023) montrent que la demande énergétique liée au refroidissement des bâtiments devrait croître de l'ordre de 77% à 154%, pour des hypothèses de *business-as-usual* (BAU), comme illustré Figure 3. Il semble donc primordial d'étudier la résilience des logements QZEN et le potentiel des stratégies de refroidissement passif, qui permettraient de limiter la demande énergétique en refroidissement future.

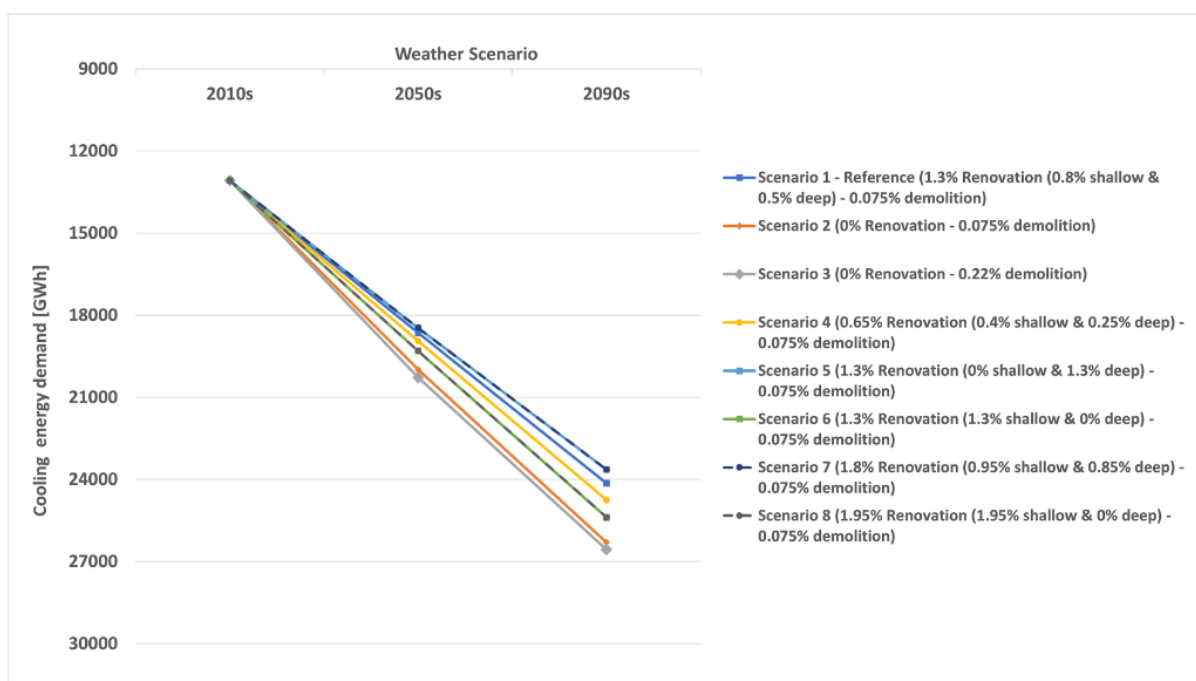


Figure 3 : Demande énergétique pour le refroidissement des bâtiments, pour différents scénarios de rénovation de l'ensemble du parc immobilier belge (Elnagar, Gendebien, *et al.*, 2023)

Par ailleurs, en dehors de toute projection climatique annonçant des conditions extérieures futures extrêmes, une campagne d'évaluation post-occupancy (POE), menée sur 149 logements wallons à haute efficacité énergétique, alerte du risque de surchauffe dont souffrent déjà les logements QZEN (Darteville *et al.*, 2021). L'enquête reporte un indice de surchauffe moyen de 10983,9Kh par an pour l'échantillon final considéré (Darteville et Vanwelde, 2018), illustré Figure 4. Cet indice témoigne de l'incapacité du logiciel PEB wallon à évaluer correctement les risques de surchauffe des bâtiments neufs, qui sont pourtant contraints à ne pas dépasser un seuil critique de 6500Kh par an.

E1 : base de données Construire Avec l'Energie (458 bâtiments analysés).

E2 : base de données corrigées par l'enquête de satisfaction (149 bâtiments). (Les données récoltées durant l'enquête de satisfaction remplacent les données incohérentes de la base de données).

E3 : enquête et base de données corrigées par les visites de terrain (25 bâtiments). (Les données récoltées durant les visites de terrain remplacent les données incohérentes de la base de données et de l'enquête de satisfaction).

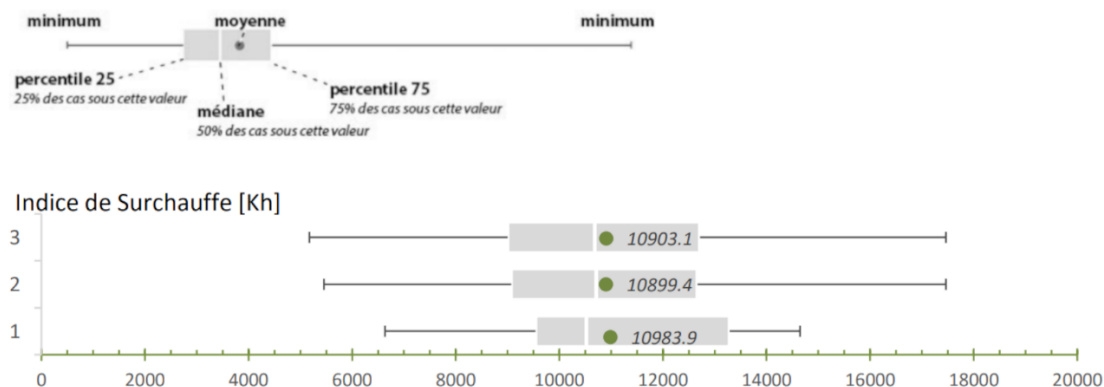


Figure 4 : Résultats concernant la surchauffe des logements QZEN de l'enquête POE menée par (Darteville et Vanwelde, 2018)

Enfin, la dernière directive européenne 2024/1275 relative à la performance énergétique des bâtiments (PEB) élève l'ambition des exigences applicables aux constructions neuves.

Ainsi, la nouvelle directive surpasse l'approche traditionnelle du bâtiment quasi zéro-énergie fondée sur un bilan annuel. Elle introduit une vision dans laquelle les bâtiments jouent un rôle actif au sein de réseaux électriques intelligents, en contribuant à la flexibilité énergétique, à l'autoconsommation locale et à l'intégration d'énergies renouvelables variables (Parlement européen, 2024).

Aussi, tous les nouveaux bâtiments à partir de 2030 devront être « zéro émission », et les États membres sont tenus d'intégrer dans les certificats PEB une évaluation du potentiel de réchauffement planétaire (GWD) calculé sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment (*life-cycle GWD*) (Parlement européen, 2024). Cette nouvelle approche, animée par les objectifs de neutralité carbone de l'UE, risque de bousculer le marché de la construction et de créer un essor des constructions en bois, tant la capacité de ce matériau à capturer le CO₂ est bénéfique dans une approche d'analyse du cycle de vie. La demande de logement croissante et la décarbonation sont des leviers qui devraient encourager la consommation mondiale de bois et l'accroître jusqu'à 170% au cours des trente prochaines années (Gresham House, 2024). En Belgique, le secteur de la construction bois est en constante croissance depuis 2011, et la construction en ossature bois représente environ 80% des systèmes constructifs en bois les plus construits. Le savoir-faire local, l'abondance de la matière première dans le pays et en Europe, la possibilité de préfabrication et de déconstruction, sont autant d'atouts en termes de bilan carbone qui pourraient participer à un élan de la construction en bois dans les années à venir (Hout info Bois, 2025).

Malgré ces constats, peu d'études intègrent simultanément la question de la surchauffe estivale, de la résilience climatique et de l'interaction horaire avec le réseau électrique dans le cadre des bâtiments QZEN en Wallonie.

C'est dans ce contexte que nous avons décidé d'ancrer notre travail et de porter notre attention sur un cas d'étude bien documenté, à savoir une maison unifamiliale QZEN à ossature bois située à Kettenis, près d'Eupen en Wallonie. La maison est composée d'une ossature bois, très légère, hautement isolée et fortement étanche, qui présente un risque actuel de surchauffe déjà élevé. Elle

ne dispose d'aucun système de refroidissement actif, et ses besoins en chauffage sont faibles (environ 15kWh/m².an).

L'objectif de ce travail est double. D'une part, nous évaluerons le bilan annuel d'un bâtiment conçu comme QZEN et son interaction actuelle avec le réseau électrique. Nous estimerons le potentiel d'une batterie sur la capacité du bâtiment à adapter sa consommation et sur son interaction avec le réseau. D'autre part, nous analyserons le risque de surchauffe du bâtiment et le potentiel de stratégies de refroidissement passives sur la diminution cette surchauffe. Parmi ces stratégies, nous étudierons le potentiel de la ventilation naturelle nocturne, et le potentiel d'un accroissement de l'inertie thermique, particulièrement faible dans les bâtiments à ossature bois très légers.

L'ensemble de ces objectifs est résumé dans l'intitulé de notre question de recherche :

« Évaluation du risque de surchauffe d'une maison Q-ZEN et du potentiel de la ventilation naturelle nocturne et de la masse thermique : Un cas d'étude wallon »

2. ETAT DE L'ART

2.1. Définition des concepts et théorie

2.1.1. Bâtiment Q-ZEN

Suite aux deux grands chocs pétroliers survenus à la fin du 20^e siècle, la gestion de l'énergie est apparue comme une question fondamentale émergente à travers le monde. La performance énergétique des bâtiments résidentiels a constitué un des enjeux principaux dans le monde occidental, tant ils représentaient et représentent encore une part significative des consommations finales d'énergie en Europe. Depuis plusieurs décennies, la recherche scientifique et les politiques publiques ont convergé vers un objectif commun : réduire drastiquement les besoins énergétiques des bâtiments. Historiquement, ces besoins concernaient en grande partie le chauffage des bâtiments.

Dans ce contexte, le concept de bâtiment passif a marqué une étape structurante. Le concept de bâtiment passif repose sur 5 fondements : une enveloppe très performante, une étanchéité à l'air élevée, une ventilation contrôlée, une conception attentive aux ponts thermiques et une optimisation des gains solaires. Ces principes ont permis d'obtenir des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh/m² par an (*Institut de la maison passive*, 2025). Cette approche a démontré son efficacité pour réduire la demande énergétique hivernale, en particulier dans les climats tempérés d'Europe occidentale.

La recherche scientifique a poursuivi l'investigation de la performance énergétique des bâtiments et le concept de « bâtiment zéro énergie » est né. Le principe fondateur de cette idée est d'obtenir un bilan énergétique nul, pour lequel la demande énergétique du bâtiment est contrebalancée par une production d'énergie renouvelable équivalente.

Cependant, la littérature scientifique met en évidence l'ambiguïté inhérente au concept de nZEB qui peut recouvrir des réalités très différentes, selon que l'on considère un bilan énergétique final, primaire, économique ou environnemental, et selon l'échelle temporelle retenue (Attia, 2018). Ainsi, plusieurs déclinaisons du concept coexistent dans la littérature. Par exemple, ATTIA (Attia, 2018) définit plusieurs concepts proches mais aux réalités radicalement différentes :

- Les "Net Zero Energy Buildings" (NZEB), qui produisent annuellement au moins l'équivalent de l'énergie qu'ils consomment à partir d'énergies renouvelables disponibles sur le site ;
- Les "Nearly Zero Energy Buildings" (nZEB), qui produisent annuellement au moins 30% de l'énergie qu'ils consomment à partir d'énergies renouvelables disponibles sur le site ;
- Les "Net Zero Energy Buildings" à la source, pour lesquels le bilan annuel tient compte de facteurs intégrant le type d'énergie consommée à la source et le mode de transport de l'import / export de l'énergie (via le réseau). Ce bilan permet s'établit alors sur des émissions CO₂ équivalentes et annuellement balancées entre l'énergie exportée et l'énergie importée ;
- Les "Life Cycle Zero Energy Buildings", dont le bilan prend notamment en compte l'énergie contenue dans les matériaux, et pour lesquels le bilan n'est plus annuel mais établi sur tout le cycle de vie du bâtiment.

Ces définitions successives laissent entrevoir les 3 étapes de conception de bâtiments hautement performants, résumées sous le nom de *Tria Energetica* (Korbee, Smolders et Stofberg, 1979), qui sont :

1. Réduire les besoins énergétiques
2. Recourir aux énergies renouvelables en priorité
3. Utiliser l'énergie fossile la plus propre possible pour le solde des besoins énergétiques

Le dénominateur commun à toutes ces définitions est donc une compensation de la consommation du bâtiment par une production en énergie renouvelable. Pour répondre à cet objectif commun, ATTIA (Attia, 2018) définit quatre grands principes fondamentaux dans la conception des NZEB, illustrés Figure 5 :

1. L'efficacité énergétique (EE) : réduire les besoins
2. La qualité de l'environnement intérieur (IEQ) : éviter la surchauffe, assurer une qualité d'air, contrôlée par la ventilation mécanique
3. Des systèmes d'énergie renouvelable (RES)
4. Réduire les émissions carbone (CO₂) : réduire les consommations en énergie primaire, en évaluant aussi les émissions liées aux transports et à la mobilité depuis le bâtiment, évaluer l'énergie contenue dans les matériaux (analyse du cycle de vie)

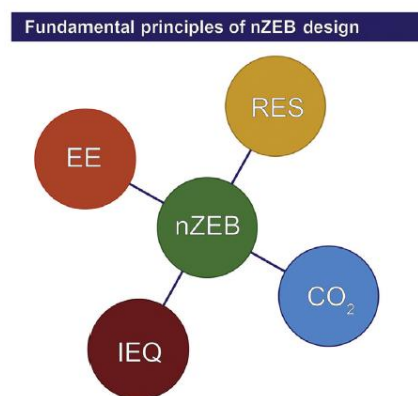


Figure 5 : Principes fondamentaux dans la conception des NZEB (Attia, 2018)

Nonobstant, chaque concept définit ses propres exigences et tient compte ou non de la temporalité des flux énergétiques. Ainsi, deux bâtiments présentant un bilan annuel nul peuvent avoir des comportements très différents vis-à-vis du réseau électrique, notamment en raison du décalage temporel entre production photovoltaïque et consommation (Sartori, Napolitano et Voss, 2012). Ce constat mène alors à une remise en question du bilan purement annuel, et accroît l'intérêt pour des analyses fondées sur des pas de temps plus courts.

En Europe, c'est la directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) (*Directive sur la performance énergétique des bâtiments*, 2025), qui impose que tous les nouveaux bâtiments soient à énergie quasi nulle. Selon cette directive, un nZEB est un bâtiment présentant une très haute performance énergétique, dont les besoins énergétiques très faibles sont couverts « dans une très large mesure » par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, produite sur site ou à proximité. Cette définition très vague laisse une marge d'interprétation importante aux États membres, ce qui a conduit à une grande diversité de définitions, d'indicateurs et de méthodes de calcul.

En Wallonie, la transposition de la directive européenne s'est traduite par l'introduction du concept de bâtiment Q-ZEN (« quasi zéro-énergie ») intégré à la réglementation PEB existante, dont les exigences sont reportées sur le site (« Exigences QZEN 2021 (2019 pour les bâtiments publics) », 2025). Le Q-ZEN wallon repose sur un ensemble d'exigences combinant la limitation des besoins énergétiques, l'efficacité des systèmes techniques et la production d'énergie renouvelable, évaluées

principalement à l'aide d'indicateurs annuels tels que le niveau E et la consommation d'énergie primaire. Les exigences fixées découlent donc de l'interprétation régionale de la directive européenne, fixées par le décret PEB et mises en application par différents arrêts gouvernementaux successifs (SPW, 2025).

Cependant, la dernière directive européenne 2024/1275 révolutionne les exigences PEB et modifie la définition à prendre en compte dans l'implantation de la PEB au niveau national. Jusqu'ici, elle s'apparentait à la définition d'un "Net Zero Energy Building" voire d'un "Nearly Zero Energy Building", mais la nouvelle directive européenne repose désormais sur une définition proche des "Life Cycle Zero Energy Buildings". Aucun décret ni arrêt gouvernemental n'implante encore cette définition au niveau régional wallon, le critère QZEN est donc toujours d'actualité, les États membres ayant jusqu'à mai 2026 pour intégrer ces nouvelles exigences au niveau national.

2.1.2. Surchauffe et théorie du confort thermique

La surchauffe des bâtiments énergétiquement performants est un enjeu majeur actuel (Attia et Gobin, 2020), qui résulte des stratégies d'efficacité énergétique historiquement mises en place et développées dans la section précédente. La réduction des déperditions thermiques, l'amélioration de l'étanchéité de l'enveloppe, les stratégies visant à maximiser les gains solaires et à tirer parti des gains internes dans la réduction des besoins de chauffage ont indirectement augmenté le risque de surchauffe des NZEB localisés dans des climats tempérés, et ce risque s'accroît avec le réchauffement climatique (Rahif *et al.*, 2022).

L'évaluation de la surchauffe est liée à la notion de confort thermique. Le confort thermique est l'état dans lequel se trouve un individu satisfait vis-à-vis de son environnement thermique. Cet état dépend de nombreux facteurs : la température de l'air ambiant, la température moyenne rayonnante des parois, l'humidité relative de l'air, la vitesse de l'air, mais aussi le métabolisme et l'habillement (« Confort thermique : généralité », 2025).

Il existe deux grandes approches du confort thermique : l'approche statique et l'approche adaptative.

L'approche statique considère des seuils fixes, donc indépendants des conditions climatiques extérieures, et repose sur la théorie de FANGER. Elle s'appuie sur des indices PMV (Predicted Mean Vote) et PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Ces indices permettent de déterminer si l'air climatisé dans lequel se trouvent les individus satisfait la majorité de ses occupants, l'objectif étant généralement un pourcentage de 90% de personnes satisfaites (Fanger, 1970). Cette théorie est originellement conçue pour évaluer les ambiances climatisées.

L'approche adaptative considère que les occupants s'adaptent partiellement aux conditions thermiques extérieures, notamment par des actions comportementales (ouverture des fenêtres, adaptation de l'habillement, utilisation de protections solaires). Le confort thermique dépend dès lors de la température extérieure récente. Pour l'estimation de la surchauffe, le seuil supérieur est généralement défini par une relation linéaire de type :

$$T_{upp} = a.T_{rm,o} + b$$

Équation 1 : Expression générale de la température limite supérieure dans l'approche de confort adaptatif

Où T_{upp} est le seuil supérieur, $T_{rm,o}$ (*outdoor running mean temperature*) la température extérieure moyenne évaluée sur plusieurs jours antécédents, a et b des coefficients dépendants de la catégorie de l'environnement considéré (qualité haute, moyenne ou modérée). Les valeurs utilisées pour définir

ces termes et les valeurs seuils associées varient d'une norme à l'autre. Notons que l'Équation 1 n'est applicable que pour une plage de température extérieure comprise entre 10°C et 30°C. Au-delà, il faut reconsidérer un seuil fixe. Cette théorie est plus adaptée aux bâtiments naturellement ventilés et fonctionnant en mode "free-running", *i.e.* sans climatisation de l'air.

Enfin, le confort thermique est évalué selon une des deux théories, pour des critères fixés par des normes. On peut citer par exemple les normes européennes EN 15251, EN 16798, la norme internationale ISO 17772, les normes américaines fixées par l'*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), ou encore les critères proposés dans les guides de l'institution anglaise *Chartered Institution of Building Engineers* (CIBSE), etc. Les critères peuvent être fixés de 3 façons différentes en général :

- Soit par le dépassement d'une température seuil (très critique) ;
- Soit par le nombre d'heures d'inconfort au court d'une saison ;
- Soit une limite fixée en degré-heure, qui résulte du cumul de l'écart entre la température intérieure et une température seuil.

Les normes peuvent démultiplier le nombre de critères et la façon de les évaluer, ce qui offre un vaste choix de possibilités d'évaluation de la surchauffe.

2.1.3. Stratégies de refroidissement

Il existe deux catégories de stratégies de refroidissement : les stratégies actives et les stratégies passives.

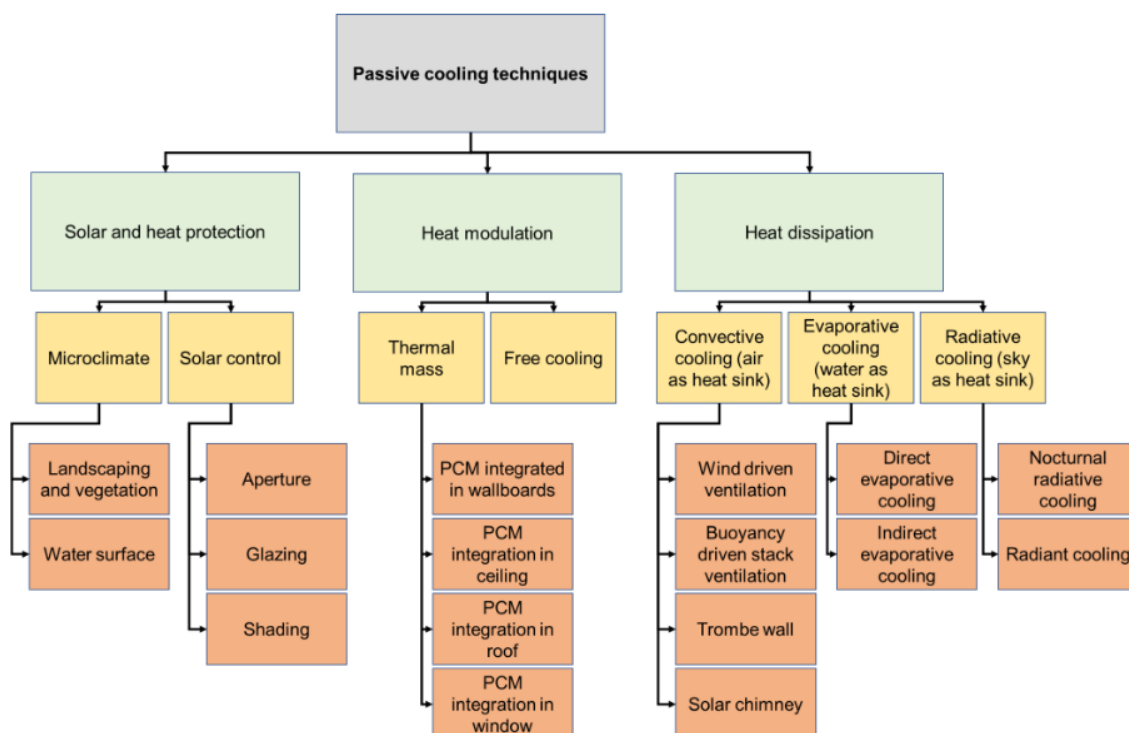


Figure 6 : Classification des techniques de refroidissement passif étudiées par (Bhamare, Rathod et Banerjee, 2019) et schématisées par (Rahif, 2023)

Les stratégies passives sont fondées sur l'exploitation de phénomènes physiques naturels et/ou sur une conception architecturale. Leur but est de soit de limiter les apports de chaleur, soit de moduler

les gains, soit de dissiper la chaleur contenue dans le bâtiment (Bhamare, Rathod et Banerjee, 2019). Ces stratégies ont pour objectif de réduire suffisamment le risque de surchauffe et d'ainsi éviter le recours à des systèmes actifs de climatisation de l'air, énergivores. Dans son étude de 2023 (Rahif, 2023), RAHIF propose un schéma, Figure 6, qui classe les techniques de stratégies passives selon les 3 buts précédemment énumérés.

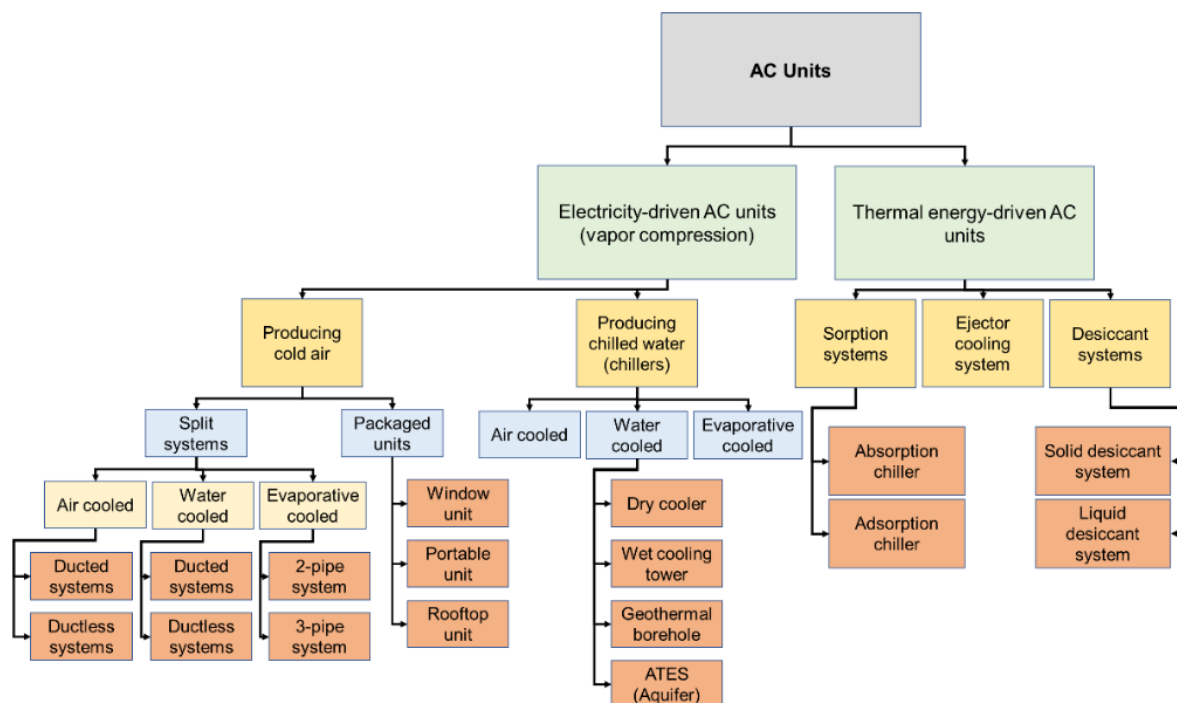


Figure 7 : Classification des techniques de refroidissement passif étudiées par (Elnagar, Zeoli, et al., 2023), et schématisées par (Rahif, 2023)

Les stratégies actives reposent sur des systèmes alimentés en énergie électrique ou thermique. Leur utilisation devrait se limiter aux cas où les mesures passives ne suffisent plus à garantir le confort thermique, notamment en climat chaud ou lors de vagues de chaleur intenses (Elnagar, Zeoli, et al., 2023). Les systèmes actifs, classifiés et schématisés par RAHIF (Rahif, 2023), Figure 7, permettent de répondre de manière plus contrôlée aux besoins de confort, mais au prix d'une consommation d'énergie et d'impacts environnementaux plus lourds que les stratégies passives.

2.1.4. Outils et approches de modélisation

L'évaluation du comportement thermique des bâtiments et de leurs systèmes est aujourd'hui principalement réalisée à l'aide d'outils de simulation dynamique. Ces outils permettent de simuler l'évolution des températures intérieures ou encore les besoins énergétiques, sur une base temporelle horaire, voire moins. Contrairement aux outils statiques ou quasi-statiques (généralement réglementaires, dont les calculs sont effectués sur base mensuelle ou annuelle), ces outils intègrent explicitement la dynamique et l'aspect transitoire des échanges thermiques (conduction, convection, radiation), ainsi que les interactions avec les usages des occupants, aspect essentiel dans des stratégies de contrôle complexe.

Parmi les simulateurs dynamiques les plus fréquents, nous pouvons citer EnergyPlus, IES VE, ou encore le logiciel de Simulation de Système Transitoire (TRaNsient System Simulation) utilisé dans ce travail, TRNSYS. Ce logiciel se distingue par son architecture modulaire et sa capacité à combiner des systèmes

énergétiques complexes. Sa bibliothèque étendue de composants et la possibilité de combiner les différents éléments permettent à l'utilisateur de décrire avec précision l'architecture d'un système énergétique. Concernant les possibilités de simulation des bâtiments avec TRNSYS, le logiciel et son extension TRNBuild permettent de tenir compte d'une modélisation multizonale détaillée, une prise en compte des conditions météorologiques horaires, la possibilité d'intégrer des stratégies de contrôle (de ventilation, de protections solaires), et d'intégrer des systèmes de génération et de distribution d'énergie.

2.2. Études similaires

Le risque de surchauffe des bâtiments énergétiquement performants est un sujet émergeant de la recherche contemporaine relative à la PEB (Attia, 2018), mais l'amplication de ce risque par le changement climatique (Attia et Gobin, 2020) en a fait un des enjeux majeurs de la recherche scientifique actuelle. De nombreuses études ont déjà été menées, en Europe et en Belgique, pour quantifier ce risque et son évolution sous différents scénarios de climat. D'autres études tentent aussi d'évaluer le potentiel de stratégies de refroidissement passif.

Cependant, l'évaluation du risque de surchauffe et du potentiel des stratégies de refroidissement repose sur de nombreux paramètres. Les hypothèses de modélisation et de simulation, les critères de confort considérés, la qualité des calibrages sont autant d'éléments qui complexifient la généralisation et l'analogie des résultats issus d'études différentes. Paradoxalement, c'est aussi cette diversité qui permet de croiser les résultats obtenus par des méthodologies et des hypothèses variées, et de les mettre en perspective les uns par rapport aux autres. Le Tableau 28 et le Tableau 29 repris dans l'Annexe 1 : Études similaires pertinentes, tableaux comparatifs relatent l'ensemble des études similaires pertinentes. Ces tableaux, pourtant non-exhaustifs, sont volontairement peu synthétiques, afin d'illustrer la complexité cachée derrière chaque étude précédemment menée. En revanche, la suite de ce texte propose une lecture simplifiée de ces tableaux, de sorte que le lecteur puisse rapidement se faire une idée du contexte scientifique dans lequel s'implante ce travail.

Ainsi, de nombreux travaux ont déjà été menés sur notre cas d'étude, la maison Kettenis.

Le premier travail mené sur ce cas d'étude est un travail de fin d'étude (TFE) réalisé par DE MEESTER (De Meester, 2008). Elle établit un audit du bâtiment, renseigne la majorité des propriétés des matériaux et les éléments constructifs, ainsi que les systèmes HVAC. Elle étudie l'influence de nombreux paramètres sur le bâtiment et son confort (d'hiver et d'été) mais sans étude quantifiée de la surchauffe.

Ensuite, GOBIN a basé son TFE sur la maison Kettenis (Gobin, 2016), puis a publié un article avec ATTIA (Attia et Gobin, 2020), dans lequel ils quantifient la surchauffe du bâtiment sur base de plusieurs critères de confort (critère statique du standard passif et critère adaptatif de la norme EN 16798). Ils ont également quantifié l'évolution croissante de cette surchauffe aux horizons 2050 et 2100. Ils ont mis en évidence le manque de résilience des bâtiments passifs. Une grande qualité de l'étude est le caractère dynamique du modèle (élaboré sur DesignBuilder) et son calibrage, bien qu'il suppose que le bâtiment respecte les critères passifs.

Dans le cadre de son TFE, FANI a évalué le potentiel actuel de la ventilation mécanique diurne et de la ventilation naturelle nocturne sur la surchauffe de la maison Kettenis (Fani, 2020). Il a évalué ce potentiel grâce aux indicateurs de HAMDY *et al.*, décrits plus loin dans cette section. Le potentiel de la ventilation sur la réduction de la surchauffe est estimé à 82%, en considérant des critères de confort statiques. Il compare également la surchauffe prédite par l'outil de simulation PEB, semi-statique, d'application en Wallonie à la surchauffe estimée avec un outil dynamique (DesignBuilder). Il y dénonce la sous-évaluation de la surchauffe par cet outil.

RAHIF *et al.* ont publié un article (Rahif *et al.*, 2021) dans lequel ils évaluent à nouveau le potentiel de la ventilation naturelle nocturne, avec les indicateurs de HAMDY *et al.*, mais cette fois en considérant des critères de confort adaptatif. Ils évaluent ce potentiel à 62,7%. Ils évaluent aussi l'évolution de ce

potentiel sous différents scénarios de changement climatique, et quantifient aussi la résilience du bâtiment à l'aide d'un des indicateurs de HAMDY *et al.*

Enfin, AMARIPADATH *et al.* ont publié un article sur la maison Kettenis (Amaripadath *et al.*, 2024) dans lequel ils évaluent la surchauffe du bâtiment durant une vague de chaleur, sur base des indicateurs de HAMDY *et al.* selon des critères adaptatifs. Ils estiment également l'évolution de ce risque à l'horizon 2090, mais sans étudier le potentiel de stratégies de refroidissement (passives ni actives).

En parallèle, d'autres études ont été menées sur la surchauffe des bâtiments et sur d'autres cas d'étude.

Ainsi, nous pouvons citer l'article de HAMDY *et al.*, qui ont développé de nouveaux indicateurs multi-zonaux, qui permettent de tenir compte de plusieurs théories du confort et de différents seuils en fonction des zones considérées. Leur étude menée sur un échantillon représentatif à l'échelle nationale des Pays-Bas permet d'évaluer un potentiel moyen de la ventilation de 83% (critère statique) et de 87% (critère adaptatif). Ils ont également évalué l'évolution de ce potentiel sous différentes projections climatiques.

Un autre article mené sur un échantillon (représentatif) de 23 cas d'études en Wallonie par DARTEVELLE *et al.* (Dartevelle *et al.*, 2021) analyse la capacité ou non de différents critères reconnus à évaluer la surchauffe des maisons nZEB. Grâce à une grande collecte de données *in situ*, ils évaluent la surchauffe selon les 5 critères de surchauffe étudiés. Ils comparent ensuite les résultats obtenus à une enquête d'« évaluation post-occupancy » (POE) qui évalue le degré de satisfaction des occupants en période estivale. Ils évaluent la corrélation entre les résultats de la POE et chaque critère de surchauffe étudié. Il en résulte que les résultats obtenus dépendent fortement du critère choisi, que les critères adaptatifs sont beaucoup plus permissifs que les critères statiques et doivent dès lors être préférentiellement utilisés pour des scénarios plutôt extrêmes. Ils montrent aussi que les critères fixes ne permettent pas toujours d'évaluer un inconfort réel reporté par l'occupant, en particulier lorsque les seuils sont trop élevés. Cependant, leur discussion et leur conclusion concorde avec les choix posés dans l'étude de (Rahif *et al.*, 2022), qui préfère un critère adaptatif dans les zones de jour, et un critère statique pour les zones de nuit. Ils soulignent également l'importance d'utiliser un critère adapté à chaque zone.

L'article publié par et ZEOLI et LEMORT (Zeoli et Lemort, 2022) fait état de l'étude des potentiels de plusieurs stratégies de refroidissement passives sur la surchauffe actuelle des nZEBs, évalués sur une période annuelle et lors d'une vague de chaleur. L'étude quantifie et classe (dans l'ordre décroissant de la liste qui suit) les potentiels de la ventilation naturelle de nuit, de la ventilation naturelle de jour, du vitrage thermochromique, du refroidissement par évaporation indirecte IEC, et des protections solaires fixes. Cependant, une limite du modèle est son calibrage par méthode comparative, imposé par un manque de données mesurées *in situ*. Aussi, l'étude ne tient pas compte du comportement des occupants, qui peut être significatif dans l'efficacité de certaines stratégies passives.

Enfin, l'article de DARTEVELLE *et al.* (Dartevelle *et al.*, 2022) se concentre sur un seul cas d'étude et du potentiel de deux stratégies passives actuellement présentes en général dans les nZEBs, à savoir l'utilisation de rideaux intérieurs et la ventilation naturelle. Ils en concluent que dans le futur, ces deux stratégies ne suffiront pas à assurer le confort thermique en été.

2.3. Trou dans les connaissances

En conclusion de cet état de l'art et de cette analyse des études précédemment menées sur les nZEBs en Wallonie, et sur base de toutes les limites des études précédentes et des suggestions qui y sont reportées, plusieurs pistes de recherche peuvent être dégagées pour orienter notre étude et tenter de faire progresser les connaissances.

D'abord, poursuivre l'évaluation de la surchauffe des nZEBs en Wallonie, selon des critères fixes et des critères adaptatifs, de sorte à pouvoir comparer les résultats obtenus selon différentes théories du confort.

Ensuite, il faut continuer d'évaluer l'évaluation de ce risque sous différents scénarios de réchauffement climatique, et tenter d'améliorer la résilience des nZEBs.

La ventilation est visiblement la stratégie de refroidissement passif dont le potentiel a été le plus évalué. Cependant, son potentiel est voué à décroître avec le réchauffement climatique, il faut donc étudier le potentiel d'autres stratégies de refroidissement passif complémentaires. Un paramètre dont le potentiel mériterait d'être étudié est l'inertie thermique du bâtiment. Par exemple, la maison Kettenis est un bâtiment à ossature bois très léger. Or comme expliqué en introduction, les nouveaux critères environnementaux pourraient augmenter significativement le nombre de bâtiments à ossature bois (Gresham House, 2024) (Hout info Bois, 2025). Cependant, le manque d'inertie thermique de ces bâtiments est un facteur aggravant le risque de surchauffe. Il est dès lors intéressant de quantifier le potentiel d'une inertie plus importante, et la proportion dans laquelle ce dernier décroît avec le changement climatique.

Enfin, un dernier aspect intéressant à traiter et suggéré par l'étude de DE MEESTER est l'étude du stockage de l'énergie, soit l'étude du bilan QZEN du bâtiment. Cet aspect est renforcé par les résultats de l'étude menée par (Elnagar, Gendebien, *et al.*, 2023), qui annoncent un accroissement de la demande énergétique de refroidissement et une diminution de la demande en chauffage à l'horizon 2100. Il serait donc intéressant d'étudier la « résilience du bilan QZEN » actuel, et de quantifier l'impact d'une batterie de stockage sur ce bilan.

Ces pistes de recherche peuvent être reformulées sous la forme de questions :

- Quel est le risque de surchauffe actuel d'un bâtiment résidentiel nZEB à ossature bois très léger ? Est-ce qu'un modèle élaboré sur un autre logiciel de simulation (TRNSYS) confirme les résultats précédemment obtenus sur le logiciel DesignBuilder ?
- Quel est le potentiel actuel de la ventilation naturelle nocturne sur la surchauffe du bâtiment ?
- Quel est le potentiel de l'inertie thermique du bâtiment comme stratégie de mitigation de la chaleur ? Quel est-il s'il est combiné à une ventilation naturelle nocturne ?
- Quel est l'influence de la théorie du confort (statique ou adaptative) considérée sur l'évaluation de ces potentiels ?
- Comment évoluent ces potentiels en fonction du réchauffement climatique ?
- Quelle est la relation au réseau d'un bâtiment QZEN en Wallonie ? Quelle est la dépendance au réseau d'un bâtiment dont le bilan QZEN annuel est nul ? Quelle part de l'énergie renouvelable produite rejette-t-il sur le réseau ? Dans quelle proportion une batterie domestique peut-elle jouer un rôle tampon ?

3. METHODOLOGIE

3.1. FRAMEWORK

La méthodologie retenue pour mener notre étude quantitative est une méthode par modélisation.

Le cadre de travail qui en découle est un cadre défini par des INPUTs, à savoir des données de départ et les deux variables de l'étude, une modélisation en plusieurs phases, et enfin des OUTPUTs, soit les résultats quantifiés attendus. Ce cadre est illustré Figure 8.

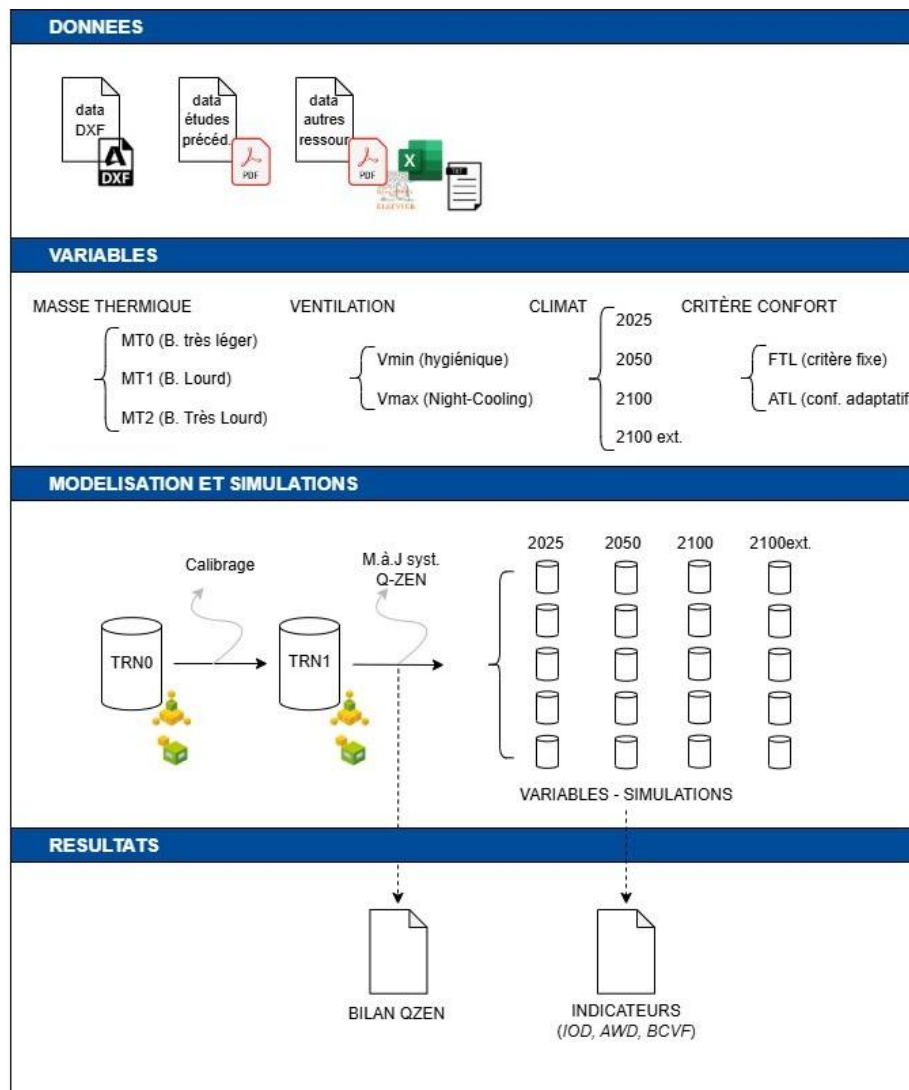


Figure 8 : Framework

Les données de départ sont reprises depuis les travaux précédents. Comme expliqué dans l'état de l'art, les données initiales relatives au bâtiment sont issues de l'étude de DE MEESTER.

Concernant les hypothèses de ce travail, notre étude s'inscrit dans la continuité des travaux de recherche sur la maison Kettenis. Nous nous référons donc aux hypothèses posées dans ces travaux et

repreons en partie ces hypothèses lorsque c'est possible et les adaptons lorsque le logiciel ou le présent travail l'impose. Nous posons aussi nos propres hypothèses lorsque l'information n'est pas disponible dans les travaux précédents ou lorsqu'il s'agit d'un point novateur de l'étude, comme pour le calibrage du bâtiment sur notre logiciel, ou bien lors de la vérification du bilan énergétique annuel, ou encore les hypothèses liées à la variation de la masse thermique.

Pour les variables, nous étudions l'influence de la masse thermique et de la ventilation et leur combinaison sur la surchauffe du bâtiment. Nous définissons plus loin les niveaux de masse thermique considérés et les débits de ventilations retenus.

Pour la modélisation et la simulation, le modèle est réalisé sur le logiciel TRNSYS et son plug-in TRNBuild. Certains éléments d'entrée ou de sortie sont traités en pré- ou en post-traitement sur Excel.

Pour les OUTPUTs, les indicateurs concernant le bilan Q-ZEN sont le bilan énergétique annuel (en kWh) et le pourcentage annuel d'heures de dépendance au réseau (en %). Pour l'étude de la surchauffe, nos indicateurs principaux sont le Indoor Overheating Degree (*IOD*) (en °C), le Ambient Warmness Degree (*AWD*) (en °C) et le Building Climate Vulnerability Factor (*BCVF*) (en %). Ces indicateurs sont définis plus loin dans la méthodologie.

3.2. WORKFLOW

Le Workflow de notre simulation est assez simple. Les différentes étapes sommairement présentées ci-dessous sont développées dans la suite de ce chapitre.

La première étape de la modélisation est de reproduire un tout premier modèle global sur TRNSYS, soit le modèle TRN0. Ce premier modèle requiert d'encoder déjà tous les éléments du bâtiment, moyennant des hypothèses, et doit permettre d'obtenir déjà toute une série de résultats utiles au calibrage, comme les consommations liées au chauffage, à l'électricité ou encore à l'eau chaude sanitaire.

Pour vérifier la rigueur de l'encodage et valider le modèle, il faut procéder à son calibrage. Le calibrage est un processus itératif, qui se réalise après l'encodage initial et qui nécessite de modifier et d'adapter le premier modèle obtenu. On pose de nouvelles hypothèses au besoin, pour obtenir un modèle de départ TRN1 dont le comportement est proche du bâtiment réel. Ce modèle est alors la base de notre étude.

La première partie de notre étude consiste à mettre à jour le bâtiment et à s'assurer qu'il est bien Q-ZEN. En effet, le cas d'étude a été construit il y a plus de 20 ans et a été conçu pour répondre aux exigences des bâtiments dits passifs. Il est précisé dans l'étude de GOBIN de 2020 qu'il y a eu un ajout de panneaux photovoltaïques qui assure le caractère Q-ZEN du bâtiment mais aucun bilan énergétique n'a été réalisé. Nous avons donc décidé de faire ce bilan et d'adapter les systèmes HVAC en place pour rendre le bâtiment Q-ZEN.

La seconde partie de l'étude se concentre sur la surchauffe du bâtiment. Les variables de l'étude sont la masse thermique du bâtiment (bâtiment très léger, bâtiment lourd, bâtiment très lourd), la ventilation (débit hygiénique minimum, taux de renouvellement par nightcooling maximum) et le climat (data historique TMY 2001-2020, projections TMY 2041-2060 et TMY 2085-2100). Nous étudions ces variables d'une part selon un critère de confort fixe (FTL) et d'autre part pour un critère de confort adaptatif (ATL). L'ensemble des combinaisons possibles de ces variables est illustré Figure 9.

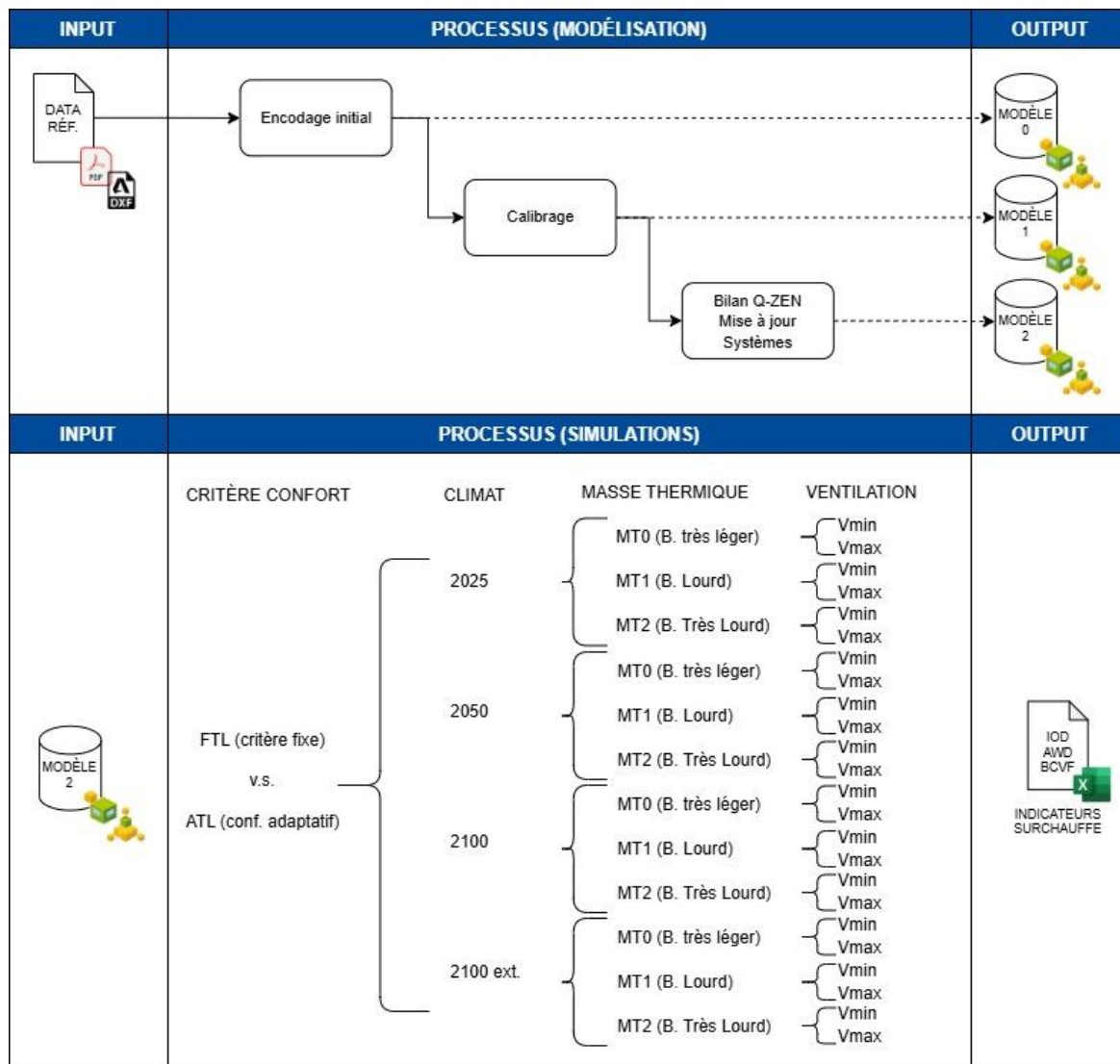


Figure 9 : Workflow simulations

3.3. MODELE 0 : PARAMETRES FIXES

Dans ce chapitre sont énumérées l'ensemble des données encodées dans le logiciel TRNSYS pour constituer le modèle de base TRN0 puis le modèle calibré TRN1.

Alors que le workflow présente l'encodage initial et le calibrage comme deux étapes successives bien distinctes, notons que de nombreuses simulations ont été lancées tout au long de l'encodage initial. En effet, le logiciel TRNSYS n'est pas si intuitif, et il peut être difficile pour un néophyte de retrouver une erreur d'encodage si elle n'est pas détectée suffisamment tôt lors de la modélisation. Le premier procédé de modélisation est dès lors relativement itératif. Dès l'encodage des premières données, nous avons lancé des simulations du modèle pour visualiser les profils de températures et des consommations au cours de l'année simulée. En procédant ainsi, nous avons pu évaluer en continu la pertinence des informations encodées et des hypothèses posées. Une fois l'ensemble des systèmes et des éléments constructifs modélisés, nous avons procédé au calibrage pour s'assurer de la qualité du modèle.

3.3.1. CAS D'ÉTUDE

Le cas d'étude est donc la maison Kettenis située à Eupen (Province de Liège, Wallonie, Belgique).

C'est un bâtiment 4 façades, réparti sur deux niveaux. Les pièces de vie, soient le salon, la salle à manger, la cuisine, sont au rez-de-chaussée. Les espaces nuit, soient trois chambre et une salle de bain, sont à l'étage. Il y a aussi deux locaux techniques (un au RdC, un à l'étage), un hall d'entrée et des toilettes au RdC. L'escalier se trouve dans le séjour et mène à un hall de nuit. Un garage est accolé à la maison mais ne fait pas partie du volume protégé du bâtiment. Un autre volume tampon adjacent est le comble non-aménagé.

La typologie de la maison est illustrée en élévation sur la Figure 10. La distribution spatiale du logement est visible sur les plans, Figure 11. Le bâtiment est un bâtiment à ossature bois isolé par de la cellulose projetée et de la laine minérale, construit en 2004 et conçu dans le cadre de l'action wallonne « Construire avec l'énergie... Autrement ! ». Le bâtiment est passif et fait 174m² au sol pour un volume protégé de 536m³. Il est conçu pour une maison unifamiliale de 4 personnes.

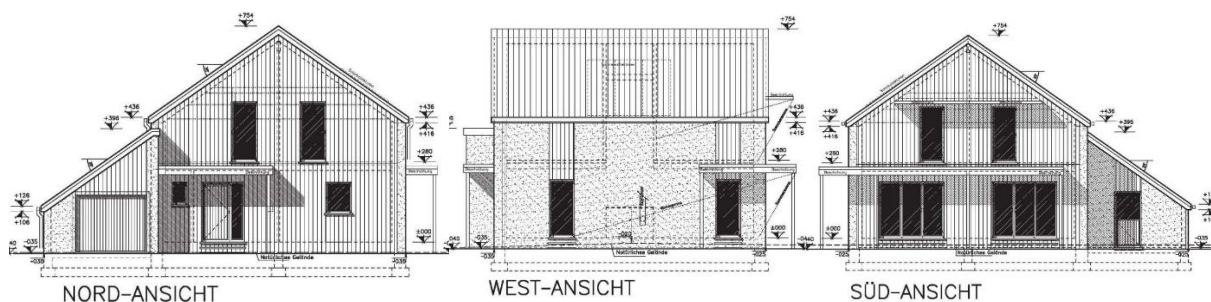


Figure 10 : Élévations (de droite à gauche : nord, ouest, sud) (Construire avec l'énergie: des réalisations concrètes, 2008)

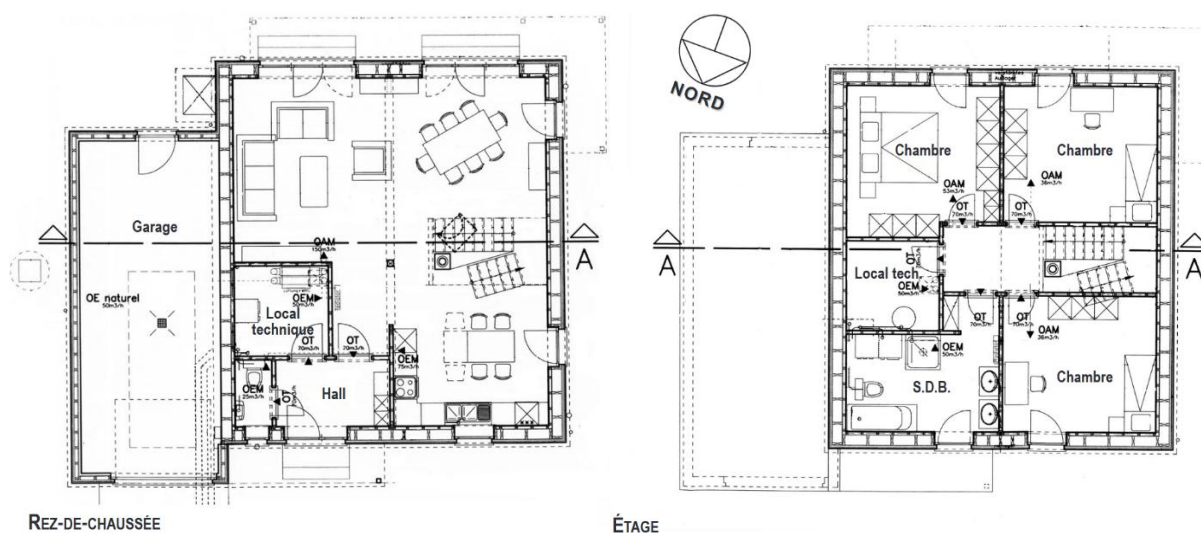


Figure 11 : Plans du Rez-de-Chaussée et de l'étage (Gobin, 2016)

3.3.2. DONNEES GEOMETRIQUES

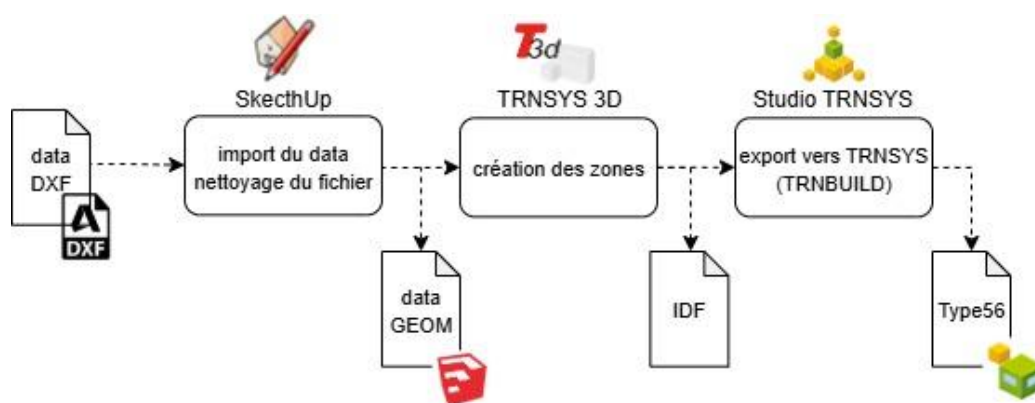


Figure 12 : Étapes de conception du modèle géométrique pour le type 56

Les données géométriques sont reprises du travail de GOBIN (Gobin, 2016) et aussi utilisées dans le travail de FANI (Fani, 2020) et de RAHIF *et al.* (Rahif, 2023). Elles sont disponibles sur la page du *Sustainable Building Design (SBD) Lab* du data verse du (*Harvard Dataverse | Data at Harvard University*, 2025). Le modèle est importé sur SketchUp, et corrigé. Il sert de référence géométrique 3D sur SketchUp. On peut alors créer notre modèle énergétique zonal via le plug-in TRNSYS3D. On obtient le modèle prêt à l'export pour le Type56 de TRNSYS. Ce type contient toutes les données géométriques du bâtiment. C'est aussi dans ce type que nous pourrions définir les besoins énergétiques du bâtiment. La Figure 12 illustre les étapes de conception du modèle importé dans TRNSYS à partir du data du SBD Lab. La Figure 13 illustre le modèle 3D énergétique exporté vers TRNBUILD. Notons que la maison est équipée de pare-soleils fixes horizontaux et verticaux, situés sur les façades sud et ouest, pour limiter les apports solaires, et d'une marquise façade nord. Ces éléments sont bien modélisés, comme dans les études précédentes. Ils sont déjà en partie une stratégie de refroidissement passif ont très certainement un impact sur le bilan énergétique de la maison.

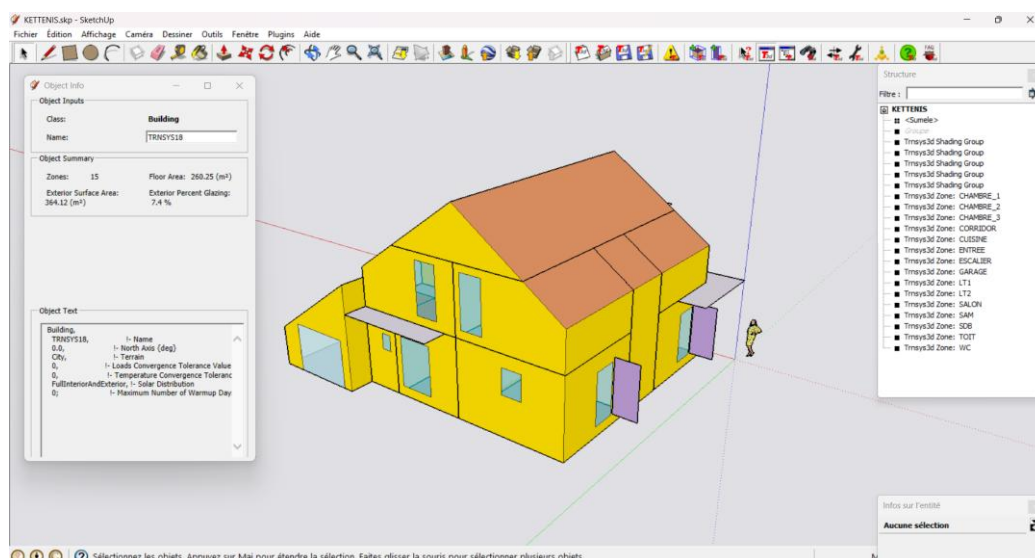


Figure 13 : Modèle 3D énergétique (.IDF) modélisé dans TRNSYS-3D

Remarquons que, malgré notre base géométrique de départ commune, il semblerait que les surfaces au sol et les volumes diffèrent légèrement. Alors que nous ne sommes qu'à la première étape de reproduction du modèle pour TRNSYS, nous remarquons déjà des différences. Cet écart est probablement lié au logiciel EnergyPlus, qui requiert une épaisseur de paroi dans le modèle géométrique, alors que TRNSYS se réfère à une base géométrique où les épaisseurs de parois sont nulles. Dans TRNSYS, il est recommandé de tracer les lignes de mur en considérant soit le milieu de son

épaisseur, soit le bord extérieur en cas d'épaisseur de mur importante. Cependant, ces différences sont relativement faibles mais des écarts sont malgré tout notables, et tant ils sont proportionnellement négligeables pour les grands espaces (living, chambres), tant ils sont plus conséquents pour les espaces réduits (comme les toilettes, qui ont dès lors une superficie de 3m² au sol).

3.3.3. ZONES

Pour le zonage, le zonage de GOBIN est réutilisé. Ce découpage est plus fin que la répartition spatiale réelle (nombre de zones thermiques supérieur au nombre de pièces cloisonnées). Cela nous permet de caractériser puis d'analyser au mieux les différents sous-espaces. Ainsi, on pourra préciser les flux d'air entre zones, les besoins en électricité, les gains internes, selon les horaires d'utilisation et les spécificités de chaque zone précisément. Aussi, cela permet d'affiner l'étude, par exemple pour étudier la surchauffe de chaque sous espace, en évitant d'englober trop d'espaces en une seule zone et de perdre en nuance l'analyse des résultats. Dans TRNSYS, les cloisons séparant deux zones adjacentes peuvent être définies comme des parois fictives *massless*, et les *couplings* permettent de simuler les flux d'air d'un espace à l'autre. Nous définirons un facteur tel que les *couplings* entre deux zones adjacentes, fictivement séparées, soient plus élevés. Ainsi, l'air contenu dans ces espaces pourra être plus ou moins brassé, comme dans la réalité de ces zones. Les zones du modèle sont illustrées Figure 14.

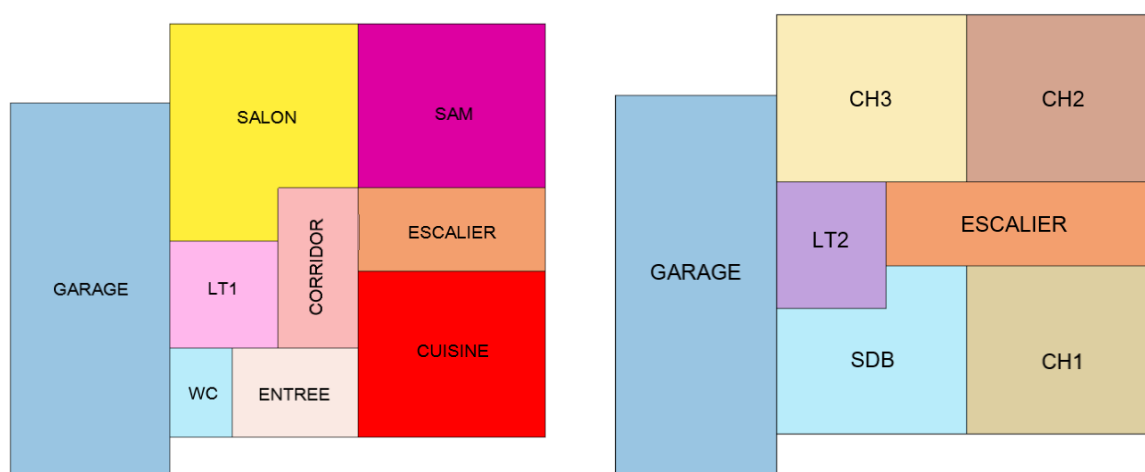


Figure 14 : Zones du modèle

3.3.4. ENVELOPPE : MATERIAUX

Les parois, et les matériaux qui les composent, sont issus des informations disponibles dans la thèse de DE MEESTER.

Cependant, TRNSYS ne permet pas l'encodage de parois hétérogènes. Par exemple, les ossatures en bois, ou les lattages (dont l'épaisseur est un mélange de bois et d'air plus ou moins ventilé) doivent être calculés en dehors du logiciel. Ensuite, il faut les encoder en un matériau homogène équivalent, avec une densité, un coefficient de transmission thermique et une capacité thermique équivalents.

Ces parois hétérogènes ont été calculées via la méthode par combinaison, où la résistance de la paroi est située quelque part entre le cas extrême où le flux est minimal et la résistance maximale, et le cas

extrême où c'est le flux qui est maximal et la résistance minimale. Un schéma explique la méthode sur la Figure 15. Cette résistance équivalente est donc définie comme :

$$R = \frac{R' + R''}{2}$$

Équation 2 : Résistance équivalente

Où

$$R' = \left(\frac{\sum U_i A_i}{\sum A_i} \right)^{-1}$$

Équation 3 : Résistance thermique limite supérieure

Et

$$R'' = \sum e_i \lambda_{eq,i}$$

Équation 4 : Résistance thermique limite inférieure

Avec

$$\lambda_{eq,i} = \frac{\sum \lambda_{j,i} A_{j,i}}{\sum A_{j,i}}$$

Équation 5 : Lambda équivalent pour chaque couche d'épaisseur i

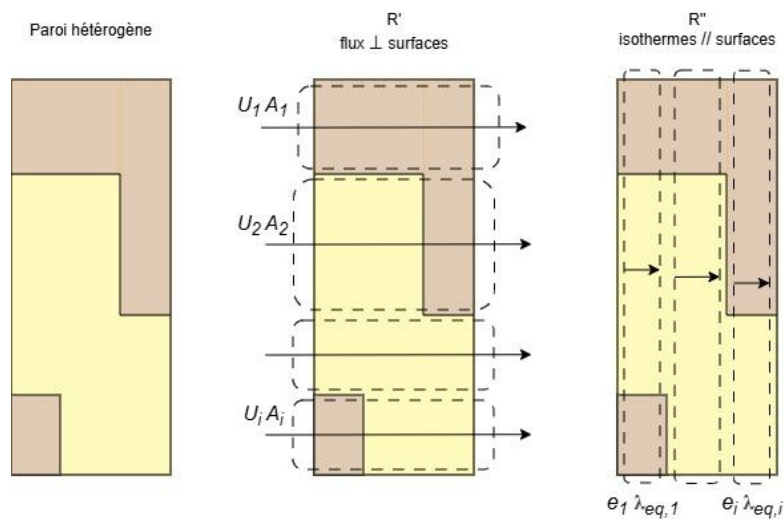


Figure 15 : Schéma du calcul de la résistance thermique d'une paroi hétérogène

On trouve alors par exemple, pour l'ossature principale qui constitue les parois extérieures verticales :

Matériaux	Nom complet	ρ [kg/m³]	λ _normalisée [W/mK]	λ _normalisée [kJ/hmK]	C [J/kgK]	C [kJ/kgK]	R_utile [m²K/W]	épaisseur [m]	U_utile [W/m²K]
bois_2	Ossatures	800	0,13	0,468	1888	1,888	1,923		
cellulose	Cellulose insufflée	110	0,04	0,144	840	0,840	6,250		
ossature_2	Ossature+Cellulose	193	0,05	0,183	966	0,966	4,920	0,25	0,203
	% bois	0,12							

Tableau 1 : Propriétés du matériau équivalent de la paroi hétérogène "ossature 2"

Les propriétés des autres matériaux (homogènes et hétérogènes) sont répertoriées dans l'Annexe 2 : Propriétés des matériaux et compositions des parois initiales.

Toutes les propriétés des matériaux répertoriées dans le travail de DE MEESTER ont été vérifiées. En effet, certaines coquilles figuraient, or notre étude se focalise sur l'inertie du bâtiment, les parois auront donc un rôle primordial dans la suite de notre étude. Finalement, nous trouvons des U très proches de ceux de DE MEESTER et de GOBIN. Les compositions et les propriétés finales des parois sont développées dans le point suivant.

3.3.5. ENVELOPPE : COEFFICIENTS DE TRANSFERT

Les coefficients de transfert de chaleur et les absorptions solaires sont repris des recommandations TRNSYS. Notons que les coefficients appliqués à la dalle de sol correspondent à des coefficients de paroi exposée à l'air car le bâtiment est sur vide ventilé. Le tableau 2 présente les valeurs du modèle.

Nom	solar absorbance		conv HT coeff		conv HT coeff	
	front (int)	back (ext)	front (int)	back (ext)	front (int)	back (ext)
	%	%	[kJ/hm ² K]	[kJ/hm ² K]	[W/m ² K]	[W/m ² K]
Mur extérieur	0,4	0,5	11	64	3	18
Toit	0,1	0,5	11	64	3	18
Plancher RdC	0,8	0,5	11	64	3	18
Plancher R+1	0,1	0,5	11	11	3	3
Plancher R+2	0,1	0,5	11	11	3	3
Mur intérieur	0,4	0,4	11	11	3	3
Paroi fictive	0,4	0,4	11	11	3	3

Tableau 2 : Coefficients de transfert de chaleur par convection et absorptions solaires

3.3.6. ENVELOPPE : PAROIS (INITIALES)

Les compositions de paroi sont reprises de l'étude de DE MEESTER. Le détail de la composition des parois est disponible dans l'Annexe 2 : Propriétés des matériaux et compositions des parois initiales. Ci-dessous, le Tableau 3 synthétise les parois présentes dans le modèle, avec leur épaisseur et leur coefficient de transfert thermique U. Observons que les différences entre notre encodage et celui des études précédentes sont négligeables, et que les performances de notre bâtiment sont largement supérieures aux exigences minimales PEB actuelles.

Nom	Épaisseur [m]	Coefficient U [W/m ² K]	Coefficient U	U max
			(DE MEESTER, GOBIN)	(PEB)
Mur extérieur	0,423	0,136	0,132	0,24
Toit	0,470	0,129	0,117	0,24
Plancher RdC	0,372	0,188	0,179	0,24
Plancher R+1	0,079	0,680	0,630	/
Plancher R+2	0,079	0,680	0,630	/
Mur intérieur	0,100	0,610	0,563	/
Paroi fictive	0,000	5,531	/	/

Tableau 3 : valeurs des coefficients U des parois

3.3.7. FENÊTRES

Il est laborieux d'encoder une nouvelle fenêtre dans TRNSYS et ses propriétés propres. Étant donné que les fenêtres sont un paramètre fixe dans notre cas d'étude, nous pouvons nous permettre de

choisir une fenêtre issue de la bibliothèque TRNSYS (allemande – qui offre un plus large choix), dont les propriétés sont proches de celles renseignées par DE MEESTER et GOBIN (fenêtres triple vitrage, avec U du vitrage = $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, U de la fenêtre = $0,81 \text{ W/m}^2\text{K}$, et le facteur solaire défini par GOBIN comme $g = 0,687$).

Notre choix s’est porté sur la fenêtre 3-WSV_#2#5_Kr90, dont les propriétés rapportées dans le Tableau 4 se rapprochent le plus des fenêtres qui nous sont renseignées.

WinID	Description	Design	U-Value	g-Value	T-sol	Rf-sol
301	3-WSV_#2#5_Kr90	4/12/4/12/4	0.52	0.5	0.425	0.296

Tableau 4 : Propriétés des fenêtres

3.3.8. CHAUFFAGE

Le système de production et d’émission de chaleur repose uniquement sur un poêle à pellets. Le rayonnement direct du poêle, les mouvements d’air engendrés par la radiation et la convection autour de ce poêle, et les flux engendrés par les différentiels thermiques (par poussée d’Archimède) sont les seuls moyens de distribution de chaleur dans le bâtiment. Concrètement, cela signifie qu’une température de consigne est définie dans le séjour, et l’étage est indirectement chauffé par les phénomènes thermiques induits par l’activation du poêle au rez-de-chaussée. Les portes des chambres et de la salle de bain doivent dès lors rester ouvertes pour permettre de suffisamment réchauffer l’étage en hiver. Il est reporté dans le travail de DE MEESTER que les habitants obtiennent un confort thermique suffisant dans chaque espace de la maison, et qu’aucun chauffage d’appoint n’est nécessaire, même dans la salle de bain. Une consigne est donc définie dans le salon et dans la salle à manger, et les autres espaces seront considérés comme chauffés indirectement dans le modèle.

L’horaire de consigne de chauffage est fixée similairement à celle de DE MEESTER, soit 23°C comme température de consigne en heure de chauffe, et 17°C au minimum durant les heures creuses. Cette consigne peut paraître élevée mais est corrélée au système de production et de distribution de chaleur par le poêle à pellets, expliqué précédemment. Les heures de consigne à 23°C sont définies selon une journée ouvrable type et selon une journée de jour de week-end type. La Figure 16 illustre les températures de consignes pour le chauffage sur une semaine type. Notons que ces consignes définissent des valeurs de température d’air, et non des températures opératives.

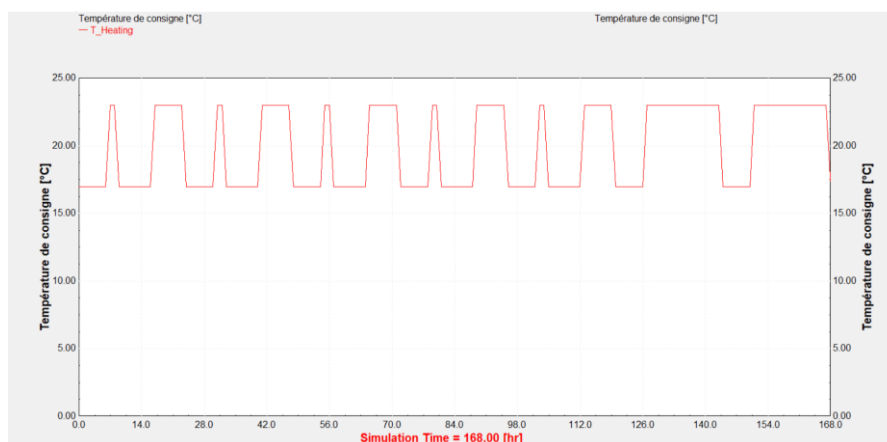


Figure 16 : Consignes de chauffage hebdomadaires.

Nous nous sommes assuré que les *couplings* définis entre les zones permettent d'obtenir des températures convenables à l'étage. Des « facteurs de calibrage » ont été définis dans les *couplings* et permettent d'obtenir des températures aux pièces de l'étage corrélées aux températures de chauffe du rez-de-chaussée. La Figure 17 illustre la différence entre les températures d'une pièce située à l'étage (la salle de bain) – qui atteint un minimum de 12°C en hiver - et celles d'une pièce chauffée au rez-de-chaussée (le salon), sans « facteur de calibrage ». La Figure 18 illustre la corrélation entre les températures de la salle de bain – qui atteint un minimum tolérable de 17°C (température nocturne) en hiver - et celles du salon, une fois les « facteurs de calibrage » définis.

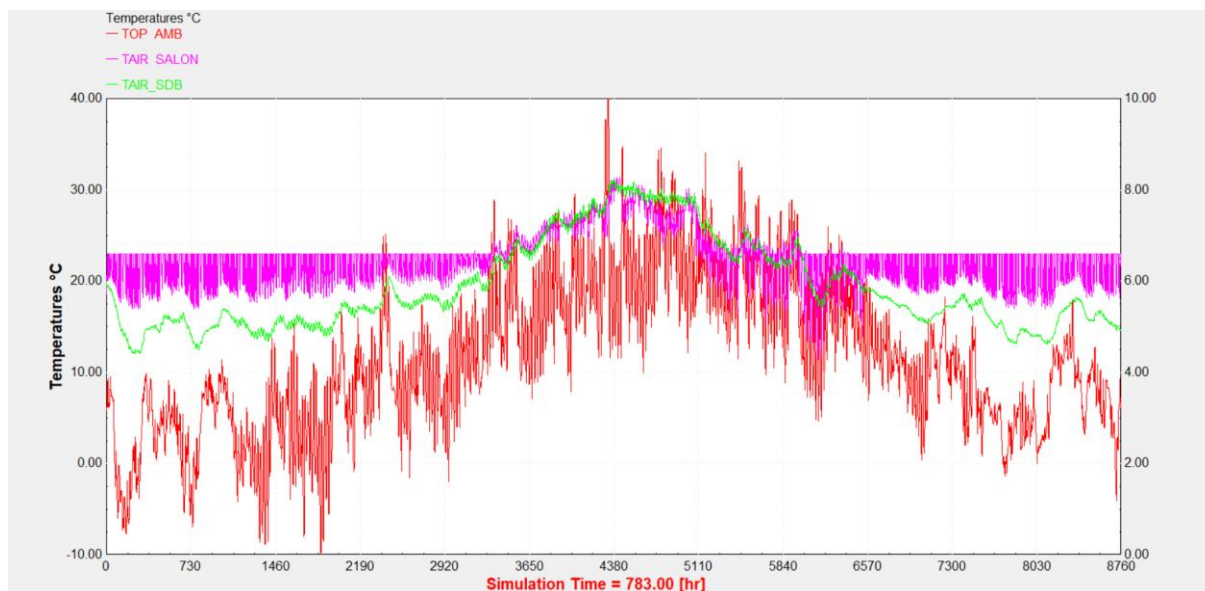


Figure 17 : Températures annuelles de l'air dans le salon et dans la salle de bain, sans « facteurs de calibrage »

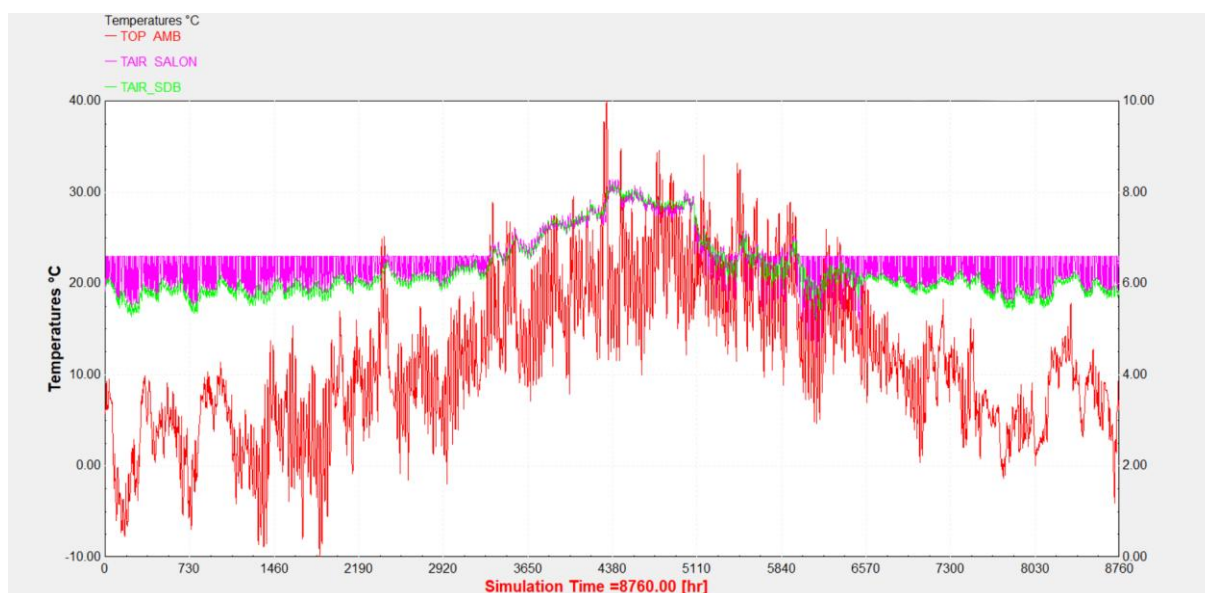


Figure 18 : Températures annuelles de l'air dans le salon et dans la salle de bain, avec « facteurs de calibrage »

Ces « facteurs de calibrages », repris dans le Tableau 5, ont été définis de façon empirique et sont de trois natures différentes :

- un pour simuler les *couplings* entre zones séparées fictivement (F_calibrage_CPL_F) ;

- un pour simuler les *couplings* entre zones séparées réellement (F_calibrage_CPL), par une porte par exemple, où l'air est mû par le système de ventilation et les gradients de températures. Ces masses d'air sont supposées passer sous les portes, via un espace de 12mm entre le bas de la porte et le niveau de sol, qui autorise ces transferts entre pièces ;
- un pour simuler les couplings entre les zones du rez-de-chaussée et celles de l'étage (F_calibrage_CPL_R1). Ce facteur tient compte de la poussée d'Archimède et les effets de cheminée, et est défini pour les adjacences avec la cage d'escalier, qui est la seule zone définie sur les deux niveaux.

Code	Nom complet	Valeur (empirique)
F_calibrage_CPL_F	Facteur Calibrage <i>Couplings</i> Parois Fictives	50
F_calibrage_CPL	Facteur Calibrage <i>Couplings</i> Parois réelles (portes)	20
F_calibrage_CPL_R1	Facteur Calibrage <i>Couplings</i> entre étage (Archimède)	10

Tableau 5 : « Facteurs de calibrage » entrés dans les couplings

Enfin, le choix de ce système (production et distribution assurées uniquement par le poêle à pellets) pose question par rapport au confort thermique. Les espaces de vie peuvent en effet nécessiter une surchauffe pour permettre aux pièces de nuit de recevoir suffisamment de chaleur, et rien ne nous assure que les *couplings* permettent d'obtenir une « puissance » suffisante de chauffe de l'étage. Dans la mise à jour des systèmes, nous remplacerons ce poêle à pellet par une pompe à chaleur (PAC) air-air, avec un système de distribution de chaleur par des ventilo-convecteurs.

3.3.9. INFILTRATION

Le résultat d'un test BlowerDoor nous est renseigné dans le travail DE MEESTER, avec un taux de 0.5 (n50) sous 50 Pa. DE MEESTER a considéré une relation linéaire entre la différence de pression et le taux d'infiltration et considère un taux de 0,02 vol/h sous une différence de pression de 2 Pa. C'est une hypothèse un peu grossière vis-à-vis de notre étude, car cette relation n'est pas réellement linéaire et que la valeur du taux d'infiltration a un impact significatif sur les besoins de chauffage et sur les risques de surchauffe du bâtiment. Pour déterminer le taux d'infiltration, nous utilisons plutôt la relation empirique plus réaliste définie par (Mun, Lee et Kim, 2021) qui est :

$$n = n_{50} \left(\frac{\Delta P_{réelle}}{50} \right)^{0.67}$$

Équation 6 : Relation empirique entre le taux d'infiltration et le résultat n50 et la différence de pression

En considérant une différence de pression réelle de l'ordre de 4 Pa, nous obtenons un taux d'infiltration de 0,09 vol/h.

3.3.10. VENTILATION (INITIALE)

3.3.10.1. Mécanique

La maison est équipée d'un système de ventilation double flux avec échangeur thermique (système D). Le rendement de l'échangeur est de 90%. Pour les flux, DE MEESTER fait état de deux types de valeurs possibles à considérer.

Le premier ensemble définit des taux de renouvellement d'air qui assurent un débit minimal hygiénique défini par la norme NBN D50-001. Il correspond à une valeur de 3,6 m³/hm² et équivaut à

275 m³/h dans notre cas d'étude. C'est ce taux qui a été retenu dans les études de GOBIN et de FANI, et que nous retiendrons également comme débit minimal dans nos simulations : variable « Vmin (hygiénique) ».

Le deuxième ensemble définit des taux inférieurs aux taux minimaux définis dans la norme, mais ces taux correspondent aux vitesses réellement appliquées dans le bâtiment par ses utilisateurs. Ces taux équivalent à un renouvellement total de 110 m³/h. Ce sont ces taux qui seront considérés pour le calibrage du bâtiment. Nous les remplacerons par les taux minimaux hygiéniques fixés par la norme pour la suite de notre étude de la surchauffe, après le calibrage basé sur les débits de ventilation réels.

Les valeurs de ces débits sont disponibles dans l'étude de DE MEESTER, et les zones de pulsion, de transfert et d'extraction sont illustrées sur la Figure 19.

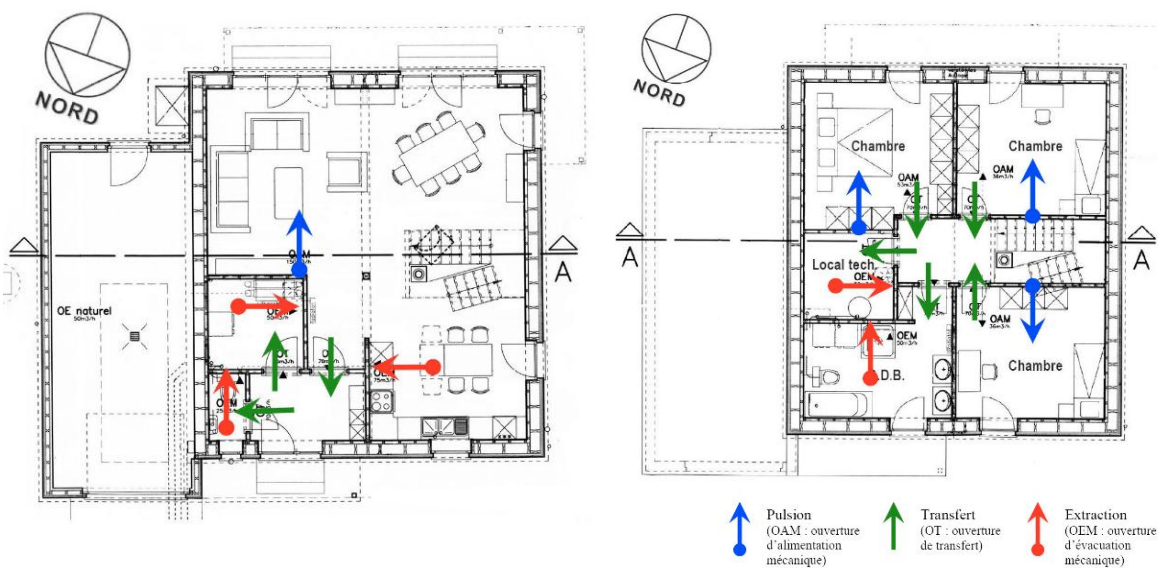


Figure 19 : Plans avec zones de pulsion, de transfert et d'extraction d'air (De Meester, 2008)

Le système est également doté d'un by-pass. Celui-ci s'enclenche lorsque la triple condition est remplie :

- Température extérieure > 16°C ;
- Température de l'air extrait > Température extérieure ;
- Température de l'air extrait > 22°C ;

Nous rajoutons une quatrième condition, qui est :

- Température séjour > 23°C.

Sans cette quatrième condition, on risque de pulser de l'air extérieur à une température inférieure à la température de consigne définie à 23°C dans le séjour et d'alors créer une demande de chauffage non réaliste ou justifiée.

3.3.10.2. Naturelle

Aucune ventilation naturelle n'est considérée initialement dans les études précédentes, tout est géré par la ventilation mécanique. La ventilation naturelle est une des variables de notre étude et sera définie dans la partie 3.6.2 VARIABLE : VENTILATION NATURELLE.

3.3.10.3. « Couplings »

Le *coupling* est défini de la façon suivante dans le guide 5 d'utilisation TRNSYS :

The coupling statement allows the definition of an air mass flow an airnode receives from another airnode, considered as a heat flow from or to the air node. The statement does not automatically define the air flow back to the adjacent airnode as would occur in an interzonal air exchange. To consider this return flow, the corresponding coupling must be defined in the adjacent airnode to receive the same air flow in return. The reason for this convention is to allow the user to describe cross ventilation or a ventilation circle within 3 or more airnodes (e.g., thermosyphon through a 2 story winter-garden,).

Il est aussi défini dans le guide 6 d'utilisation TRNSYS comme :

For each wall or window separating zones of floating temperature or each wall having a known boundary condition, it is possible to specify a convective coupling. This coupling is the mass flow rate that enters the zone across the surface. An equal quantity of air is assumed to leave the zone at the zone temperature. The energy gain due to the convective coupling is the sum of all such gains for all walls or windows in the zone.

$$\dot{Q}_{cplg,i} = \sum_{adj.zones} \sum_{surfaces\ i}^j \dot{m}_{cplg,s} C_p (T_j - T_i) + \dots + \sum_{known\ bound.} \dot{m}_{cplg,s} C_p (T_{b,s} - T_i)$$

En plus des *couplings* liés au calibrage empirique pour le chauffage et répertoriés dans le Tableau 5, des *couplings* sont définis entre les zones pour assurer les transferts d'air liés à la ventilation mécanique. Ils correspondent simplement aux débits pulsés dans une pièce et extraits dans une autre, d'une pièce à l'autre en passant par les zones de transfert.

3.3.11. REFROIDISSEMENT ACTIF

Aucun système de refroidissement actif n'équipe le bâtiment et aucun système actif n'est considéré dans cette thèse. Les systèmes actifs sont très énergivores, c'est pourquoi nous privilégions l'étude des stratégies de refroidissement passives.

3.3.12. GAINS INTERNES ET PERTES

Dans son travail, DE MEESTER a défini arbitrairement des horaires d'occupation dans ses différentes zones. Pour ce faire, elle s'est calquée sur une maison de référence (« la maison Pléiade ») et a cité une étude qui alerte de la surévaluation en général des gains internes.

GOBIN elle, a défini d'autres profils d'utilisation et des valeurs issues de la bibliothèque DesignBuilder.

Les travaux précédents ont donc considéré des gains selon des hypothèses plus ou moins grossières et justes. Dans ce travail, nous allons définir nos propres gains internes de façon à connaître précisément les limites et les niveaux de précision de nos hypothèses. Pour définir ces gains internes, nous allons nous aider d'une hypothèse et aussi de deux éléments connus, qui sont les consommations mensuelles (connues) d'électricité et les consommations mensuelles (connues) de chauffage.

D'une part, nous définissons des gains internes liés à la présence humaine : ces gains sont définis dans les zones selon les horaires de présence, similaires aux consignes de chauffage. Nous renseignons donc des gains internes dans les chambres durant les périodes de nuit, et des gains internes dans les zones de vie en fonction de la présence en semaine ou le week-end, proportionnelles au nombre d'occupants présents dans ces zones. L'énergie sensible dégagée par un humain dépend de nombreux facteurs :

son métabolisme de base (lui-même fonction de l'âge, le poids, le sexe,...), son activité physique, mais aussi de facteurs environnementaux. Nous savons (selon la norme ISO 17772) qu'en moyenne, un humain moyen émet 70 W pendant le sommeil et environ 100 W lors d'une activité sédentaire, et qu'à peu près un tiers de cette énergie est émis sous forme latente. Nous posons donc l'hypothèse que 50 W/pers d'énergie sensible sont émises dans les zones de nuit en période de nuit, et que 70 W/pers d'énergie sensible sont émises dans les zones de vie en période de jour et d'activité.

D'autre part, les autres gains internes sont directement corrélés aux consommations électriques. La définition des puissances horaires électriques est détaillée dans la section suivante 3.3.13 DEMANDE ÉLECTRIQUE. Pour en déduire les gains internes liés, nous considérons initialement que 100% des consommations électriques aboutissent à un gain interne sensible de la même intensité, où 20% de cette énergie sensible est émise par radiation et 80% par convection. Évidemment, toute l'énergie électrique n'est pas convertie en chaleur. L'énergie électrique introduite dans le bâtiment peut finalement aboutir sous la forme d'un travail, sous la forme d'énergie latente ou sous la forme d'une énergie sensible. Sur base des consommations mensuelles de chauffage, nous appliquerons un facteur aux consommations électriques pour revoir la proportion des consommations électriques transformées en énergie sensible, dans l'étape 3.4 CALIBRAGE.

3.3.13. DEMANDE ÉLECTRIQUE

Pour la demande électrique, nous avons fait le choix de redéfinir nous-même des profils de consommations horaires de 23 électroménagers, plutôt que de reprendre les hypothèses de GOBIN, qui étaient fortement liées à la bibliothèque proposée dans DesignBuilder (et donc intrinsèques à ce logiciel). Pour définir nos propres profils horaires de consommation électrique, nous nous sommes référé aux données (Energuides.be, 2025) qui liste une série des électroménagers les plus courants dans les logements bruxellois, avec pour chacun :

- sa puissance (W) ;
- ses hypothèses d'utilisation horaire (en min./j, en cycles/an ou en h/sem) ;
- sa consommation annuelle (en kWh).

Le total des consommations retenues et répertoriées sur le site équivaut à 3263 kWh.an, qui est une valeur très proche de notre cible annuelle moyenne de 3288 kWh.an.

Le Tableau 6 dresse la liste des électroménagers pour lesquels nous avons définis des profils horaires. L'hypothèse que nous rajoutons est le caractère « fixe v.s. variable » de la consommation de l'électroménager.

Si l'électroménager est « fixe », cela signifie que le facteur mensuel qui servira au calibrage n'aura pas d'impact sur son profil horaire. Par exemple, tous les électroménagers de la cuisine sont considérés « fixes » car peu importe que ce soit l'hiver ou l'été, l'occupant prépare certainement ses repas de façon équivalente, avec des consommations électriques semblables. Si l'électroménager est « variable », cela signifie que le facteur mensuel a un impact sur son profil horaire. Par exemple, on peut supposer que pendant l'été, les occupants doivent allumer moins d'heures par jour les lumières, qu'ils regardent peut-être moins la TV, utilisent moins les consoles de jeux car ils font plus d'activité en extérieur, ou encore qu'ils ont moins besoin d'un sèche-linge en été qu'en hiver.

Pièce	Numéro	Appareil	Puissance	Utilisation	hypothèse calibrage (fixe/variable)	consommation annuelle [kWh.an]	total [kWh.an]
cuisine	1	frigo combi	C	365j en continu	fixe	500	
	2	lave-vaisselle	C	240 cycles/an	fixe	380	
	3	cafetière	1000W	5 min/jour	fixe	30	
	4	hotte	E	40 min/300j	fixe	25	
	5	four MW	1000W	1,5h/sem	fixe	60	
	6	four élec	3000W	1,5h ; 3j/sem	fixe	150	
	7	taque vitro-céramique	2000W	1/jour	fixe	260	1405
salon	8	tv led		4h/jour, 20h en veille	variable	92	
	9	éclairage		5h/j, 335j/an	variable	12	
	10	console jeux		2h/jour	variable	84	
	11	décodeur tv		365j en continu	fixe	50	
	12	lampe hallogène	200W	4h/jour	variable	240	478
une chambre	13	éclairage chambre		2h/jour	variable	6	
	14	radio réveil	10W	365j en continu	fixe	87	93
buanderie	15	sèche linge	A+++	100 cycles/an	variable	200	
	16	fer à repasser	800W	5h/sem	fixe	260	
	17	aspirateur	800W	2h/sem	fixe	80	
	18	lave linge	A	200 cycles/an	fixe	270	810
bureau	19	ordinateur		4h/jour (250W), 20h en	variable	370	
	20	routeur wifi		365j en continu	fixe	85	
	21	lampe bureau	8W	4h/jour	variable	10	
	22	chargeur tel	5W	4h/jour	fixe	7	472
salle de bain	23	seche cheveux	450W	30 min/jour	fixe	11	11
TOTAL							3269

Tableau 6 : Électroménagers retenus et tirés de (Energuide.be, 2025) et hypothèses

Enfin, nous regroupons les électroménagers par pièce. Nous nous assurons que les ordres de grandeurs sont conservés, car les consommations électriques de ces pièces seront transformées en gains internes par la suite. Notons que dans notre modèle, les consommations associées à la buanderie sont réparties dans les deux locaux techniques, et les consommations associées au bureau sont implantées dans une des chambres (dont on peut faire l'hypothèse qu'elle sert de bureau). Le Tableau 7 présente l'ordre de grandeur des consommations électriques des pièces (et donc des gains internes qui pourront en découler). Le profil de consommation électrique de chaque pièce (du modèle calibré) est disponible dans l'Annexe 3 : Profils de consommations électriques par pièce.

Pièce	consommation annuelle d'une pièce [kWh.an]		
	selon energuide	modèle 0	modèle calibré
cuisine	1405	1367	1367
salon	478	485	440
chambre	93	93	93x3
buanderie	810	811	763
bureau	472	470	432
salle de bain	11	11	11
TOTAL	3269	3237	3292

Tableau 7 : Consommation électrique annuelle par pièce et total

3.3.14. DEMANDE D'EAU CHAUDE SANITAIRE (ECS)

L'eau chaude sanitaire est préchauffée par 6m² de panneaux solaires (Annexe 4 : Fiche technique des panneaux solaires et du ballon solaire), et les besoins auxiliaires sont assurés par un chauffe-eau au gaz. Pour réaliser le bilan zéro-énergie, nous devons remplacer ce chauffe-eau au gaz par un système électrique qui subviendra aux besoins auxiliaires de la production d'eau chaude. Nous considérons alors un ballon solaire de 300L, de la marque ACCUSOL (Annexe 4 : Fiche technique des panneaux solaires et du ballon solaire) doté d'un échangeur et d'une résistance électrique pour les besoins auxiliaires. La température de consigne de l'ECS en sortie est fixée à 55°C. Nous faisons l'hypothèse d'une consommation journalière de 200L (ordre de grandeur classique pour une famille de 4 personnes).

Il est reporté dans la fiche technique de la maison (« Fiche01-3.qxd », sans date) que les besoins auxiliaires en gaz d'élèvent à 670 kWh.an (soit 67m³ de gaz). Par rapport à notre modèle, cette demande résiduelle semble peu élevée par rapport au potentiel de l'apport d'énergie solaire. En réduisant la consommation en ECS quotidienne à 115L, nous obtenons une demande en besoins auxiliaires de 665 kWh.an.

La Figure 20 illustre la température du fond du ballon, soit celle qui sort du capteur solaire, et la température du sommet du ballon (consigne à 55°C).

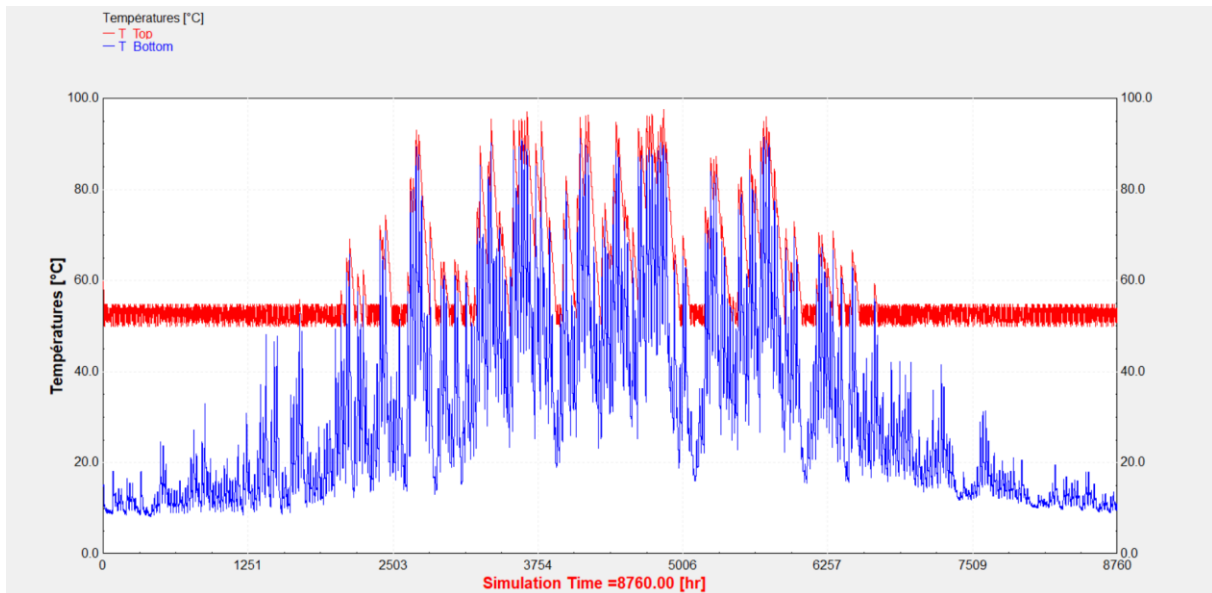


Figure 20 : Températures du niveau supérieur et inférieur du ballon d'ECS

La Figure 21 illustre le profil horaire annuel des besoins auxiliaires (électriques) et intégrés sur l'année (besoin total annuel), mis en perspective avec les températures du fond du ballon. Ces besoins auxiliaires permettent de maintenir la température au sommet du ballon, à la consigne de 55°C.

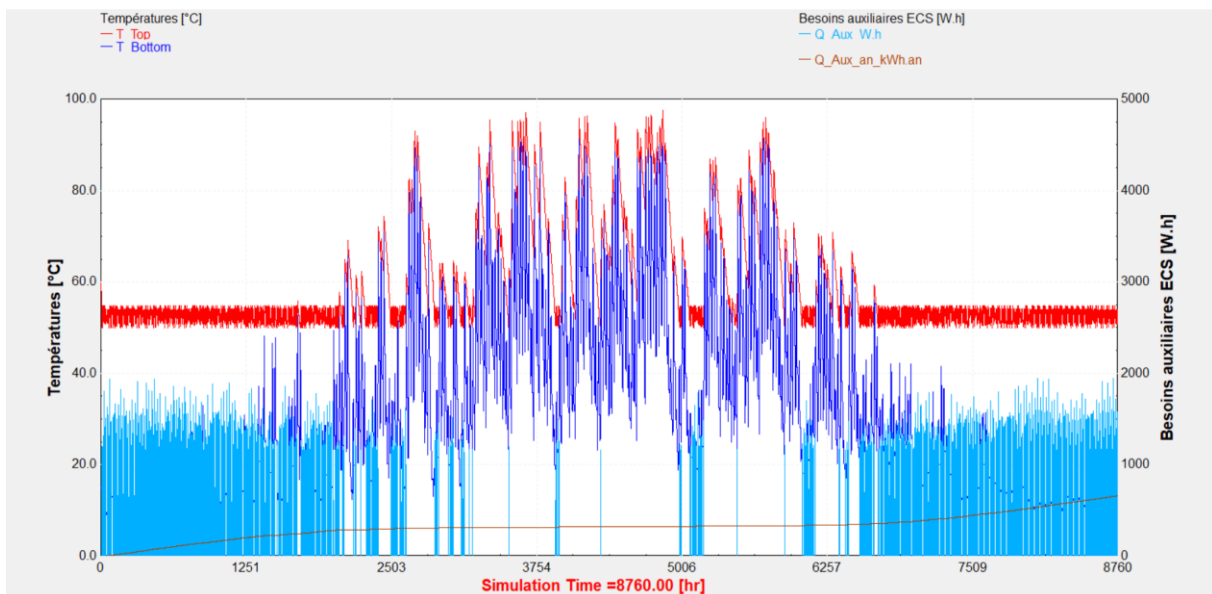


Figure 21 : Besoins électriques auxiliaires électriques pour l'ECS

3.3.15. DATA METEO (INITIAL)

Le fichier météorologique utilisé initialement dans le modèle, et sur lequel se basera le calibrage, est le fichier « Liege-City_TMY2001-2020_hist_MAR-MIR_TTbased ». Il s'agit d'un fichier TMY (Typical Meteorological Year), construit de sorte qu'il est représentatif des conditions moyennes climatiques de la ville de Liège entre 2001 et 2020. Les données contenues dans ce fichier ont été produites par le Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie de l'Université de Liège.

Dans ce travail, nous connaissons les consommations mensuelles d'électricité et de chauffage pour les années 2004, 2005 et 2006, reportées dans (Fani, 2020). Cependant, les données météorologiques précises de ces trois années ne nous étaient pas disponibles. Par conséquent, nous avons choisi le fichier TMY sur 2001-2020 comme climat moyen de référence pour calibrer le bâtiment. Il sera *a priori* le plus représentatif du climat réel durant cette période. Ce choix nous amènera à comparer les consommations simulées aux consommations réelles moyennées sur les 3 années de collecte. Certes il ne s'agit pas d'une calibration parfaite, étant donné que le modèle ne sera pas simulé sous les mêmes conditions climatiques que celles auxquelles était soumis le bâtiment, mais cette calibration nous permettra malgré tout d'obtenir une bonne estimation de la qualité du modèle.

3.4. CALIBRAGE

3.4.1. Indicateurs du calibrage

Comme dans les études de ATTIA et GOBIN, et de FANI, nous utilisons « l'approche de simulation calibrée pour l'ensemble du bâtiment », conformément à la ligne directrice 14 (Guideline 14) de l' "American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers" (ASHRAE). Nous utilisons les deux indicateurs de la directive qui sont :

1. Le "Mean Bias Error", MBE , défini comme :

$$MBE [\%] = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} M_i}$$

Équation 7 : Mean Bias Error (NMBE)

2. Le "Coefficient of Variation of Root Square Mean Error", $CV(RMSE)$, défini comme :

$$CV(RMSE) [\%] = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p} (M_i - S_i)^2}{N_p}}$$

Équation 8 : Coefficient of Variation of Root Square Mean Error (CV(RMSE))

Où N_p est le nombre de données, M_i (avec $i = 1, 2, 3, \dots, N_p$) les données mesurées, S_i (avec $i = 1, 2, 3, \dots, N_p$) les données simulées.

Pour considérer le modèle comme calibré, il faut que :

$$MBE < 5\%$$

Et que

$$CV(RMSE) < 15\%$$

3.4.2. Demande électrique

Le Tableau 8 et la Figure 22 nous montrent le data de référence en matière de consommations électriques pour les années 2004, 2005 et 2006, et la moyenne des besoins électriques sur cette période.

	measured 2004-2005	measured 2005-2006	measured 2006-2007	moyenne 2004-2007
janvier	285	290	265	280
février	275	280	305	287
mars	285	295	300	293
avril	255	260	275	263
mai	255	250	240	248
juin	245	260	270	258
juillet	210	250	205	222
août	245	265	270	260
septembre	255	295	275	275
octobre	280	305	290	292
novembre	290	310	300	300
décembre	300	330	300	310

Tableau 8 : Consommations mensuelles en électricité mesurées

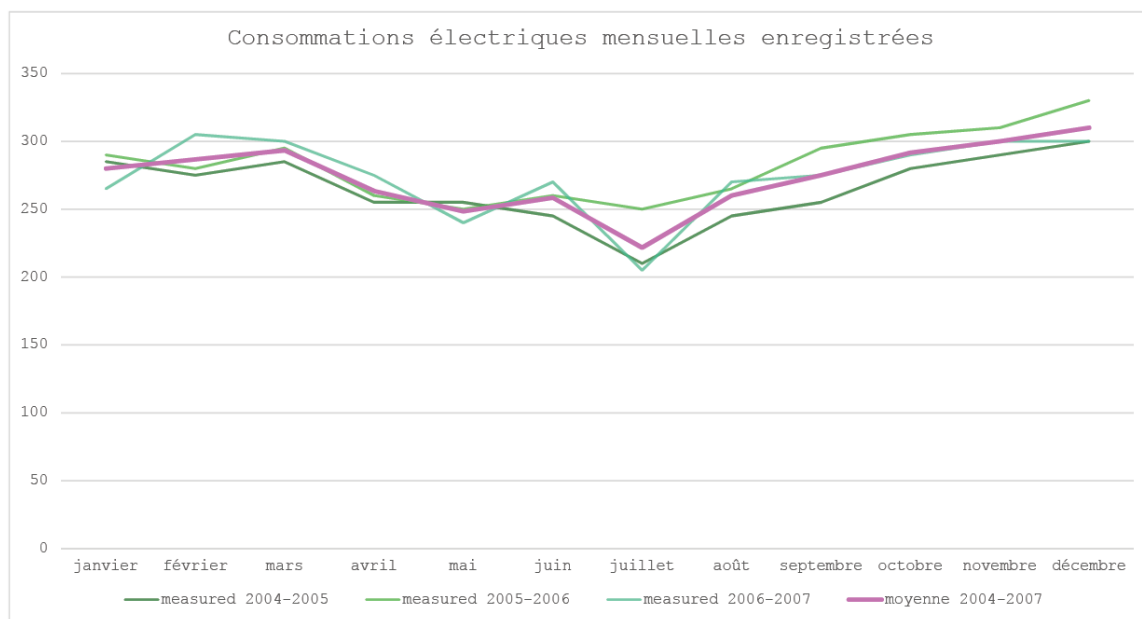


Figure 22 : Profils annuels des consommations en électricité mesurées

La première simulation, sans facteur mensuel qui permet d'adapter le profil des consommations simulées aux consommations réelles relevées, est déjà une simulation pour laquelle les indicateurs de calibrage sont satisfaisants, comme repris dans le Tableau 9. Le profil annuel de l'essai 1 est illustré sur la Figure 23.

	measured 2004-2005	measured 2005-2006	measured 2006-2007	moyenne 2004-2007	essai 1
janvier	285	290	265	280	286
février	275	280	305	287	263
mars	285	295	300	293	292
avril	255	260	275	263	284
mai	255	250	240	248	286
juin	245	260	270	258	284
juillet	210	250	205	222	292
août	245	265	270	260	286
septembre	255	295	275	275	289
octobre	280	305	290	292	286
novembre	290	310	300	300	278
décembre	300	330	300	310	297
TOTAL				3288	3423
MBE	8%	1%	4%	4%	< 5%
CV(RMSE)	10%	9%	11%	9%	< 15 %

Tableau 9 : Consommations mensuelles en électricité mesurées et simulées (essai 1)

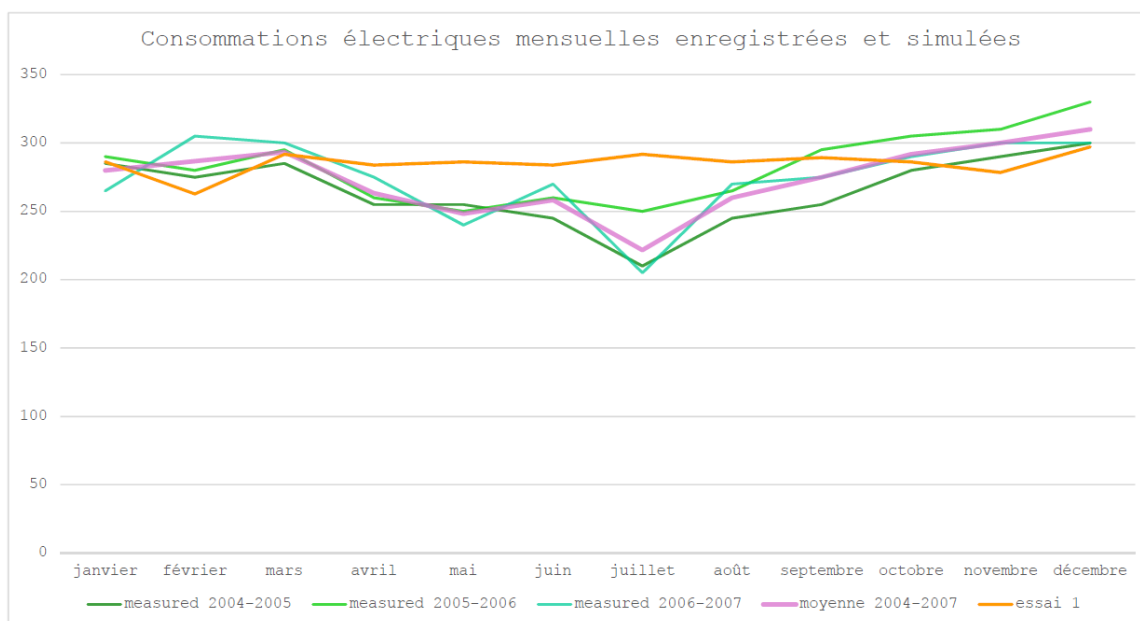


Figure 23 : Profils annuels des consommations en électricité mesurées et simulées (essai 1)

Bien que ce premier essai satisfasse aux indicateurs fixés par la guideline 14 de ASHRAE, le profil pourrait être adapté pour mieux correspondre à celui des consommations électriques moyennes. C'est pourquoi nous appliquons les facteurs mensuels reportés dans le Tableau 10 aux électroménagers dits « variables », repris dans le Tableau 6.

Ainsi, la simulation satisfait davantage aux indicateurs fixés par la guideline 14 de ASHRAE, et le profil des consommations simulées correspond davantage à celui des demandes réelles. Les résultats du modèle calibré sont repris dans le Tableau 11 et illustrés sur la Figure 24.

	Facteur de Calibrage mensuel	measured 2004-2005	measured 2005-2006	measured 2006-2007	moyenne 2004-2007	essai 2 calibré
janvier	0,95	285	290	265	280	281
février	1,25	275	280	305	287	288
mars	1	285	295	300	293	292
avril	0,8	255	260	275	263	262
mai	0,65	255	250	240	248	249
juin	0,76	245	260	270	258	258
juillet	0,4	210	250	205	222	225
août	0,75	245	265	270	260	259
septembre	0,9	255	295	275	275	278
octobre	1,05	280	305	290	292	292
novembre	1,2	290	310	300	300	299
décembre	1,1	300	330	300	310	309
TOTAL					3288	3291
MBE		3%	-3%	0%	0%	< 5%
CV(RMSE)		3%	3%	4%	1%	< 15 %

Tableau 10 : Facteurs de calibrage mensuels appliqués aux besoins en électricité

Tableau 11 : Consommations mensuelles en électricité mesurées et simulées (essai 2 – modèle calibré)

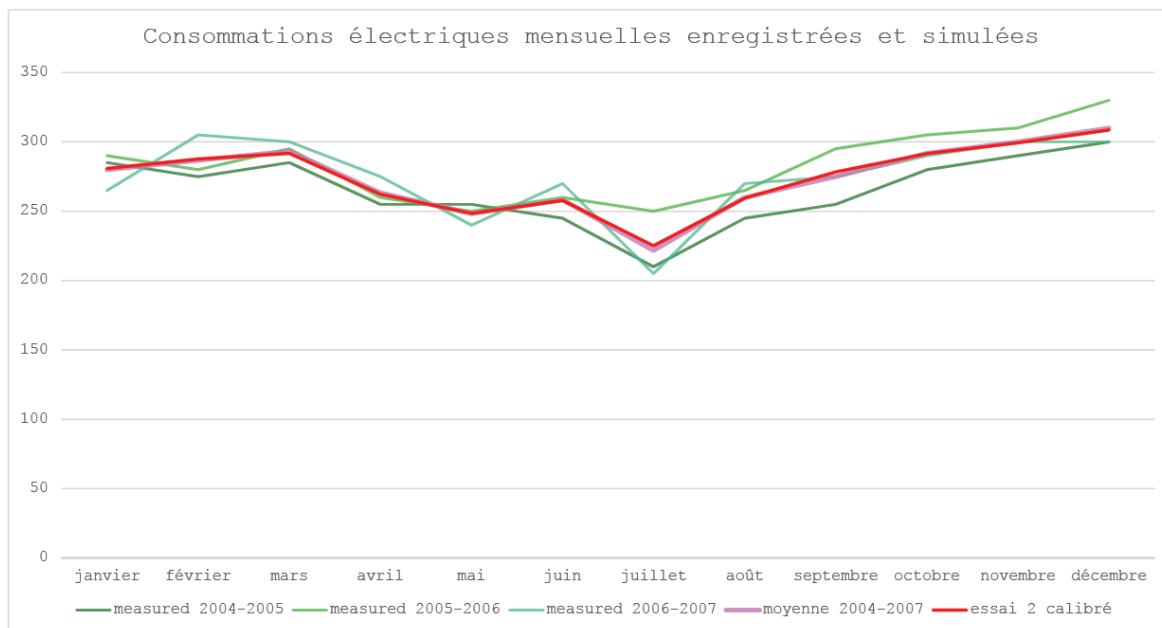


Figure 24 : Profils annuels des consommations en électricité mesurées et simulées (essai 2 – modèle calibré)

Les profils horaires du modèle calibré sont quant à eux illustrés sur la Figure 25.

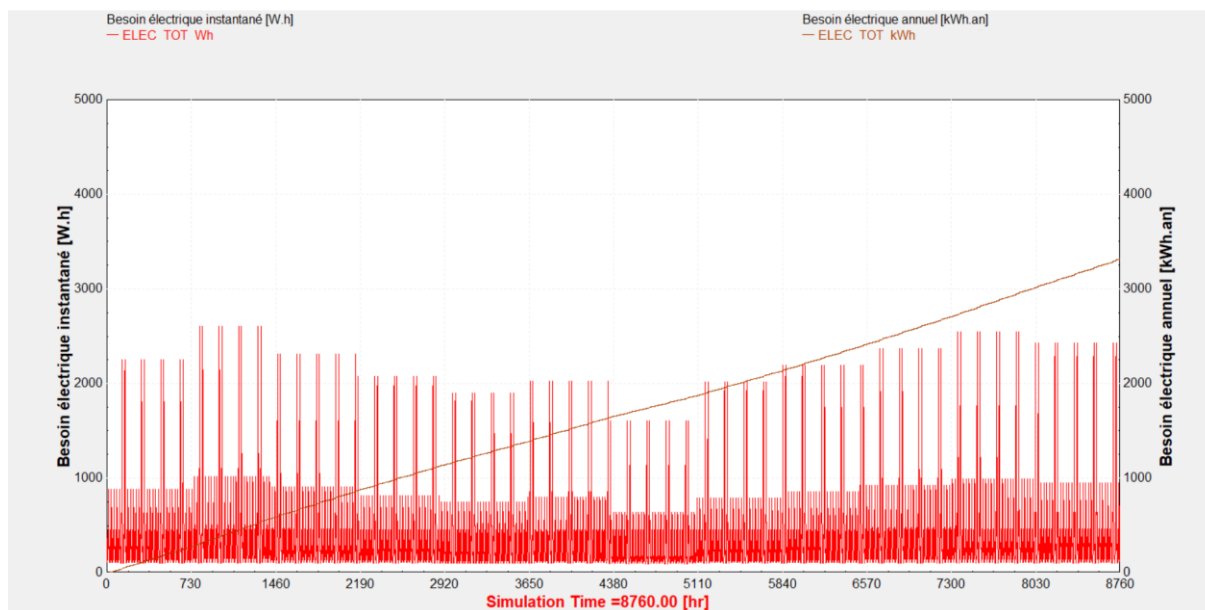


Figure 25 : Profil annuel des besoins horaires en électricité simulés (essai 2 – modèle calibré)

Les profils par pièces sont repris dans l'Annexe 3 : Profils de consommations électriques par pièce.

3.4.3. Demande de chauffage

3.4.3.1. Data de référence

Le Tableau 12 et la Figure 26 nous montrent le data de référence en matière de consommations de chauffage pour les années 2004, 2005 et 2006, et la moyenne des besoins de chauffage sur cette période.

	measured 2004-2005	measured 2005-2006	measured 2006-2007	moyenne 2004-2007
janvier	2,51	2,16	1,92	2,20
février	2,33	1,92	1,77	2,01
mars	2,16	1,74	1,57	1,82
avril	1,68	1,09	1,03	1,27
mai	0,80	0,56	0,30	0,55
juin	0,00	0,00	0,00	0,00
juillet	0,00	0,00	0,00	0,00
août	0,89	0,62	0,21	0,57
septembre	1,65	1,21	1,12	1,33
octobre	2,04	1,74	1,33	1,70
novembre	2,30	1,92	1,74	1,99
décembre	2,45	2,01	1,83	2,10
TOT kWh/m ²	18,82	14,98	12,83	15,54
TOT kWh	3185	2535	2170	2630

Tableau 12 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées

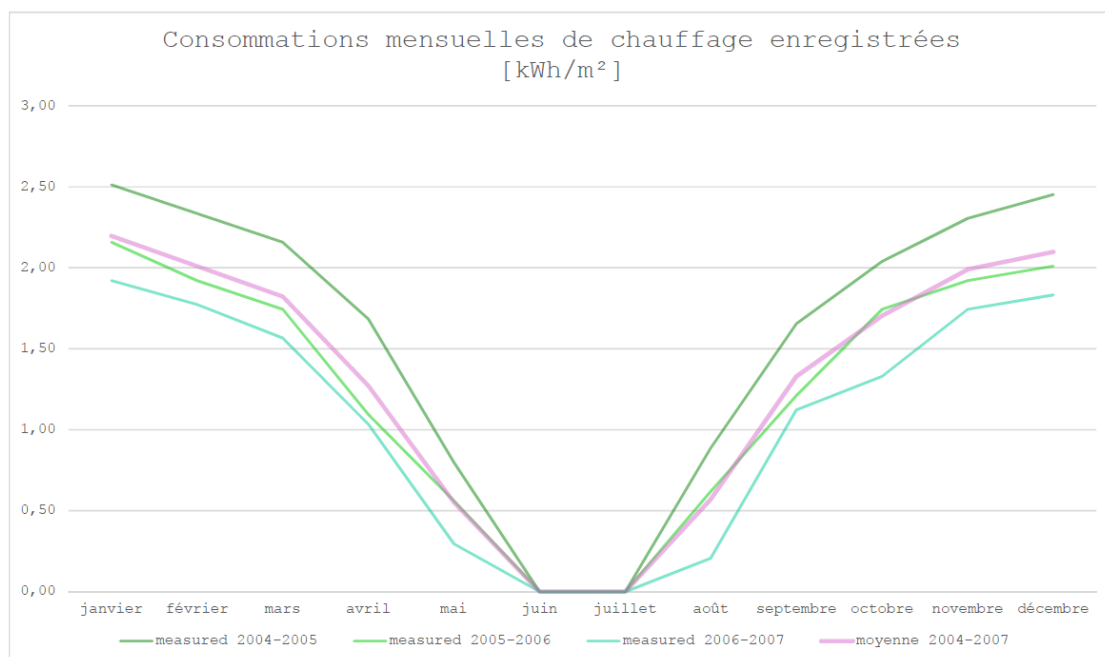


Figure 26 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées

3.4.3.2. Essai 1 : Essai initial

Le Tableau 13 et la Figure 27 nous montrent les résultats de la première simulation lancée sur base de tous les paramètres fixes encodés dans le modèle 0. Les indicateurs MBE et CV (RMSE) calculés pour l'essai 1 sont loin d'être satisfaisants par rapport à la moyenne établie sur 2004-2007. Les valeurs négatives des MBE indiquent que les besoins sont sous-évalués. Nous allons tenter de trouver les paramètres à modifier dans le modèle pour y remédier. En revanche, remarquons la ressemblance entre notre profil initial (Figure 27) et le profil initial de FANI, Figure 28. Cette ressemblance atteste de la concordance des résultats obtenus sur le logiciel TRNSYS et sur le logiciel DesignBuilder.

	measured 2004-2005	measured 2005-2006	measured 2006-2007	moyenne 2004-2007	essai 1 TMY2001-20
janvier	2,51	2,16	1,92	2,20	2,08
février	2,33	1,92	1,77	2,01	1,58
mars	2,16	1,74	1,57	1,82	0,86
avril	1,68	1,09	1,03	1,27	0,19
mai	0,80	0,56	0,30	0,55	0,11
juin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
juillet	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
août	0,89	0,62	0,21	0,57	0,00
septembre	1,65	1,21	1,12	1,33	0,00
octobre	2,04	1,74	1,33	1,70	0,24
novembre	2,30	1,92	1,74	1,99	1,38
décembre	2,45	2,01	1,83	2,10	1,36
TOT kWh				15,54	7,80
MBE	-59%	-48%	-39%	-50%	< 5%
CV (RMSE)	36%	36%	39%	36%	< 15 %

Tableau 13 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées et simulées (essai 1)

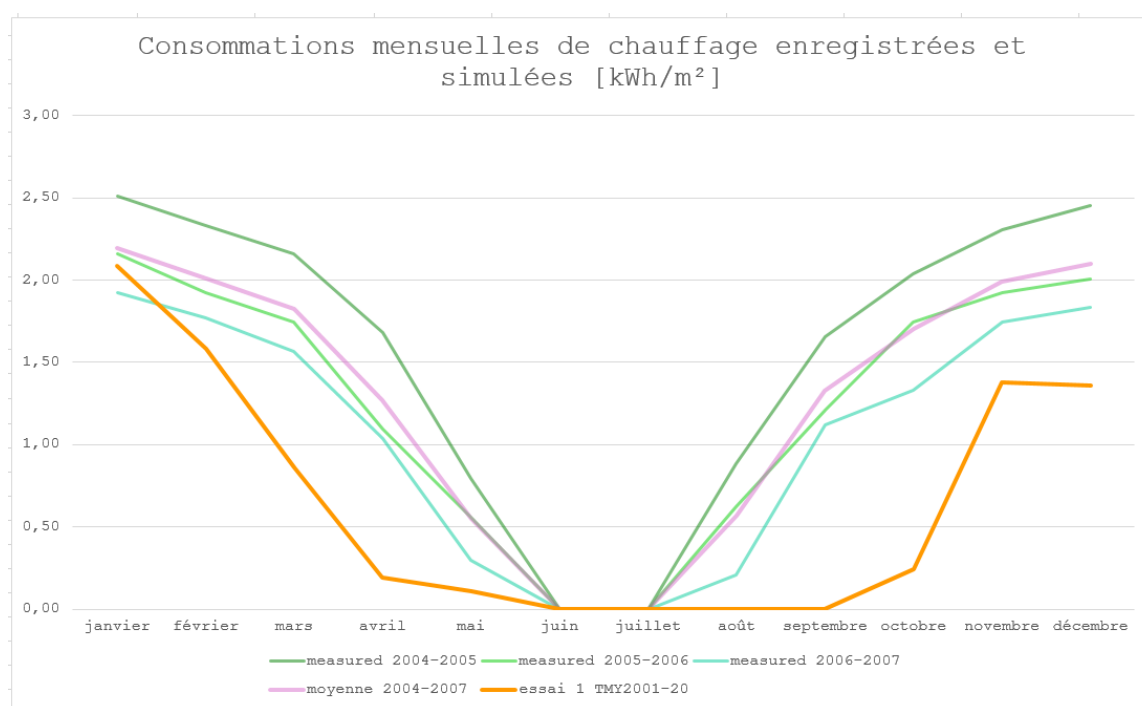


Figure 27 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées (essai 1)

3.4.3.3. Calibrage : Travaux précédents

Avant d'essayer de calibrer notre modèle, analysons les calibrages des travaux précédents pour tenter d'y trouver des solutions.

Dans son travail de 2016, GOBIN s'est basée sur les critères de la maison passive pour calibrer son bâtiment. Ces critères imposent :

- Une surchauffe maximale de 438 h/an, pour laquelle le critère de surchauffe est établi selon la norme NBN EN 15251, qui indique une température opérative limite de 26°C. Elle ne précise cependant pas dans quelle zone ce critère a été évalué, si elle a considéré le salon uniquement, ou si elle a comparé le critère à une moyenne (pondérée ?) des surchauffes dans les zones ;
- Une consommation de chauffage de maximum 15 kWh/m².an ;

Si son modèle semble correspondre à celui d'une maison passive, elle ne s'assure pas d'avoir calibré le bâtiment situé à Kettenis. En effet, GOBIN pose l'hypothèse que le bâtiment répond bien aux critères

passifs, or nous n'en avons pas la certitude. Elle a estimé la surchauffe en heures, or si elle avait conservé une unité de surchauffe exprimée en degré-heure, elle aurait pu estimer plus précisément l'amplitude de cette surchauffe, *i.e.* un dépassement pendant une heure de 10°C par rapport au critère fixé à 26°C correspond à une heure de surchauffe, mais à dix degré-heure.

Dans leur travail de 2020, ATTIA et GOBIN ont calibré le bâtiment selon les données mensuelles enregistrées décrites dans ce travail. Ils se sont basés sur les critères de la norme 140-2017 de ASHRAE, soient aussi les indicateurs NMBE et CV (RMSE), autrement dit les mêmes critères que ceux que nous utilisons. Cependant, il a été considéré que ces valeurs, inférieures à 10% pour le NMBE et inférieures à 30% pour le CV (RMSE) étaient satisfaisantes, et que pour accéder à plus de détails concernant son calibrage, il fallait se reporter au travail de 2016. Nous pouvons en déduire qu'il s'agit donc du même modèle et de la même calibration que celle du travail précédent, pour laquelle ont été évalués les indicateurs de la guideline, sans modification nouvelle du modèle.

FANI a lui aussi utilisé les indicateurs MBE et CV (RMSE) de la guideline 14 de ASHRAE. Il a calibré son modèle par rapport aux données mensuelle mesurées et reportées dans le travail de 2020 de ATTIA et GOBIN. Notons que pour établir son modèle, FANI est reparti des données de DE MEESTER et de GOBIN et a créé son modèle sur DesignBuilder comme GOBIN, peut-être même en repartant même du même modèle numérique. Les résultats de sa simulation initiale sont illustrés sur la Figure 28.

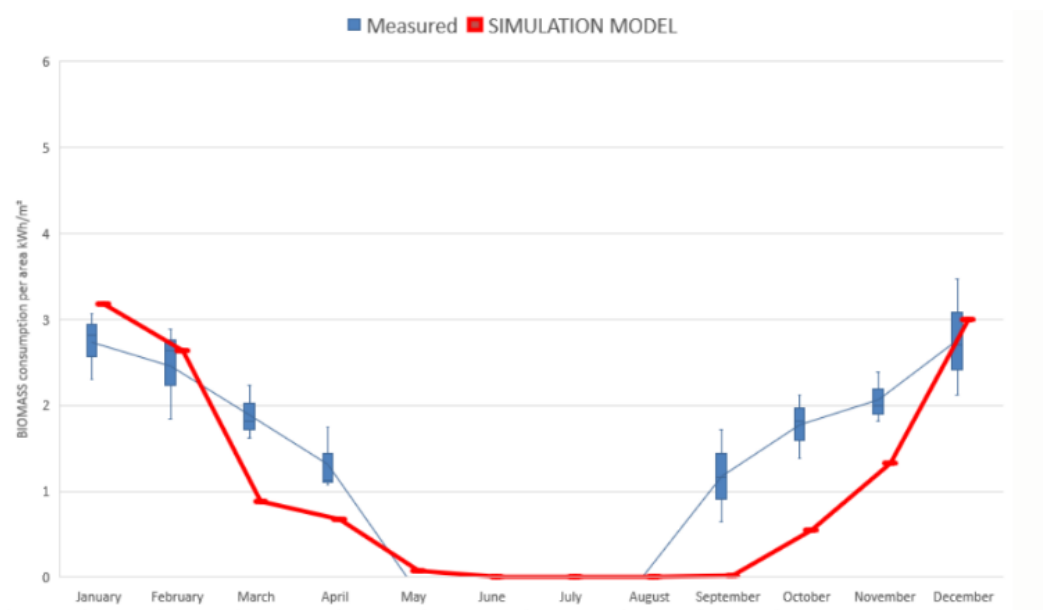


Figure 3.12-The ASHRAE indicators before calibration

Figure 28 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées par (Fani, 2020) avant calibrage

Pour calibrer son modèle, FANI a modifié les rendements et les pertes du système de chauffage, ce qui semble étonnant au regard de la différence entre les profils de consommations de chauffage du modèle initial et du modèle calibre. En effet, la consommation mensuelle estimée initialement à 0kWh/m² pour le mois de septembre est estimée à 0,7kWh/m² après modification du rendement, pendant que celle du mois de mai demeure nulle. Le changement de rendement augmenterait significativement les besoins de mars et de novembre, alors que dans un même temps il n'augmenterait que modestement les besoins des mois de janvier, février et décembre. Les explications apportées par FANI sur les modifications apportées au modèle initial sont plutôt sommaires et résumées en une phrase : "Therefore the efficiency of the heating system was improved

(including the yield coefficient and heat loss) to obtain results within the range of the real-life measurements”. Les résultats de sa simulation après calibrage sont illustrés sur la Figure 29.

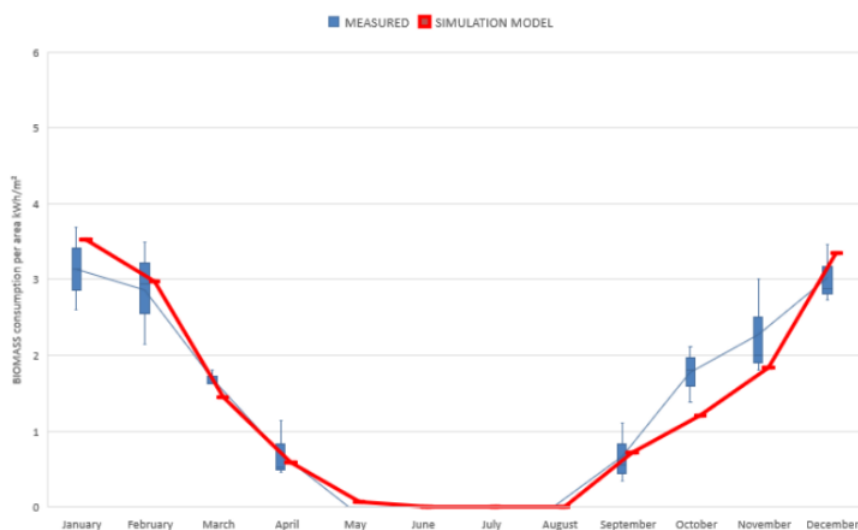


Figure 3.13-The The ASHRAE indicators after calibration.

Figure 29 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées par (Fani, 2020) après calibrage

3.4.3.4. Calibrage : Nos modifications / Nos paramètres

Pour modifier le modèle initial, nous devons suivre la ligne directrice ASHRAE. Celle-ci impose de calibrer le bâtiment sur les enveloppes thermiques, les systèmes, les gains internes, les profils d'occupation, les infiltrations et les hypothèses climatiques. Elle impose aussi que toute calibration soit plausible, par exemple nous ne pouvons pas intégrer une valeur de résistance thermique exagérément grande dans le but de diminuer les consommations globales. La guideline recommande une approche structurée, où il est question d'identifier les paramètres incertains, ensuite de calibrer le comportement global puis les détails, et de ne changer qu'un paramètre à la fois. Chaque changement doit être documenté. À chaque boucle, il faut comparer les indicateurs MBE et CV(RMSE).

Les prochaines parties procèdent dans le respect de cette ligne de conduite.

3.4.3.5. Essai 2 : Modification du vitrage

La première observation par rapport aux premiers résultats obtenus est la sous-évaluation accrue des besoins de chauffage à la mi-saison (printemps et automne).

Durant cette période, la conception bioclimatique en Belgique nous apprend que les apports solaires peuvent jouer un rôle majeur dans la diminution des besoins de chauffage. Ici, ces apports semblent surévalués et par conséquent, les besoins en chauffage sont sous-évalués. Intéressons-nous à ces apports solaires, qui sont directement liés aux propriétés des éléments vitrés.

Nous savons que GOBIN a repris les U informés par DE MEESTER, soient $U_{\text{window}} = 0,81 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $U_{\text{glass}} = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. En revanche, il semblerait que le facteur solaire du vitrage ait été défini arbitrairement, certainement en sélectionnant une fenêtre de la bibliothèque DesignBuilder. Ce facteur solaire s'élève à $g = 0,687$ qui est une valeur très élevée, pour laquelle aucune source n'est mentionnée, ni dans le travail de GOBIN, ni dans celui de DE MEESTER. Or cette propriété du vitrage joue un rôle prépondérant dans le bilan énergétique du bâtiment, tant pour les besoins en chauffage (plus ou moins diminués par les apports solaires) que pour la surchauffe (plus ou moins élevée selon les apports solaires).

Les propriétés précises des fenêtres recensées dans le travail de DE MEESTER sont les suivantes :

- 3 vitres de 4mm d'épaisseur, séparées par 12mm d'un mélange Argon-Krypton (soit 36mm) ;
- Un U du vitrage qui vaut 0,5 W/m²K ;
- Un U global de la fenêtre qui vaut 0,81 W/m²K ;
- Des propriétés acoustiques : 33dB pour la fenêtre et 32dB pour le vitrage ;
- Le code du vitrage, qui est « 4b/12g/4/12g/b4 » (avec « b » pour basse émissivité, « g » pour gaz fill).

Ces données ne nous permettent pas de déduire le facteur solaire g du vitrage, qui dépend d'autres paramètres, notamment la composition du verre, que nous ne connaissons pas. *A priori*, il devrait se situer raisonnablement entre 0,35 et 0,55.

Faisons varier ce facteur solaire et observons l'évolution des profils de consommation de chauffage. Rappelons que notre hypothèse initiale considérait une g = 0,50. Pour réduire ces apports solaires, essayons des valeurs inférieures, soient 0,35 ; 0,20 ; 0,11 ; et une valeur proche de celle considérée par GOBIN, 0,60. Les résultats sont reportés dans le Tableau 14 et illustrés sur la Figure 30.

	measured 2004-2005	measured 2006-2007	moyenne 2004-2007	sim1 ; g = 0,50	sim2 ; g = 0,35	sim3 ; g = 0,20	sim4 ; g = 0,11	sim5 ; g = 0,60
janvier	2,51	1,92	2,20	2,08	2,20	2,38	2,49	2,05
février	2,33	1,77	2,01	1,58	1,74	1,96	2,09	1,53
mars	2,16	1,57	1,82	0,86	1,23	1,68	1,94	0,73
avril	1,68	1,03	1,27	0,19	0,44	0,80	1,01	0,13
mai	0,80	0,30	0,55	0,11	0,26	0,49	0,63	0,07
juin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,00
juillet	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
août	0,89	0,21	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
septembre	1,65	1,12	1,33	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
octobre	2,04	1,33	1,70	0,24	0,44	0,71	0,87	0,20
novembre	2,30	1,74	1,99	1,38	1,49	1,65	1,74	1,35
décembre	2,45	1,83	2,10	1,36	1,44	1,56	1,63	1,34
TOT kWh								
MBE				-50	-41	-28	-20	-52
CV (RMSE)				36	34	33	34	37

Tableau 14 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées et simulées (essai 2a)

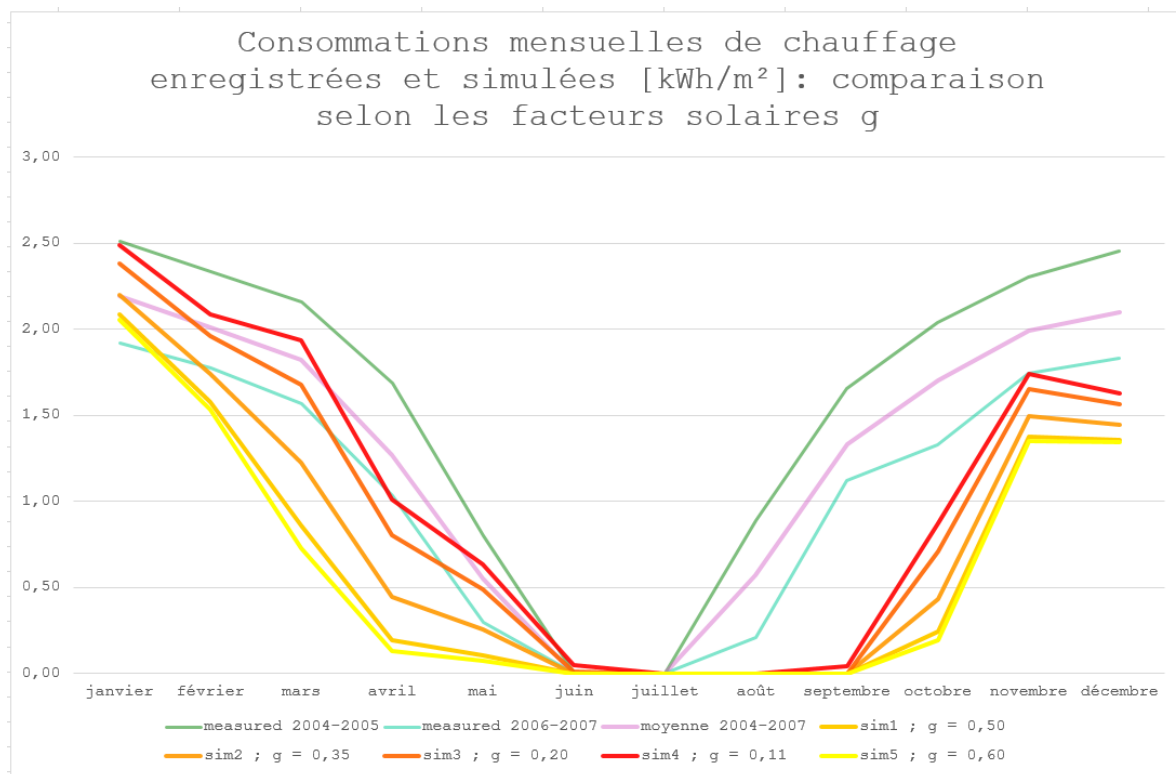


Figure 30 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées (essai 2a)

Nous remarquons la différence significative des résultats simulés obtenus pour les mois de mars, avril et mai. Le facteur solaire qui nous renvoie le MBE minimum est $g = 0,11$, où $MBE = -20$. Ce résultat est malgré tout surprenant car un facteur si faible est peu courant sur le marché classique. Il ne s'agit peut-être pas du facteur solaire du vitrage réellement mis en œuvre, cependant la tendance montre que le facteur solaire semble surévalué dans l'hypothèse de GOBIN, ou en tout cas les apports solaires à la mi saison semblent surévalués.

Cette surévaluation des gains solaires peut s'expliquer par des éléments réellement mis en place qui nous échappent et tronquent nos résultats. Ces éléments peuvent être diverses et variés : des volets extérieurs finalement mis en œuvre, des rideaux et des stores extérieurs, des masques solaires non-modélisés (arbres, bâtiments voisins,...), les balcons et protections solaires fixes mises en œuvre plus grandes que sur nos plans, un comportement « défensif » des occupants (fermeture anticipée de stores, occultation avant le soir, inconfort lumineux atteint avant l'inconfort thermique,...), une différence entre les apports solaires réels et ceux estimés par TRNSYS, soit intrinsèquement liée au logiciel, soit liée au fichier météo.

Pour calibrer le bâtiment, l'important n'est pas de faire un choix physiquement rigoureux quant à la valeur physique du g , mais de choisir une valeur g qui permet de créer un modèle fidèle au comportement réel du bâtiment. Pour la suite du calibrage, nous retenons le facteur solaire $g = 0,20$, qui certes est très faible, mais qui demeure moins radical que $g = 0,11$. Une hypothèse plus plausible serait le $g = 0,35$, mais les résultats obtenus sont bien plus éloignés que la tendance mesurée *in situ*.

Pour l'étude du bilan Q-ZEN, dans laquelle nous aurons besoins des consommations de chauffage horaires, nous conserverons ce facteur solaire $g = 0,20$ avec lequel nous continuons le calibrage du bâtiment.

Pour l'étude de la surchauffe, nous reprendrons une valeur plus proche des études précédentes, soit un $g = 0,60$, de façon à pouvoir comparer nos résultats à ceux obtenus précédemment avec des

hypothèses communes. Avec cette hypothèse, la surchauffe s'élève à 11618°h.an dans le salon (degré-heures comptabilisés par rapport à une température opérative limite fixée à 26°C), comme illustré Figure 31.

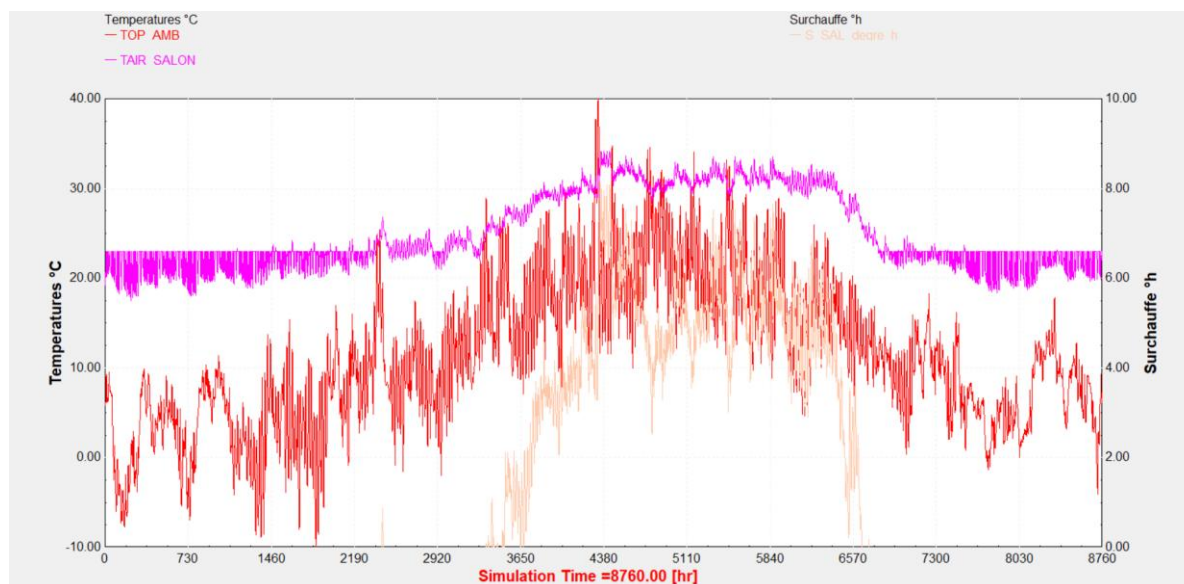


Figure 31 : Surchauffe initiale simulée avec $g = 0,60$ (14062°h.an)

Cependant, au vu de ce calibrage, il serait pertinent de questionner le niveau de surchauffe réel du bâtiment et de rechercher le facteur solaire réel du vitrage mis en œuvre et les pratiques effectives des occupants. Si le vitrage réel présentait un facteur solaire réellement bien inférieur à 0,50 comme par exemple $g = 0,35$, on pourrait en effet déjà considérablement diminuer la surchauffe « initialement considérée » du bâtiment. Avec cette hypothèse, la surchauffe s'élèverait à 5720°h.an dans le salon (degré-heures comptabilisés par rapport à une température opérative limite fixée à 26°C), comme illustré Figure 32. Un facteur réduit à $g = 0,20$ mène même à une surchauffe de 1214°h.an. Néanmoins l'état de l'art a bien mis en évidence, avec l'appui d'autres études, le risque de surchauffe actuel et futur auquel sont soumis les bâtiments Q-ZEN wallons. Nous limitons donc le questionnement de ce facteur solaire au présent calibrage et nous conservons la valeur $g = 0,60$ pour l'étude de la surchauffe, comme dit précédemment.

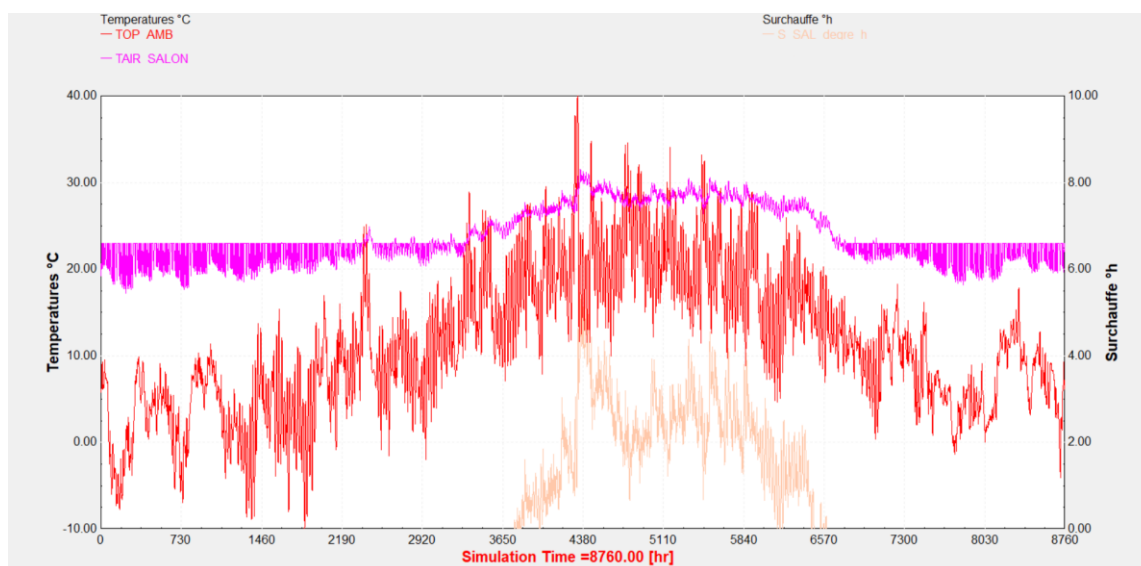


Figure 32 : Surchauffe initiale simulée avec $g = 0,35$ (5720°h .an)

Un dernier paramètre des fenêtres que nous pourrions être tentés de faire varier est la résistance thermique du châssis, bien qu'elle est clairement définie dans le travail de DE MEESTER (environ $U_{\text{frame}} = 2,22 \text{ W/m}^2\text{K}$). Pour l'exercice, nous avons fait varier ce paramètre pour observer la variation possible, mais nous conservons la valeur de $2,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ dans la suite. Les résultats sont reportés dans le Tableau 30 et illustrés sur la Figure 59, mis en Annexe 5 : Influence du châssis sur les consommations mensuelles de chauffage.

3.4.3.6. Essai 3 : Ajout de nightcooling

La deuxième observation par rapport aux résultats obtenus après modification du facteur solaire du vitrage est la sous-évaluation des besoins de chauffage pendant les mois d'août, septembre et octobre.

Que ces besoins demeurent nuls ou très faibles est surprenant. Si les besoins sont nuls, c'est que la température intérieure doit être constamment supérieure à la température de consigne. Observons l'évolution des températures durant cette période.



Figure 33 : Évolution des températures intérieures pendant les mois d'août, septembre et octobre

Comme illustré Figure 33, les températures intérieures du salon et des chambres sont élevées pendant les mois d'août et de septembre, et même début octobre. On remarque en orange la surchauffe dans le salon (définie en degré-heure, lorsque la température opérative dépasse les 26°C). Comment justifier alors les consommations mesurées dans la réalité ? Ce qui est très probable, c'est un comportement « défensif » des occupants, soit un nightcooling déjà pratiqué par ceux-ci !

En effet, la nuit, il est plus agréable de dormir au frais. Sur la Figure 33 est illustrée en vert la « surchauffe » dans les chambres (définie en degré-heure, lorsque la température opérative dépasse les 23°C). Les habitants ouvrent certainement déjà les fenêtres pendant les nuits relativement fraîches d'août, septembre et octobre. Au lendemain matin, le bâtiment sous-refroidi nécessite alors un coup de chauffage pour atteindre la température de consigne, ce qui engendre une consommation de chauffage dans la réalité qui est passée sous le radar de la simulation initiale. Ces consommations sont visibles sur la Figure 34, simulation pour laquelle nous avons ajouté un nightcooling de 8 AC/h dans les chambres et le séjour, de 23h à 6h.

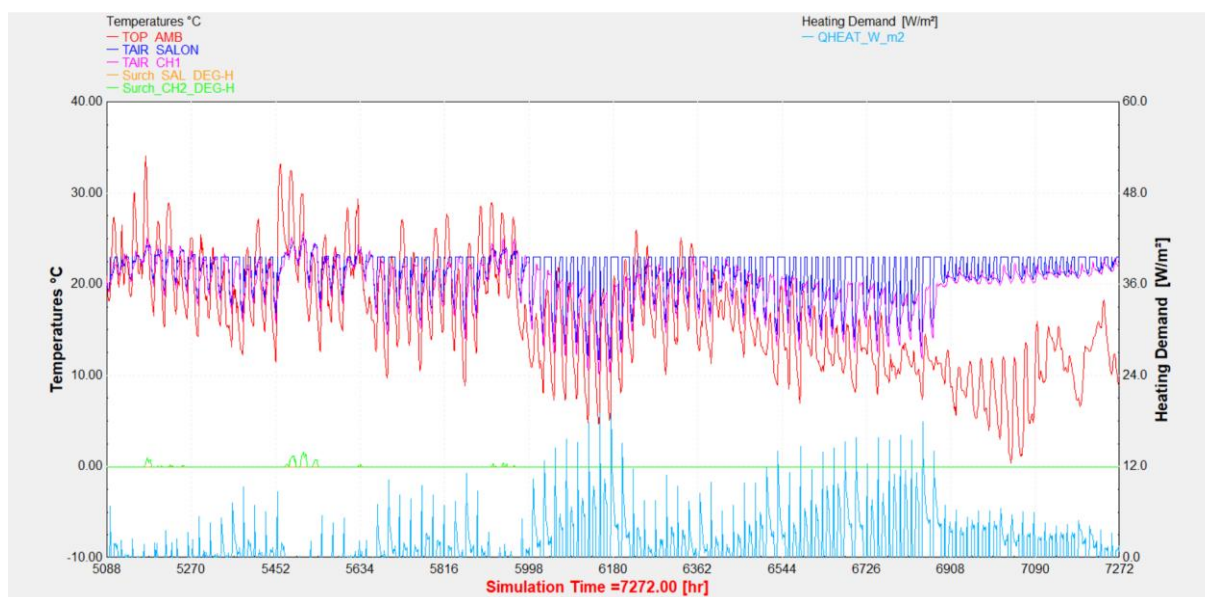


Figure 34 : Évolution des températures intérieures pendant les mois d'août, septembre et octobre avec ajout de refroidissement nocturne

Avec cet ajout, nous obtenons des consommations beaucoup plus proches de celles mesurées, comme reporté dans le Tableau 15 et illustré sur la Figure 35. L'indicateur MBE passe alors de -28% à -9% et le CV (RMSE) de 33% à 16% entre l'essai 3a.2 et la moyenne des consommations reportées entre 2004 et 2007, ce qui indique un calibrage déjà très satisfaisant.

	measured 2004-2005	measured 2006-2007	moyenne 2004-2007	3a.1 ; g=0,20 NC=0	3a.2; g=0,20 NC=8
janvier	2,51	1,92	2,20	2,38	2,38
février	2,33	1,77	2,01	1,96	1,96
mars	2,16	1,57	1,82	1,68	1,68
avril	1,68	1,03	1,27	0,80	0,80
mai	0,80	0,30	0,55	0,49	0,49
juin	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
juillet	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
août	0,89	0,21	0,57	0,00	0,41
septembre	1,65	1,12	1,33	0,00	1,43
octobre	2,04	1,33	1,70	0,71	1,70
novembre	2,30	1,74	1,99	1,65	1,65
décembre	2,45	1,83	2,10	1,56	1,56
TOT kWh					
MBE				-28	-9
CV (RMSE)				33	16

Tableau 15 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées et simulées (essai 3)

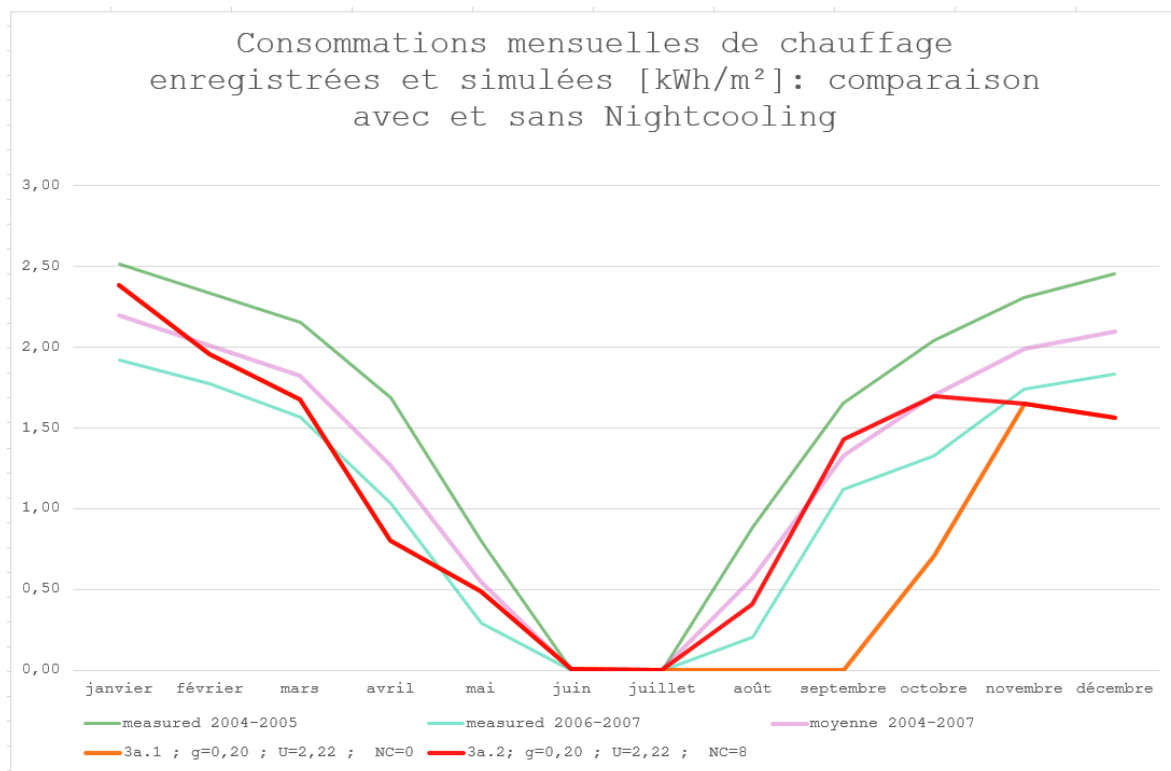


Figure 35 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées (essai 3)

3.4.3.7. Essai 4 : Influence du fichier météo

La dernière observation par rapport aux résultats obtenus après modification du facteur solaire du vitrage et l'ajout du nightcooling pour les mois d'août, septembre et octobre, est la sous-évaluation des besoins de chauffage pour les mois de novembre et décembre.

Il est dérangeant que ces besoins soient si faibles par rapport aux mois de janvier et de février, et il est presque inquiétant de voir les consommations régresser entre novembre et décembre. L'évolution qui serait attendue est plutôt une évolution des besoins de chauffage pour laquelle les besoins sont croissants et continuent croissants de décembre à janvier. En effet, il est surprenant que le mois de décembre soit soudainement moins froid que celui de novembre, puis que le mois de janvier devienne subitement très froid. L'explication se trouve peut-être dans le fichier météo utilisé dans ces simulations.

Pour rappel, le fichier utilisé pour ces simulations est le fichier TMY2001-2020. Sur base de ce fichier, nous essayons de calibrer notre modèle avec des données enregistrées entre 2004 et 2007. Nous avons donc posé l'hypothèse que le fichier historique 2001-2020 était le plus représentatif, mais cette hypothèse n'était peut-être pas la bonne. En analysant les mois de décembre et de janvier de la période 2001-2020, nous nous rendons compte que le mois de décembre (températures moyennes de 9,8°C et 5,8°C) est nettement plus chaud que le mois de janvier (températures moyennes de 4,7°C et -0,6°C), avec un écart entre les températures moyennes de 5,1°C et 6,4°C, comme illustré Figure 36.



Figure 36 : Températures de décembre et janvier, TMY 2001-2020

A contrario, pour les fichiers météo de la période 2006-2020, l'écart entre décembre (températures moyennes de 8°C et 3,9°C) et janvier (températures moyennes de 5,4°C et -0,2°C) est moins marqué, cet écart entre les températures moyennes étant de 2,6°C et 4,1°C, comme illustré Figure 37.

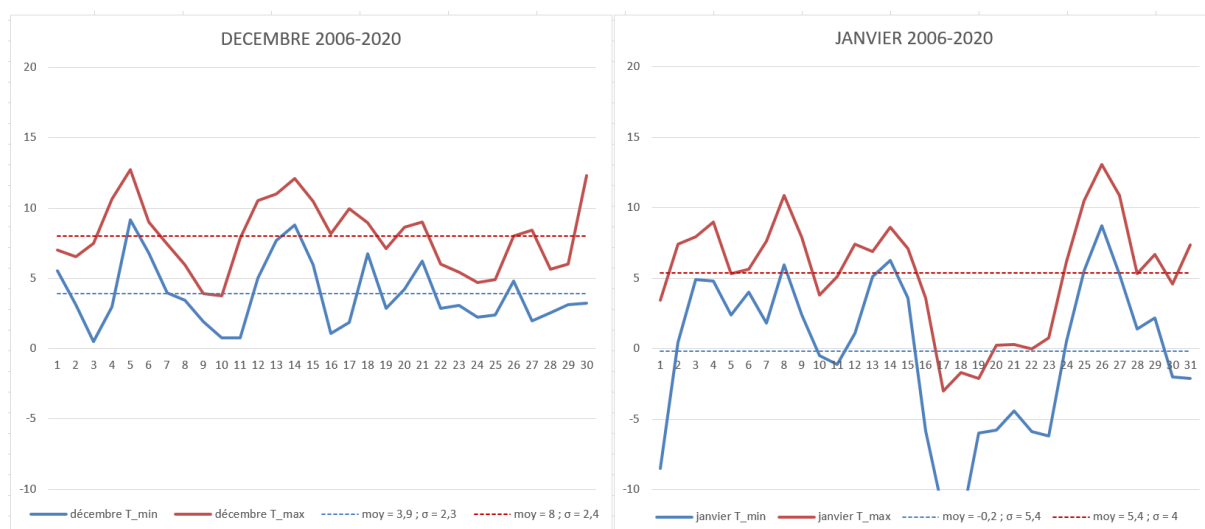


Figure 37 : Températures de décembre et janvier, TMY 2006-2020

De même, pour les fichiers météo de la période 1991-2005, l'écart entre décembre (températures moyennes de 4°C et -0,8°C) et janvier (températures moyennes de 4,3°C et -2,2°C) est presque nul, cet écart entre les températures moyennes étant de 0,3°C et 1,4°C, mais les températures sont nettement plus froides, comme illustré Figure 38.

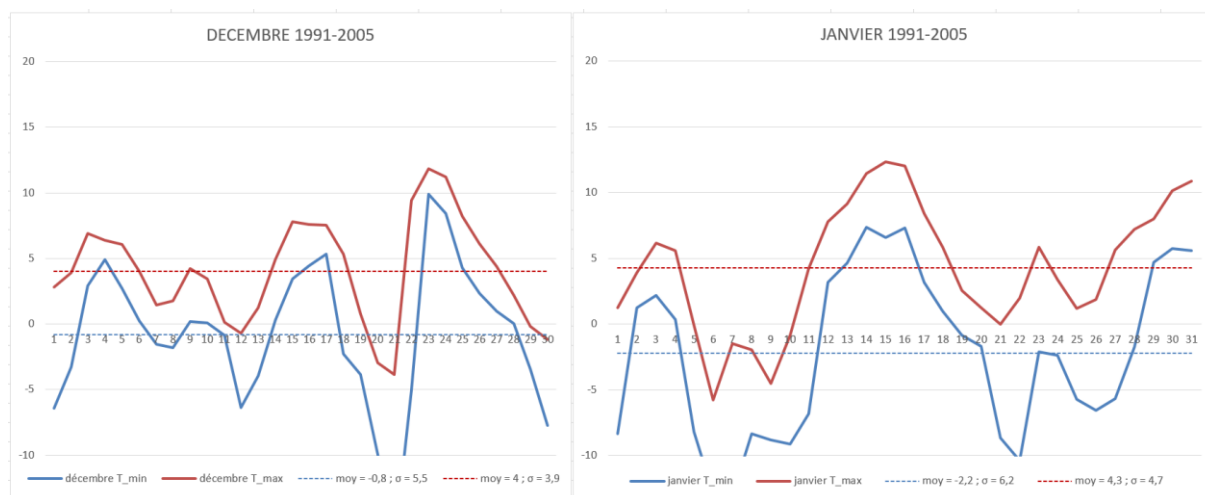


Figure 38 : Températures de décembre et janvier, TMY 1991-2005

Le détail des températures des mois de novembre, décembre, janvier et février des fichiers TMY 1991-2005, TMY 2001-2020 et TMY 2006-2020 est disponible dans l'Annexe 6 : Températures hivernales des fichiers météo TMY 1991-05, 2001-20 et 2006-20.

En essayant ces deux autres fichiers météo, nous obtenons les résultats reportés dans le Tableau 16 et illustrés Figure 39. Nous savions déjà que TMY 2001-2020 sous-estimait les consommations (MBE = -9%). TMY 1991-2005 a tendance à surévaluer les résultats symétriquement à la moyenne, à hauteur de MBE = 8%. Les résultats obtenus avec TMY 2006-2020 sous-estiment davantage les consommations que 2001-2020 (MBE = -13%) mais le profil obtenu pour novembre-décembre permet de réduire le CV(RMSE) à seulement 11%.

	measured 2004-2005	measured 2006-2007	moyenne 2004-2007	3a.2.1 ; g=0,2 TMY 2001-20	3a.2.2 ; g=0,2 TMY 1991-05	3a.2.3 ; g=0,2 TMY 2006-20
janvier	2,51	1,92	2,20	2,38	2,58	2,32
février	2,33	1,77	2,01	1,96	2,06	1,88
mars	2,16	1,57	1,82	1,68	1,91	1,64
avril	1,68	1,03	1,27	0,80	1,23	0,90
mai	0,80	0,30	0,55	0,49	0,47	0,29
juin	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
juillet	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
août	0,89	0,21	0,57	0,41	0,70	0,32
septembre	1,65	1,12	1,33	1,43	1,69	1,14
octobre	2,04	1,33	1,70	1,70	1,74	1,56
novembre	2,30	1,74	1,99	1,65	1,83	1,58
décembre	2,45	1,83	2,10	1,56	2,64	1,89
TOT kWh	18,82	12,83	15,54	14,08	16,83	13,53
MBE				-9%	8%	-13%
CV (RMSE)				16%	16%	11%

Tableau 16 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées et simulées (essai 4)

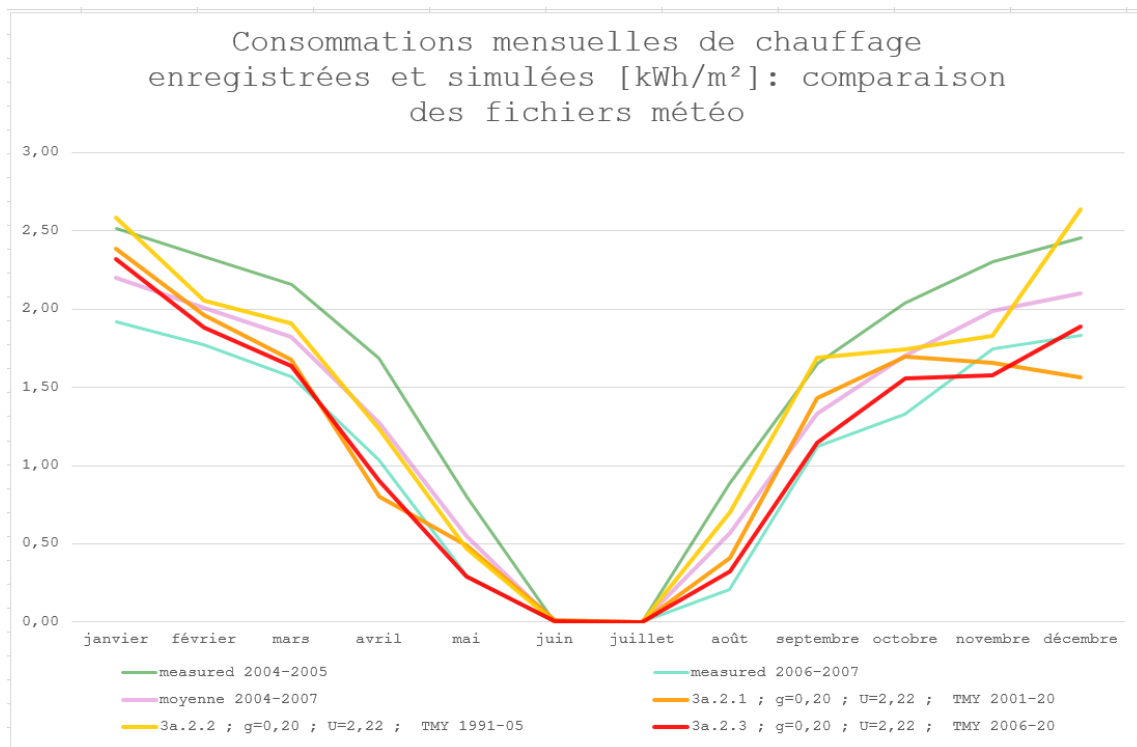


Figure 39 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées (essai 4)

Nous avons donc finalement lancé une dernière simulation avec le fichier TMY 2006-2020 et avec le vitrage précédemment écarté de facteur solaire $g = 0,10$, qui nous permet d'obtenir un modèle final dont les consommations mensuelles sont extrêmement fidèles à la moyenne des consommations enregistrées sur la période 2004-2007. Le Tableau 17 et la Figure 40 reprennent et illustrent ces résultats. C'est ce profil final que nous utiliserons pour le bilan électrique Q-ZEN.

En revanche et pour rappel, nous reprendrons le vitrage de facteur solaire $g = 0,60$ pour l'étude de la surchauffe, de façon à nous inscrire dans la continuité des études précédentes.

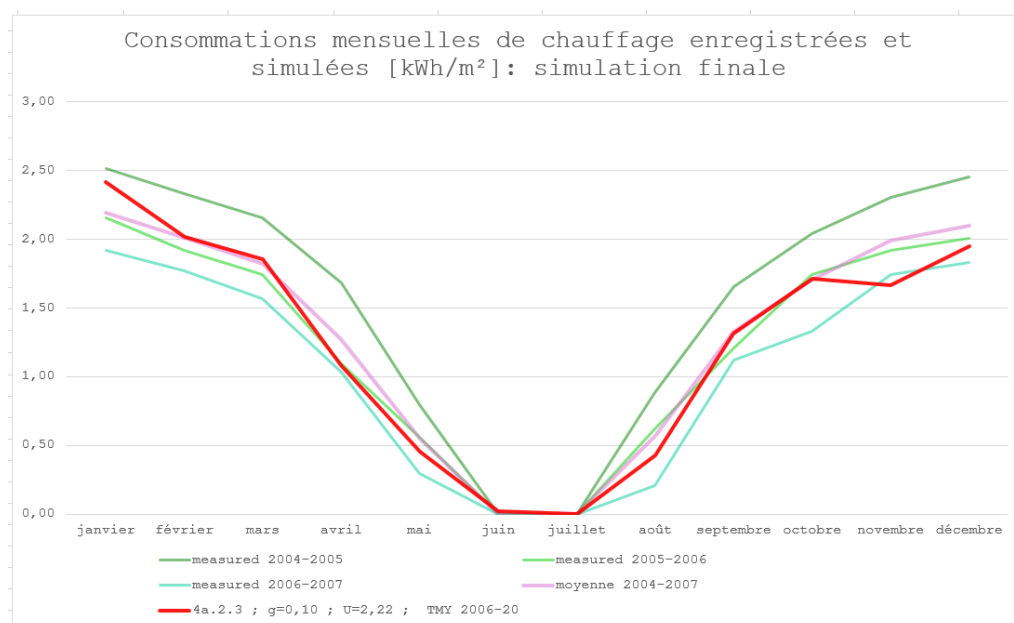


Figure 40 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées (essai 4 – modèle calibré)

	measured 2004-2005	measured 2005-2006	measured 2006-2007	moyenne 2004-2007	4a.2.3 : g=0,1 TMY 2006-20
janvier	2,51	2,16	1,92	2,20	2,42
février	2,33	1,92	1,77	2,01	2,01
mars	2,16	1,74	1,57	1,82	1,86
avril	1,68	1,09	1,03	1,27	1,09
mai	0,80	0,56	0,30	0,55	0,46
juin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
juillet	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
août	0,89	0,62	0,21	0,57	0,43
septembre	1,65	1,21	1,12	1,33	1,31
octobre	2,04	1,74	1,33	1,70	1,71
novembre	2,30	1,92	1,74	1,99	1,67
décembre	2,45	2,01	1,83	2,10	1,95
TOT kWh				15,54	14,92
MBE	-21%	0%	16%	-4%	< 5%
CV (RMSE)	13%	11%	15%	10%	< 15 %

Tableau 17 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées et simulées (essai 4 – modèle calibré)

3.4.3.8. Essai 5 : Modification des gains internes

Un dernier paramètre laissé en suspens est la proportion des consommations électriques converties en gains internes initialement considérée de 100%. Au vu du calibrage obtenu, nous conservons cette hypothèse, bien que conservatrice. En Annexe 7 : Influence des gains internes sur les consommations mensuelles de chauffage, la dernière simulation est relancée sans gains internes, illustrant alors dans quelle mesure les gains internes peuvent réduire les besoins de chauffage d'un bâtiment passif.

3.4.3.9. WORKFLOW SYNTHÉTIQUE DU CALIBRAGE

La Figure 41 résume les ajustements apportés au modèle initial et les modifications retenues, ainsi que les deux modèles calibrés et utilisés pour l'étude du chauffage et de la surchauffe.

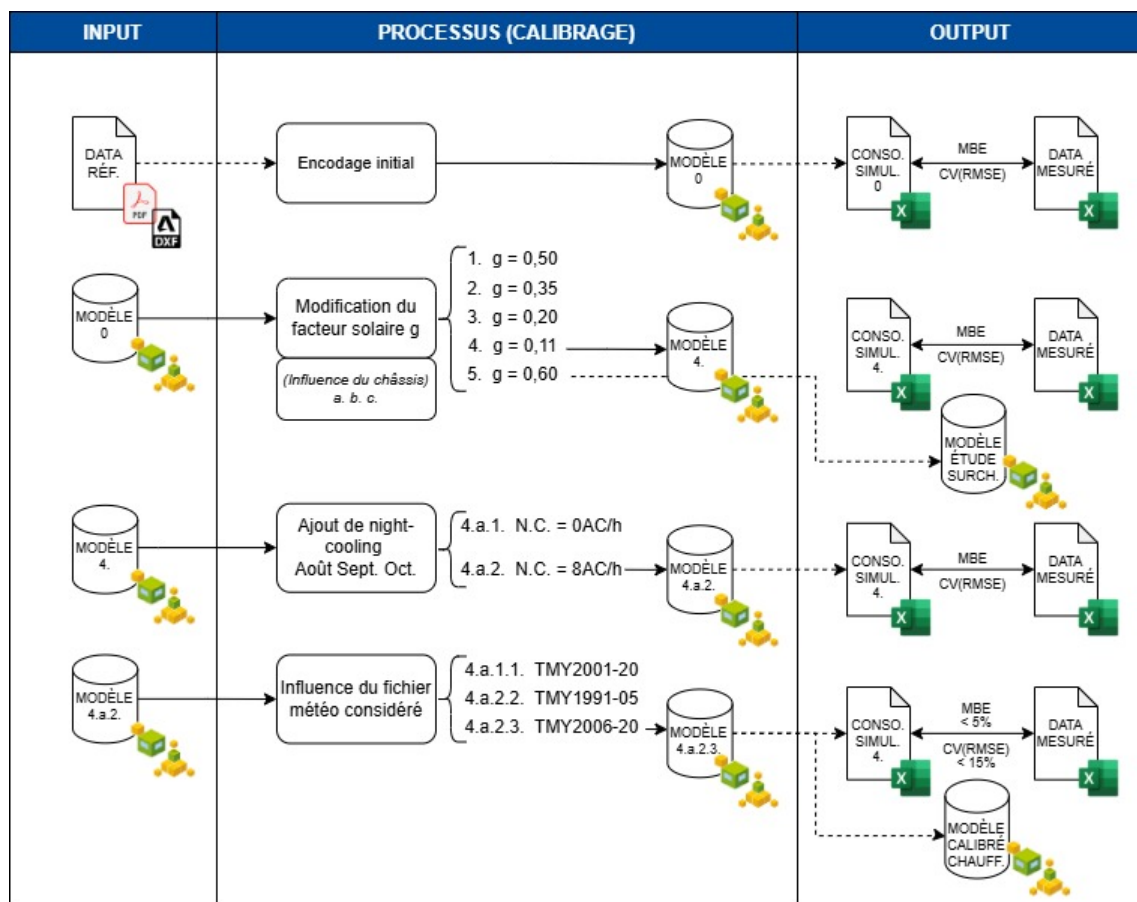


Figure 41 : Workflow synthétique du calibrage

3.5. BILAN Q-ZEN : MISE A JOUR DES SYSTEMES

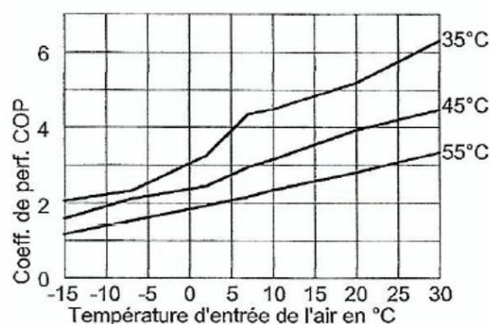
3.5.1. INTRODUCTION

La maison KETTENIS a été conçue en 2004 et nous souhaitons revoir et moderniser certains systèmes, de sorte à améliorer le confort thermique et à évaluer le bilan zéro-énergie annuel et horaire du bâtiment. Le présent chapitre décrit ces mises à jour.

3.5.2. CHAUFFAGE : PAC et émetteurs

Pour établir notre bilan Q-ZEN et revoir le système de production et d'émission de chaleur, nous considérons l'installation d'une pompe à chaleur (PAC) air-eau et de ventilo-convecteurs qui assureront la distribution de la chaleur dans chaque pièce de la maison. Nous considérons un régime à 35°C, qui nous permet d'obtenir de meilleurs coefficients de performance (COP).

Nous devons déterminer la puissance maximale pour le dimensionnement de la PAC. En hiver, notre simulation, illustrée Figure 44, nous renseigne une puissance maximale en hiver de 14,69 W/m², soit 2483 W pour les 169m². En considérant le pic de demande de chaleur demandé un matin d'octobre après une nuit de refroidissement par ventilation naturelle, nous pouvons atteindre 19,85 W/m², soit 3355 W pour les 169m². Dans l'étude de DE MEESTER, il nous est reporté que la puissance du poêle à pellet peut varier de 2,5 kW à 10 kW, mais la tendance des hivers à se réchauffer et nos simulations nous montrent que, sur base de simulation horaire, cette puissance dépasse les besoins.



Point de fonctionnement	W	°C	35							
A	°C		-15	-7	2	7	10	20	30	
Puissance calorifique	kW		5,20	6,60	5,60	8,38	8,50	9,90	11,80	
Puissance électr. absorbée	kW		2,53	2,68	1,73	1,93	1,91	1,90	1,86	
Coefficient de performance ε (COP)			2,06	2,49	3,50	4,35	4,48	5,19	6,31	

Figure 42 : COP de la PAC en fonction de la température extérieure (donnée de référence)

Dans le délai de temps pour réaliser ce travail, nous considérons une pompe à chaleur issue des données du cours de Physique du Bâtiment dispensé par Prof. Philippe ANDRÉ et pour laquelle nous avons le profil du COP en fonction de la température extérieure et du régime de température considéré, illustré Figure 42. Nous avons encodé ce profil dans TRNSYS, et nous obtenons alors l'évolution annuelle du COP, illustré Figure 43. La PAC est de la marque Viessmann, il s'agit de la Vitocal

222-S type AWT 221.A07, toutes les caractéristiques techniques sont reportées dans l'Annexe 8 : Fiche technique de la PAC.

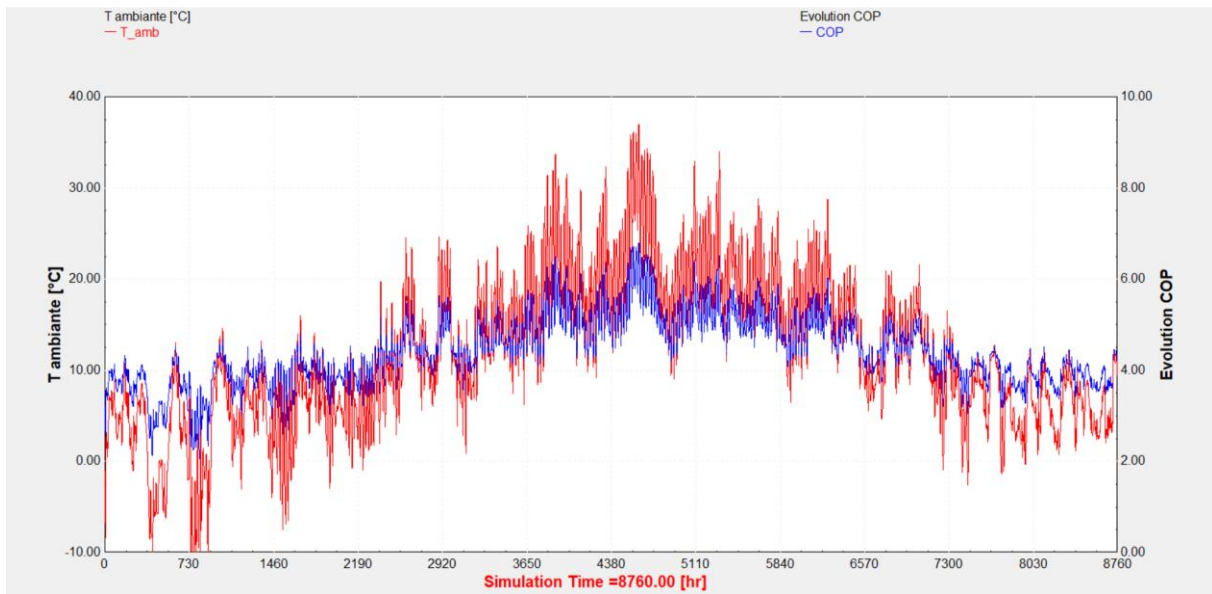


Figure 43 : Évolution annuelle du COP dans TRNSYS

L'important pour notre bilan Q-ZEN est de connaître la puissance électrique absorbée par l'appareil. Pour cela, nous nous basons sur la définition du coefficient de performance d'une pompe à chaleur :

$$COP = \frac{Q}{W_{el}}$$

Équation 9 : Définition du COP

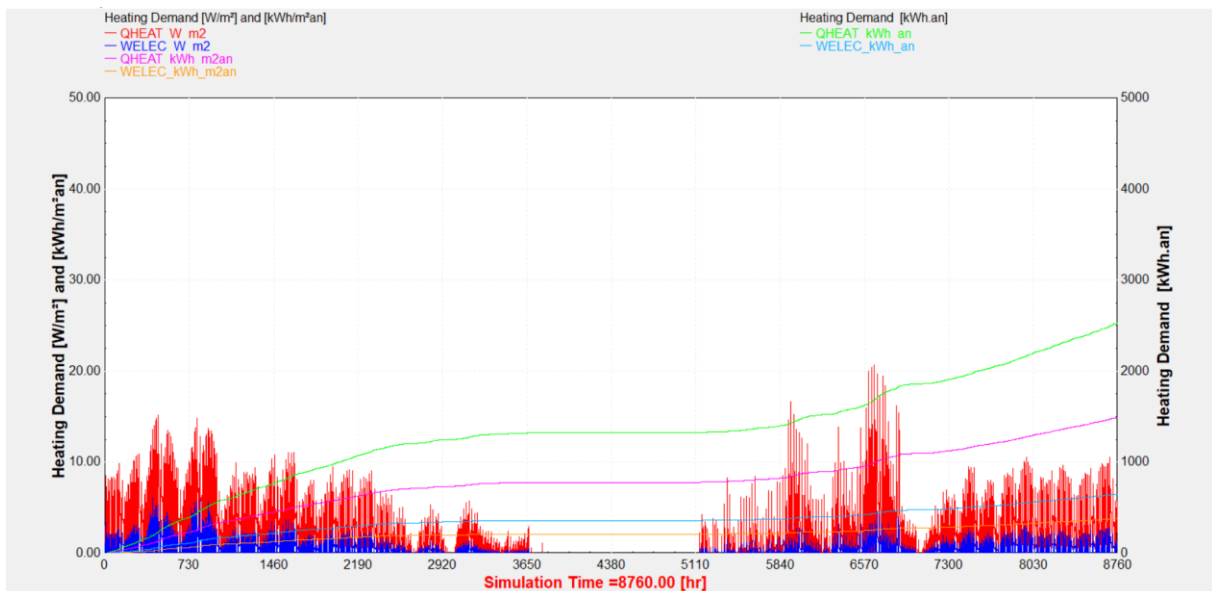


Figure 44 : Demande de chaleur et demande électrique pour la PAC horaires et annuelles

Nous obtenons un besoin de chauffage annuel de 2531 kWh.an (14,96 kWh/m².an), converti en besoin électrique de 653,3 kWh.an (3,86 kWh/m².an – COP moyen annuel de 3,87). Ces résultats sont visibles sur les courbes de la Figure 44, et correspondent simplement au cumul des besoins horaires (besoins intégrés).

3.5.3. PANNEAUX PHOTOVOLTAIQUES (Q-ZEN)

Initialement, la maison n'était pas équipée de panneaux photovoltaïques, uniquement 6m² de panneaux solaires pour l'ECS. Dans leur travail de 2020, ATTIA et GOBIN considèrent des panneaux photovoltaïques, sans en préciser le nombre ni la puissance crête, et posent l'hypothèse que le bâtiment est quasi zéro-énergie.

Dans ce travail, nous allons déterminer le potentiel maximum de la maison en termes de production électrique (si toute la toiture était couverte de panneaux), puis le nombre de panneaux nécessaires à l'obtention d'un bilan annuel nul.

Nous considérons le modèle monocristallin NU-RC300 de panneau photovoltaïque de la marque SHARP (Annexe 9 : Fiche technique des panneaux photovoltaïques), qui mesure 990mm par 1660mm (1,6434m²) pour une puissance crête de 300W et un rendement de 18,3% (valeurs sous conditions de tests standardisées).

Le Tableau 18 synthétise le potentiel de production électrique de la toiture, calculé par rapport aux surfaces de toiture disponibles et estimé par simulation TRNSYS. Nous considérons une distance entre le panneau et les rives latérales d'au moins 50cm, et une distance entre le panneau et les rives inférieures et supérieures d'au moins 30cm.

		TOITURE OUEST	TOITURE EST 1	TOITURE EST 2	TOTAL
largeur	[m]	9,9	9,9	9	
nbre de panneaux possible		9	9	8	
longueur	[m]	5,5	5,5	4,64	
nbre de panneaux possible		3	3	2	
inclinaison	[°]	35	35	35	
panneaux solaires		- 4 (6m ² solaire)			
nbre total possible		23	27	16	66
surface totale	[m ²]	37,80	44,37	26,29	108,46
production annuelle	[kWh.an]	5343	6296	3731	15370

Tableau 18 : Potentiel de production électrique photovoltaïque de la toiture

On remarque que le potentiel total de 15370 kWh.an dépasse largement les besoins électriques totaux de la maison, qui sont de 4609,8 kWh.an. Le Tableau 19 illustre l'obtention de l'optimum du nombre de panneaux au regard du bilan Q-ZEN, soit 20 panneaux pour 4646 kWh.an.

		TOITURE OUEST			
nbre total		23	19	20	21
surface totale	[m ²]	37,80	31,22	32,87	34,51
production annuelle	[kWh.an]	5343	4414	4646	4878

Tableau 19 : Production électrique photovoltaïque optimale

Le Tableau 20 synthétise le bilan Q-ZEN annuel avec d'une part le maximum de panneaux photovoltaïques possible, et d'autre part l'optimum considéré à 20 panneaux.

	[kWh.an]	[kWh/m².an]	
BESOINS			
Chauffage	2531,0	14,96	
Chauffage (PAC)	653,3	3,86	
ECS (résiduelle)	665,5		
Électricité	3291		
TOT	4609,8		
PRODUCTION			BILAN
Potentiel (108 m²)	15370		10760,2
Optimum : 32,9 m²	4646		36,2

Tableau 20 : Bilan Q-ZEN annuel potentiel maximum et optimum

3.5.4. BATTERIE ÉLECTRIQUE

Aussi, pour l'étude du bilan Q-ZEN sur base horaire, nous étudions l'impact d'une batterie. Nous faisons l'hypothèse d'une batterie domestique classique, d'une capacité (SOC (State Of Charge) maximum) de 10 kWh, déchargeable jusqu'à 1 kWh (SOC minimum) et d'efficacité de chargement de 90%. La puissance maximale de charge et de décharge est de 5 kW.

3.5.5. INDICATEURS BILAN Q-ZEN

Nous considérons deux indicateurs de bilan Q-ZEN.

Annuellement, le bilan est exprimé en kWh, avec un bilan positif en cas de surplus d'énergie produite, négatif si on doit importer de l'énergie du réseau.

$$Bilan_{annuel} = \sum_{h=1}^{8760} (E_{prod,h} - E_{cons,h})$$

Équation 10 : Bilan annuel Q-ZEN

Un autre indicateur simulé est la dépendance au réseau du bâtiment, soit le « pourcentage d'heures négatives », en d'autres termes la proportion d'heures sur une année pendant lesquelles le bâtiment est directement dépendant du réseau, parce que la production électrique instantanée des panneaux photovoltaïques est nulle et que la batterie (si une batterie est considérée) est vide.

$$\%_{heures\ négatives} = \frac{\sum_{h=1}^{8760} \theta_h}{8760}$$

Avec

$$\theta_h = \begin{cases} 1 & \text{si } E_{grid,import,h} > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Où

$$E_{grid,import,h} = E_{cons,h} - E_{prod,h} - E_{batterie,disp,h}$$

Équation 11 : Dépendance au réseau du bâtiment (Bilan annuel de pas de temps horaire et indicateurs)

L'énergie de la batterie disponible à l'heure h est limitée par sa puissance de décharge maximale (5 kW) et son SOC (borné entre 0,1 et 1).

3.6. SIMULATION SURCHAUFFE

3.6.1. INTRODUCTION

Cette étude s'intègre dans une succession de travaux concernant la maison Kettenis. L'objectif de ce travail est de comparer les résultats précédemment obtenus avec le logiciel DesignBuilder à ceux obtenus avec TRNSYS et d'évaluer, en plus du potentiel de la ventilation naturelle nocturne comme solution de refroidissement passif, le potentiel de la masse thermique comme stratégie de dissipation de la chaleur, seule ou combinée à la ventilation nocturne, et l'évolution de ces potentiels dans le temps, impactés par le changement climatique.

3.6.2. VARIABLE : VENTILATION NATURELLE

La première variable de ce travail est la ventilation naturelle du bâtiment. Nous souhaitons réévaluer le potentiel du refroidissement par ventilation avec notre modèle TRNSYS et ainsi le comparer aux résultats obtenus dans les études précédentes. Aussi nous voulons évaluer le potentiel de la masse thermique du bâtiment sur la surchauffe, il est dès lors intéressant d'étudier la variation de la masse thermique seule mais combinée à différents régimes de ventilation.

Dans son étude de 2020, FANI étudie le rafraîchissement libre (« free cooling »). D'une part, il s'agit d'une ventilation mécanique intensive et d'autre part de rafraîchissement naturel nocturne (« night-cooling »). Concernant la valeur des débits, il se réfère au site EnergiePlus. Il y est expliqué que pour la conception, on considère 4 AC/h, mais qu'on rencontre généralement 8 AC/h, valeur alors considérée. Pour la ventilation mécanique, il limite le débit atteignable [mécaniquement] à 2 AC/h. FANI ne précise pas les horaires ni à quelles conditions il enclenche ces débits, mais nous pouvons comprendre qu'il considère 2 AC/h de ventilation mécanique intensive diurne, et 8 AC/h de ventilation naturelle nocturne. Toutefois, considérer une ventilation mécanique intensive peut porter préjudice au refroidissement du bâtiment, car si elle permet en journée d'évacuer les gains internes et d'assurer une qualité d'air, surventiler le bâtiment avec de l'air extérieur plus chaud que l'air intérieur risque de réchauffer le bâtiment plutôt que de le rafraîchir, tout en dégradant l'efficacité du night-cooling. Par rapport à ce risque, FANI ne mentionne pas de condition dans l'utilisation de la ventilation mécanique diurne.

Dans leur étude (Rahif *et al.*, 2021), RAHIF *et al.* considèrent un régime minimum hygiénique de 0,9 L/s.m² (équivalent à 3,24 m³/h.m²) et un régime maximum de 5 AC/h dans les chambres et 8 AC/h pour les zones de vie. Il est à comprendre que le régime maximum, au vu de ses taux de renouvellements élevés, est un régime de rafraîchissement naturel nocturne (« night-cooling »). Nous pouvons supposer que dans ce travail seul le night-cooling est étudié, sans ventilation mécanique diurne.

Dans notre étude, nous considérons les mêmes régimes que ceux étudiés dans le travail de RAHIF. D'une part, un régime de ventilation minimum hygiénique de 0,9 L/sm² (équivalent à 3,24 m³/hm²). D'autre part, un régime de ventilation maximum à hauteur de 5 AC/h dans les chambres et 8 AC/h pour les zones de vie en période nocturne (de 23h00 à 07h00 – horaire conservatif et qui correspond à l'occupation des chambres), complété par le débit minimum hygiénique en journée.

3.6.3. VARIABLE : INERTIE THERMIQUE

Pour définir les différents niveaux d'inertie thermique, la méthode wallonne PEB se base sur une approche simplifiée. Cette approche est suffisamment précise au regard des hypothèses de la simulation PEB et du caractère quasi-statique mensuel du logiciel, mais ce travail est fondé sur un outil de simulation dynamique transitoire. Il est dès lors préférable d'utiliser la méthode détaillée de la norme NBN EN ISO 13786 (*NBN EN ISO 13786:2017 - EN*, 2018). Cette norme porte sur la *Performance thermique des composants de bâtiment – Caractéristiques thermiques dynamiques – Méthodes de calcul*. Elle définit 3 inerties :

- Quotidienne (période de $1j = 86400s$) : elle caractérise l'amortissement de l'onde quotidienne de température et d'ensoleillement en période estivale, mais elle caractérise aussi le taux de récupération des apports de chaleur en hiver ;
- Séquentielle (période de $14j = 1\,209\,600s$) : elle caractérise l'amortissement de l'onde séquentielle de température, lors d'évènements de vague de chaleur en période estivale ;
- Annuelle (période de $365j = 31\,536\,000s$) : elle caractérise l'amortissement de l'onde annuelle de température.

Chaque inertie correspond à un phénomène physique différent, et l'approche détaillée tient mieux compte des effets transitoires que l'approche simplifiée « par la masse utile » (« masse utile » = limitée à $150kg/m^2$). En effet, les couches les plus proches de la surface d'échange sont plus actives que les couches situées en profondeur, les différentes couches ne sont donc pas thermiquement sollicitées uniformément. Ainsi, le phénomène transitoire dépend de la profondeur de pénétration de l'onde thermique, et cette profondeur peut être d'autant plus importante que la période considérée l'est. Cela signifie que pour l'inertie quotidienne, l'épaisseur efficace maximale ne sera que de quelques centimètres, alors que pour l'inertie annuelle, cette épaisseur efficace peut être beaucoup plus importante.

En outre, la caractérisation de l'inertie du bâtiment dépend des propriétés intrinsèques de ses parois, mais aussi de la répartition des surfaces d'échange avec les locaux. À « masse utile » égale, un local pour lequel les caractéristiques thermiques des parois sont uniformes sera plus efficace que s'il est composé de parois aux caractéristiques thermiques hétérogènes, bien que le bilan global de ces deux répartitions différentes soit égal (*NBN EN ISO 13786:2017 - EN*, 2018). Il est donc important de caractériser l'inertie en fonction des proportions des différents types de parois par rapport à la surface du local.

Dans notre travail, nous voulons évaluer le potentiel de l'inertie thermique comme stratégie de dissipation de la chaleur et de diminution de la surchauffe, combinée à la stratégie de refroidissement passive par ventilation nocturne. Dès lors, l'important est de caractériser la masse thermique du bâtiment selon l'inertie quotidienne. En effet, la combinaison « night-cooling + inertie thermique » est une stratégie basée sur un cycle de 24h, pour lequel la masse du bâtiment permet un déphasage en se chargeant thermiquement pendant la journée, en absorbant les gains solaires et les gains internes, puis l'accumulation thermique dans la masse est évacuée la nuit. L'inertie séquentielle peut jouer un rôle en cas de vague de chaleur sur plusieurs jours, pour des canicules prolongées ou en cas de mauvais rafraîchissement nocturne, mais elle n'est pas la stratégie prédominante envisagée dans cette étude.

L'inertie quotidienne est donc le mécanisme prépondérant de cette étude et c'est elle qui gouverne la capacité du bâtiment à amortir les gains internes et solaires sur un cycle journalier et à exploiter efficacement le night-cooling. Il convient donc de caractériser nos variantes d'inertie thermiques sur le critère quotidien. L'inertie séquentielle n'est donc pas directement caractérisée pour établir nos

variantes, mais elle est évidemment prise en compte dans la simulation dynamique par le logiciel TRNSYS.

L'inertie annuelle ne répond pas aux besoins de cette étude puisqu'elle permet plutôt l'équilibre des besoins annuels de chauffage, pour une évolution lente des températures de sol ou de structures très lourdes.

Nous appliquons la méthode de détermination de l'inertie par le calcul selon la norme EN ISO 13786, précisément le calcul détaillé de la capacité thermique quotidienne pour établir nos 3 variantes :

- très léger (t.lég.) ;
- Lourd (L.) ;
- Très Lourd (T.L.).

Notre bâtiment de départ est un bâtiment très léger à ossature bois, il n'a pour ainsi dire aucune inertie thermique. Pour simuler un bâtiment lourd et très lourd, nous considérons l'ajout d'une couche de béton, d'épaisseur variable, entre l'ambiance intérieure et le reste de la composition des parois. Dans la réalité, une inertie plus importante serait obtenue avec des changements de compositions de parois, comme la substitution des cloisons intérieures par des éléments de béton, les planchers par des dalles coulées ou des hourdis, les murs extérieurs par l'ajout de galettes d'argile côté intérieur. Pour notre modélisation, l'objectif est de déterminer l'épaisseur de cette couche de béton et la position de ces couches dans le bâtiment pour atteindre des niveaux d'inertie quotidienne supérieurs et répondant aux classes « lourdes » et « très lourdes ».

Les termes à évaluer selon la méthode sont définis et calculés successivement dans la suite de cette section.

L'épaisseur efficace :

$$d_T = \min(e_{int.-isol.} ; d_{Tmax})$$

Équation 12 : Épaisseur efficace

Où $e_{int.-isol.}$ est l'épaisseur des matériaux compris entre la face intérieure et la couche d'isolant ou la première lame d'air. Il s'agit précisément du paramètre que nous allons faire varier pour définir nos niveaux d'inertie quotidienne. d_{Tmax} est l'épaisseur efficace maximale. Il s'agit de la valeur maximale à partir de laquelle l'ajout de masse n'a plus d'influence sur l'inertie quotidienne. Cette épaisseur efficace maximale se définit comme :

$$d_{Tmax}[m] = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T}{\rho \cdot C \cdot 2\pi}} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot T}{2\pi}}$$

Équation 13 : Épaisseur maximale efficace

En considérant l'ajout de couches de béton, nous évaluons $d_{Tmax} = 107\text{mm}$ avec une diffusivité thermique du béton $\alpha = 8.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ évaluée avec une masse volumique $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$, une conductivité thermique $\lambda = 2 \text{ W/mK}$ et une chaleur spécifique $C = 1000 \text{ J/kgK}$, pour une période de 24h $T = 86\,400\text{s}$.

La capacité thermique quotidienne du bâtiment est retenue comme étant égale à la capacité du niveau le plus défavorisé. La capacité thermique quotidienne de chaque niveau est définie comme :

$$C_{mq}[kJ/K] = \sum_{i=1}^Z A_i \chi_{ji}$$

Où i est le compteur de zone, Z le nombre de zone total du niveau, A_i la surface de la paroi et χ_{ji} la capacité thermique surfacique quotidienne (j pour quotidien) de la paroi i , évaluée avec la méthode de l'approximation de la couche mince comme :

$$\chi_{ji} [kJ/m^2K] = \rho \cdot C \cdot e$$

La surface d'échange équivalente des parois opaques avec l'ambiance au sens de l'inertie quotidienne est, elle, définie comme :

$$A_{mq} = \frac{(\sum_{i=1}^Z A_i \chi_{ji})^2}{\sum_{i=1}^Z A_i \chi_{ji}^2}$$

Finalement, sur base des rapports A_{mq}/A_{niv} et C_{mq}/A_{niv} , nous pouvons déterminer l'inertie thermique quotidienne de chaque niveau dans le Tableau 21 :

I_{nq}	C_{mq}/A_{niv} (kJ/m ² K)									
A_{mq} / A_{niv}	80 à 109	110 à 164	165 à 219	220 à 259	260 à 309	310 à 329	330 à 349	350 à 369	370 à 499	500 et plus
1,0 à 1,4	t. lég.	t. lég.	t. lég.	t. lég.	légère.	légère.	légère.	légère.	légère.	légère.
1,5 à 1,9	t. lég.	t. lég.	légère	moy.	moy.	moy.	moy.	moy.	moy.	moy.
2,0 à 2,4	t. lég.	légère.	moy.	moy.	moy.	moy.	moy.	L	L	L
2,5 à 2,9	t. lég.	légère	moy.	moy.	L	L	L	L	L	L
3,0 à 3,4	t. lég.	légère	moy.	L	L	L	L	L	L	T L
3,5 à 3,9	t. lég.	légère	moy.	L	L	L	L	L	T L	T L
4,0 à 4,4	t. lég.	légère	moy.	L	L	L	L	T L	T L	T L
4,5 à 4,9	t. lég.	légère	moy.	L	L	L	T L	T L	T L	T L
5,0 et plus	t. lég.	légère	moy.	L	L	T L	T L	T L	T L	T L

Tableau 21 : Classe d'inertie quotidienne d'un niveau de bâtiment déterminée par le calcul (NBN EN ISO 13786)

	Surfaces [m ²]					
ZONES	MUR EXT	MUR INT	PLANCHER RDC	PLANCHER R+1	PLANCHER R+2	TOIT
CUISINE	23,84	12,51	17,87	17,87		
SALON	25,91	8,16	20,97	20,97		
SAM	19,9		17,69	17,69		
WC	11,24	11,49	3,23	3,23		
ENTREE	6,62	16,22	6,45	6,45		
CORRIDOR		14,05	7,3	7,3		
LT1	8,03	24,34	6,6	6,6		
ESC	9,42	38,16	9	3,82	9,56	3,98
CH1	15,51	21,94		17,87	11,4	7,89
CH2	15,45	21,83		17,69	11,28	7,81
CH3	15,45	21,83		17,69	11,28	7,81
LT2	4,68	20,22		7,77	2,88	5,97
SDB	13,95	24,64		15,28	10,44	5,91
	Proportion Vert.	Proportion Vert.	Proportion Horiz.	Proportion Horiz.	Proportion Horiz.	Proportion Vert.
	38%	53%	29%	52%	19%	9%

Tableau 22 : Surfaces de notre cas d'étude

Le Tableau 22 répertorie les surfaces de notre bâtiment. Par la méthode détaillée de la norme NBN EN ISO 13786, nous définissons alors nos deux nouvelles variantes de classe d'inertie quotidienne, à savoir « Lourde » et « Très Lourde », du Tableau 23 et du Tableau 24:

Inertie thermique quotidienne : Lourde (L.)						
	MUR EXT	MUR INT	PLANCHER RDC	PLANCHER R+1	PLANCHER R+2	TOIT
$d \tau$ (béton)	20mm	20mm	50mm	20mm	20mm	20mm
	$Cmq = \sum A_i \times \chi_{ji}$	A niveau	Amq	Amq / A_{niv}	Cmq / A_{niv}	I_{nq}
niveau 0	23515,44	89	291,25	3,3	264	L
niveau 1	18945,60	80	414,75	5,2	236	L

Tableau 23 : Modifications de notre cas d'étude pour la variable « Lourde »

Inertie thermique quotidienne : Très Lourde (T.L.)						
	MUR EXT	MUR INT	PLANCHER RDC	PLANCHER R+1	PLANCHER R+2	TOIT
$d \tau$ (béton)	50mm	50mm	50mm	20mm	20mm	0mm
	$Cmq = \sum A_i \times \chi_{ji}$	A niveau	Amq	Amq / A_{niv}	Cmq / A_{niv}	I_{nq}
niveau 0	36980,88	89	328,68	3,7	415	TL
niveau 1	32778,48	80	337,31	4,2	409	TL

Tableau 24 : Modifications de notre cas d'étude pour la variable « Très Lourde »

3.6.4. VARIABLE : DATA METEO

Pour la variation des conditions climatiques, nous utilisons les données MAR (Modèle Atmosphérique Régional) développées par le Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie de l'Université de Liège.

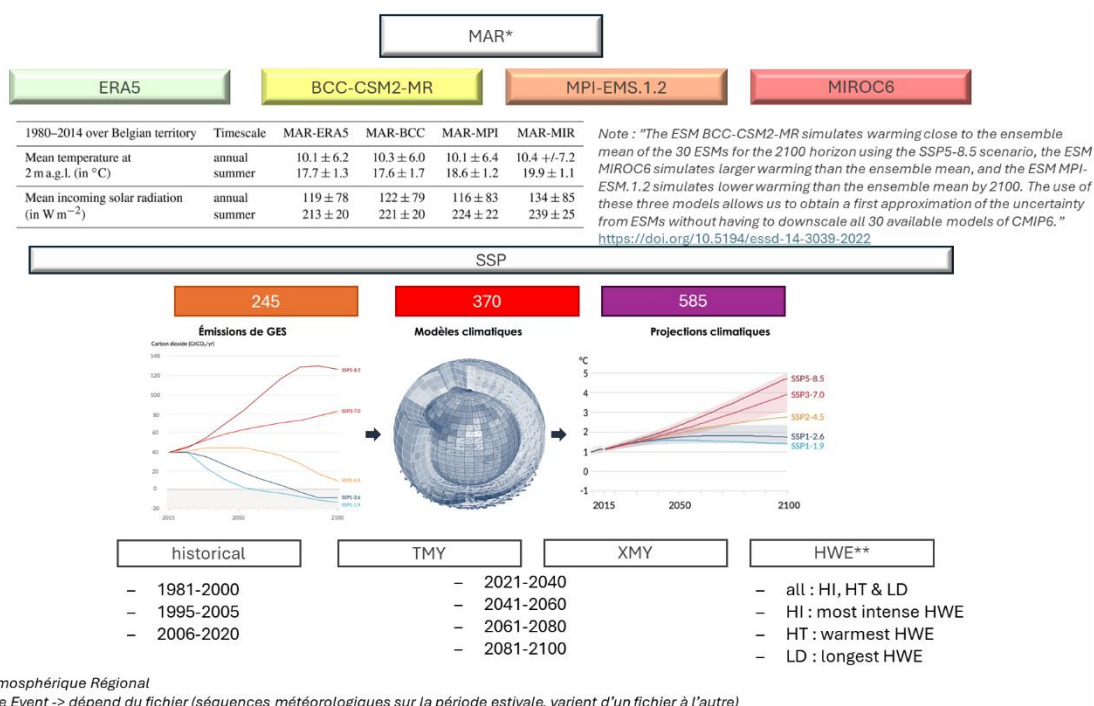


Figure 45 : Explications des données météorologiques et climatiques (Laboratoire de Climatologie de l'Université de Liège)

Comme expliqué dans la partie calibrage, nous utilisons les projections basées sur le Modèle du Système Terrestre MIROC6, qui définit les conditions aux limites utilisées pour le MAR. Ce modèle est un modèle climatique global, d'une résolution de 100km et qui simule la circulation atmosphérique,

les échanges entre les océans et l’atmosphère, les bilans radiatifs et l’évolution des températures, des précipitations et du vent.

Le modèle MIROC est basé sur des scénarios socio-économiques, « Shared Socioeconomic Pathways » (SSP), définis par le GIEC pour explorer différentes trajectoires possibles d’évolution de l’humanité. Ces scénarios tiennent compte de la croissance démographique, du développement économique, des politiques climatiques, des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre.

Pour nos simulations, nous considérons principalement le SSP3-7.0, qui est un scénario intermédiaire, pour lequel le monde est fragmenté, la coopération internationale limitée et la transition énergétique lente. Nous considérons aussi un SSP5-8.5 pour la projection 2085-2100, qui est un scénario pessimiste basé sur un scénario très émissif. Il nous permettra d’évaluer notre bâtiment sous des conditions plus extrêmes.

La Figure 45 illustre le développement des données météorologiques et climatiques MAR du Laboratoire de Climatologie de l’Université de Liège.

Les 4 scénarios retenus pour les conditions climatiques et météorologiques sont repris dans le Tableau 25 :

CLIMAT	AWD
AWD (TMY2001_2020_ssp370)	3,657
AWD (TMY2041_2060_ssp370)	4,306
AWD (TMY2085_2100_ssp370)	5,773
AWD (TMY2085_2100_ssp585)	6,444

Tableau 25 : Scénarios climatiques envisagés comme variable de notre étude

3.6.5. INDICATEURS DE SURCHAUFFE

Les indicateurs de ce travail sont issus de l’étude (Hamdy *et al.*, 2017). Ces indicateurs sont la traduction d’une méthodologie globale qui permet de (1) quantifier l’impact du changement climatique sur le risque surchauffe, (2) caractériser et classer des bâtiments par rapport à leur risque de surchauffe et leur résilience face au changement climatique, et (3) évaluer les potentiels de stratégie de refroidissement et de mitigation de la chaleur. Dans la suite de ce point sont présentés les indicateurs issus de cette étude.

Le *Indoor Overheating Degree* (IOD), qui est un indicateur de surchauffe qui permet de définir les limites de confort thermique pour chaque zone de façon distincte. Ainsi, il permet de tenir compte du comportement des occupants et des opportunités d’adaptation, *i.e.* nous pouvons définir un critère de confort statique dans une zone et un critère de confort adaptatif dans une autre, puis évaluer la surchauffe globale du bâtiment en ayant donc caractérisé chaque zone spécifiquement. L’indicateur tient compte de l’intensité et de la fréquence de la surchauffe (« degré-heure »). L’indicateur est exprimé comme :

$$IOD [^{\circ}C] \equiv \frac{\sum_{Z=1}^Z \sum_{i=1}^{N_{occ}(Z)} \left[(T_{fr,i,Z} - T_{L_{comf,i,Z}})^+ \cdot t_{i,Z} \right]}{\sum_{Z=1}^Z \sum_{i=1}^{N_{occ}(Z)} t_{i,Z}}$$

Équation 17 : Indoor Overheating Degree (IOD)

Où z est le compteur de zone, i le compteur de temps, t le pas de temps (ici 1h), Z le nombre total de zones, $N_{occ(z)}$ le nombre total d'heures occupées, T_{fr} la température opérative de la zone au temps i de la zone z , et TL_{conf} la limite de confort thermique au temps i dans la zone z .

Le *Ambient Warmness Degree* (AWD), qui exprime la sévérité du climat extérieur par rapport à une température définie (ici, 18°C) à partir de laquelle le bâtiment va nécessiter un moyen de refroidissement :

$$AWD_{18^{\circ}C} [^{\circ}C] \equiv \frac{\sum_{i=1}^N [(T_{a,i} - T_b)^+ \cdot t_i]}{\sum_{i=1}^N t_i}$$

Équation 18 : *Ambient Warmness Degree* (AWD)

Où T_a est la température de l'air extérieur du bulbe sec, T_b la température de base définie à 18°C, N le nombre d'heures pendant lesquelles le bâtiment est occupé et où $T_{a,i} > T_b$, et t le pas de temps (ici 1h).

Le *Overheating Escalation Factor* (α_{IOD}), aussi appelé le *Building Climate Vulnerability Factor* (BCVF), qui est la pente de la droite de régression, en assumant une relation linéaire entre le IOD et le AWD. La valeur de la pente caractérise la vulnérabilité du bâtiment face au changement climatique. Si cette pente est supérieure à l'unité (BCVF > 1), alors les conditions thermiques à l'intérieur du bâtiment empirent. Si cette pente est inférieure à l'unité (BCVF < 1), alors le bâtiment est capable de supprimer une partie du stress thermique extérieur auquel il est exposé. Cette pente est exprimée par :

$$\alpha_{IOD} = BCVF = \frac{IOD}{AWD_{18^{\circ}C}}$$

Équation 19 : *Overheating Escalation Factor* (α_{IOD})

La *Contribution de la ventilation* définie comme :

$$C_{ventilation} [^{\circ}C] \equiv IOD_{\min ventilation rate} - IOD_{\max ventilation rate}$$

Équation 20 : *Contribution de la ventilation*

Et le *Potentiel de la ventilation*, qui est la contribution de la ventilation normalisée par rapport à l'IOD obtenu avec la ventilation au débit minimum :

$$P_{ventilation} \equiv \frac{C_{ventilation}}{IOD_{\min ventilation rate}}$$

Équation 21 : *Potentiel de la ventilation*

De la même façon nous évaluerons la Contribution de la masse thermique et le Potentiel de la masse thermique, seule et combinée à la ventilation :

$$C_{Inertie Thermique} \equiv IOD_{t.lég.} - IOD_{T.L.}$$

Équation 22 : *Contribution de l'inertie thermique*

$$P_{Inertie Thermique} \equiv \frac{C_{Inertie Thermique}}{IOD_{t.lég.}}$$

Équation 23 : *Potentiel de l'inertie thermique*

Et

$$C_{M.T.+V.max} \equiv IOD_{t.lég.+Vmin} - IOD_{T.L.+V.max}$$

Équation 24 : Contribution de l'inertie thermique combinée à la ventilation

$$P_{M.T.+V.max} \equiv \frac{C_{M.T.+V.max}}{IOD_{t.lég.+Vmin}}$$

Équation 25 : Potentiel de l'inertie thermique combinée à la ventilation

Dans l'article, tous ces indicateurs sont évalués durant la période estivale, soit du 1^{er} mai (2880h) au 30 septembre (6528h). Cependant, notre étude montre que la maison est sujette à des épisodes de surchauffe aussi durant le mois d'octobre. Aussi, l'indice AWD est évalué pour une température TB de 14°C, similairement à l'étude de RAHIF, à cause du haut niveau d'isolation et du risque de surchauffe des maisons passives. Notre période d'évaluation s'étendra dès lors du 1^{er} mai (2880h) au 31 octobre (7296h). Les heures d'occupations des zones sont reprises conformément à l'article : les chambres sont occupées de 23h00 à 07h00 ; les zones de jour de 07h00 à 08h00 et de 18h00 à 23h00 en semaine, de 07h00 à 23h00 le week-end.

3.6.6. VARIABLE : CONFORT THERMIQUE

Les indicateurs utilisés dépendent fortement des modèles de confort considérés. L'IOD permet de combiner des modèles différents en fonction des zones puis de caractériser l'ensemble du bâtiment. Pour notre étude, nous allons évaluer la surchauffe selon deux types de confort thermiques, similairement à l'étude (Hamdy *et al.*, 2017).

D'abord, nous considérons un modèle de températures fixes « Fixed Temperature limits » (FTL). Ce modèle considère une température opérative limite de 26°C (25°C sont considérés par Hamdy *et al.*, mais la limite wallonne est plus élevée, (« Norme NBN EN 15251:2007 : Critères d'ambiance intérieure », 2007)) pour les pièces de jour, et une limite de 23°C pour les chambres.

Ensuite, nous considérons un modèle de températures adaptatives « Adaptive Temperature Limits » (ATL). Ce modèle considère une température opérative fixe de 26°C pour les chambres, basée sur le modèle de confort statique CIBSE Guide A. Il considère le modèle du confort adaptatif pour les zones de vie, soit la catégorie II de la EN 15251. Ce sont également les limites considérées par RAHIF *et al.*

En fonction du critère de surchauffe considéré, le même bâtiment peut être considéré comme sévèrement à risque de surchauffe (critère très strict), exprimé par le pourcentage de temps annuel pendant lequel la température seuil est dépassée, ou comme faiblement à risque de surchauffe (critère plus souple). C'est ainsi que les critères du confort adaptatif prédisent des risques de surchauffe moindres (Darteville *et al.*, 2022). Considérer un type de combinaison de modèle ou l'autre impacte donc significativement les résultats. Le LTF considère des limites de températures à partir desquelles le confort thermique physiologique commence à être compromis, alors que le ATL considère des seuils normatifs qui représentent des limites maximales au-delà desquelles il y a un réel inconfort.

L'étude (Okamoto-Mizuno et Mizuno, 2012) a analysé les effets de l'environnement thermiques sur le sommeil et a mis en lumière que la limite supérieure du confort physiologique nocturne est de 23°C, et qu'à partir de 24°C on remarque déjà une perturbation du sommeil significativement croissante. C'est pourquoi nous trouvons intéressant d'étudier la surchauffe d'une part avec des limites basées sur le confort adaptatif, mais aussi d'autre part une étude basée sur des limites fixes plus strictes à partir desquelles une diminution de l'inconfort peut déjà apparaître.

3.6.7. RÉSUMÉ DES VARIABLES ET COMBINAISONS

Les 48 combinaisons pour lesquelles la surchauffe est évaluée sont illustrées Figure 46 et les variables synthétisées dans le Tableau 26.

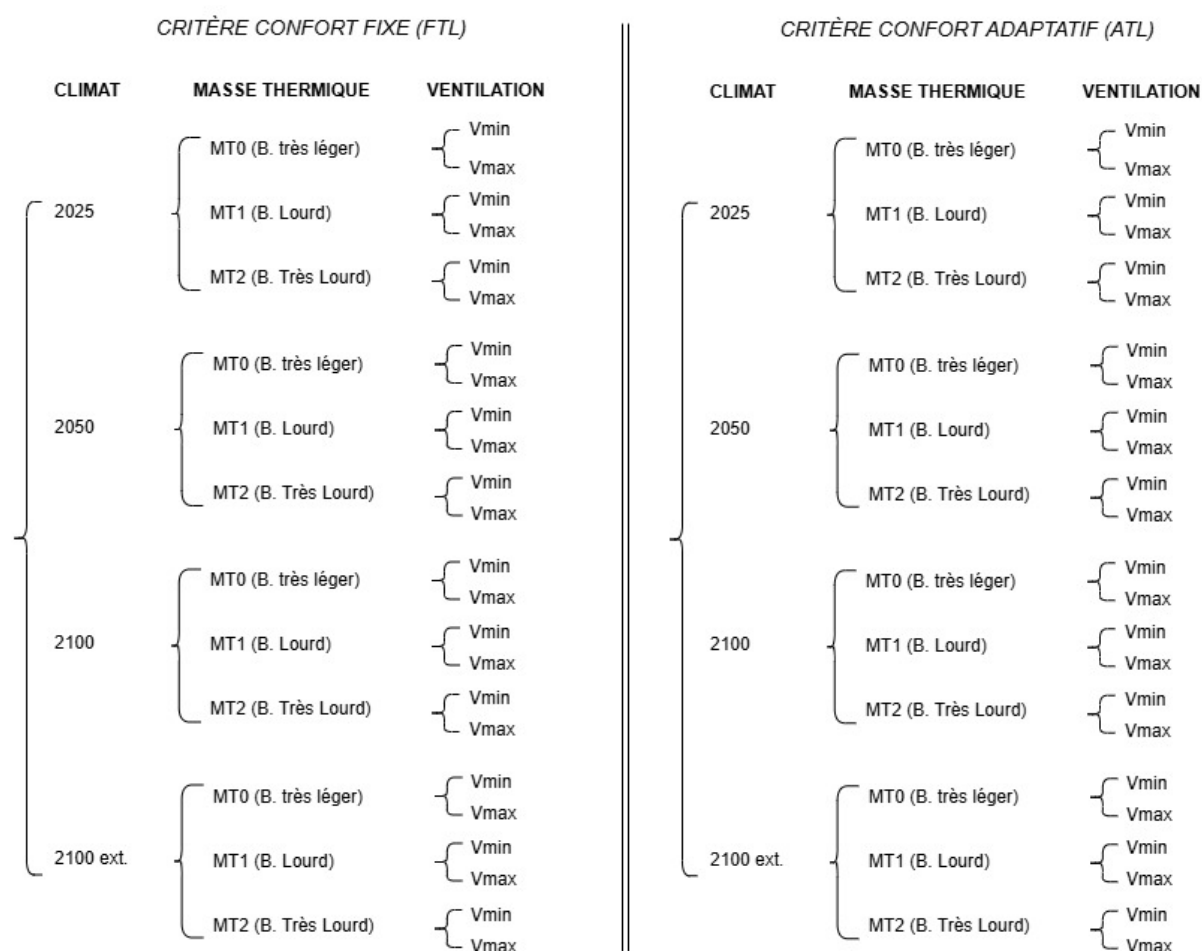


Figure 46 : Combinaisons des variables pour l'étude de la surchauffe

CONFORT	CLIMAT	INERTIE THERMIQUE	VENTILATION
<ul style="list-style-type: none"> • FTL $T_{OP} = 26^{\circ}\text{C}$ (liv.) & $T_{OP} = 23^{\circ}\text{C}$ (ch.) • ATL $T_{OP} = "a.T_{m} + b" ^{\circ}\text{C}$ (liv.) & $T_{OP} = 26^{\circ}\text{C}$ (ch.) 	<ul style="list-style-type: none"> • AWD (MAR-MIR_TMY2001_2020_ssp370) • AWD (MAR-MIR_TMY2041_2060_ssp370) • AWD (MAR-MIR_TMY2085_2100_ssp370) • AWD (MAR-MIR_TMY2085_2100_ssp585) 	<ul style="list-style-type: none"> • très léger (t.lég.) • Lourd (L.) • Très Lourd (T.L.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Vmin $0,9 \text{ L/sm}^2$ ($3,24 \text{ m}^3/\text{hm}^2$) • Vmax 5AC/h (ch.) & 8AC/h (liv.) par nightcooling

Tableau 26 : Synthèse des variables de l'étude de la surchauffe

4. RESULTATS

4.1. BILAN Q-ZEN

Annuellement, le bilan est assez simple : il vaut la différence entre l'énergie produite annuellement par les panneaux photovoltaïques et l'énergie consommée annuellement par la maison en chauffage, énergie auxiliaire pour l'eau chaude sanitaire, et l'électricité des électroménagers, comme décrit par l'Équation 10. La contribution de ces deux termes est illustrée Figure 47.

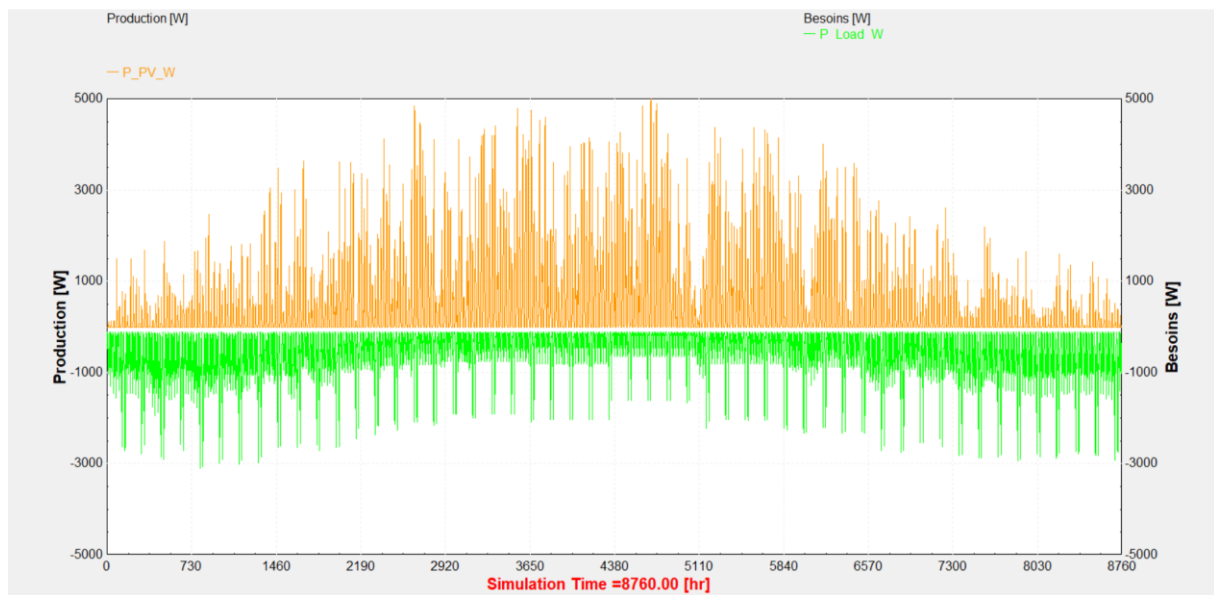


Figure 47 : Production (PV 32,89m²) vs Consommation électrique totale

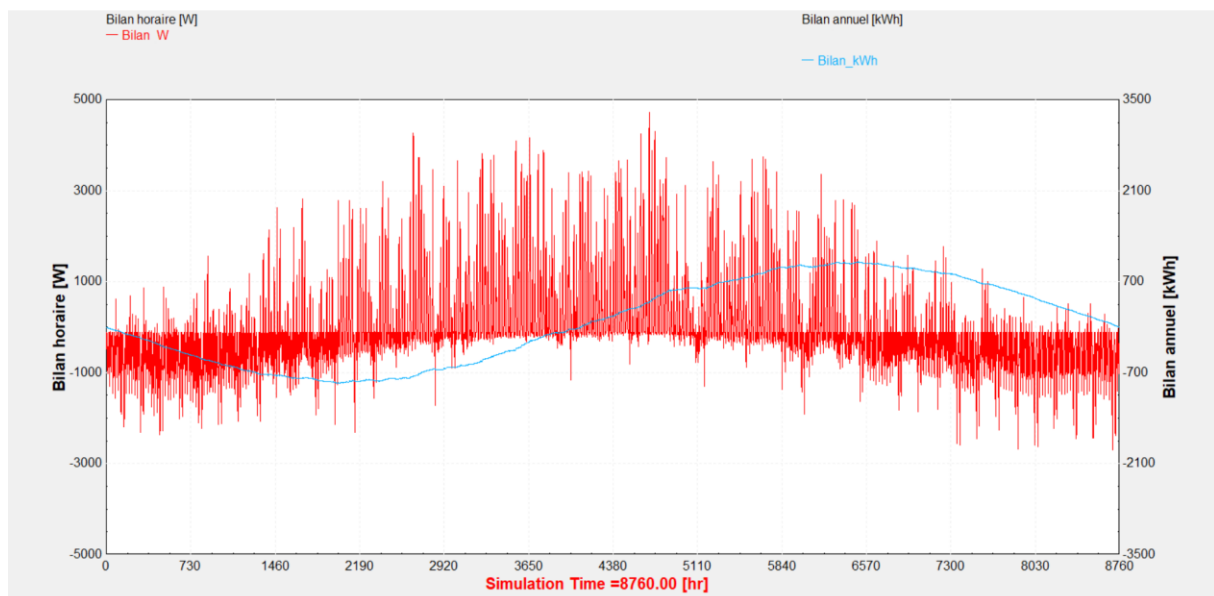


Figure 48 : Bilan annuel optimisé (PV 32,89m²)

Le bilan Q-ZEN est illustré Figure 48, il s'élève *in fine* à + 36,2kWh. En rouge sont représentés les bilans horaires, en bleu est tracé le bilan cumulé au cours de l'année : initialement négatif, la maison cumule une demande, puis cette demande annuelle décroît au début de l'été pour atteindre un bilan positif maximum aux 3/4 de l'année, pour enfin décroître et tendre vers le bilan quasi-zéro optimum calculé.

Pour un pas de temps horaire, sans batterie, la dépendance au réseau s'élève à 72,4% d'heures négatives, et le rejet de la production électrique vers le réseau atteint 58,7%. Cela signifie que pendant 72,4% du temps annuel, le bâtiment a besoin d'importer de l'énergie du réseau car elle n'est pas fournie par les panneaux photovoltaïques. *A contrario*, 58,7% de la quantité d'électricité produite survient à un moment où la demande est déjà satisfaite, et que le surplus est renvoyé vers le réseau. La Figure 49 illustre ces résultats.

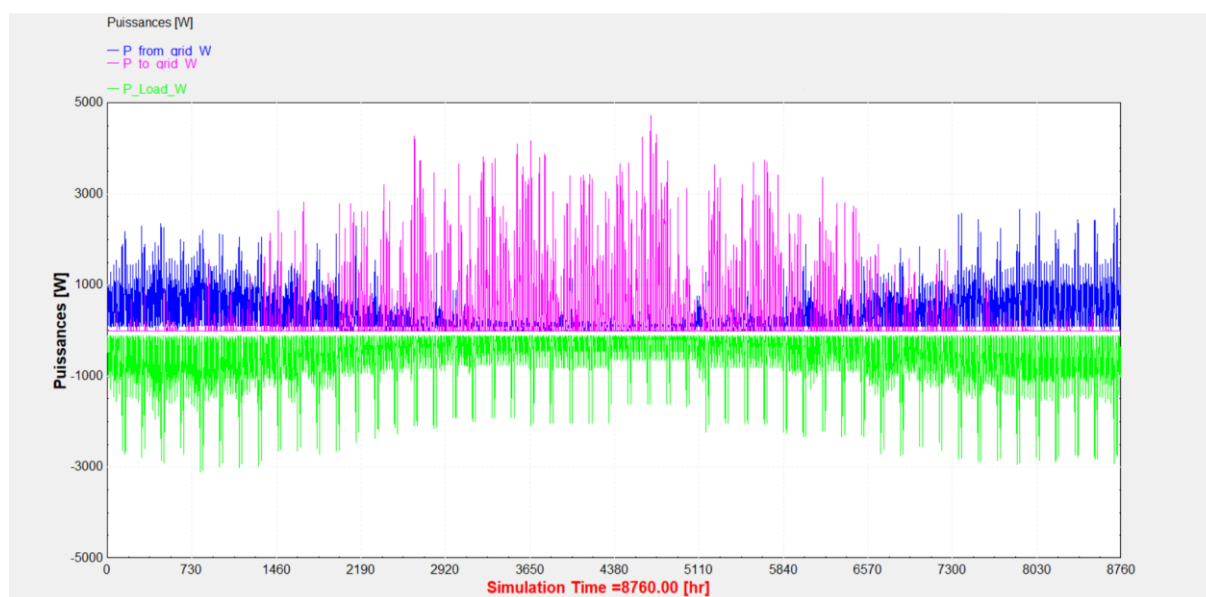


Figure 49 : Import et export depuis et vers le réseau électrique (PV 32,89m² - sans batterie)

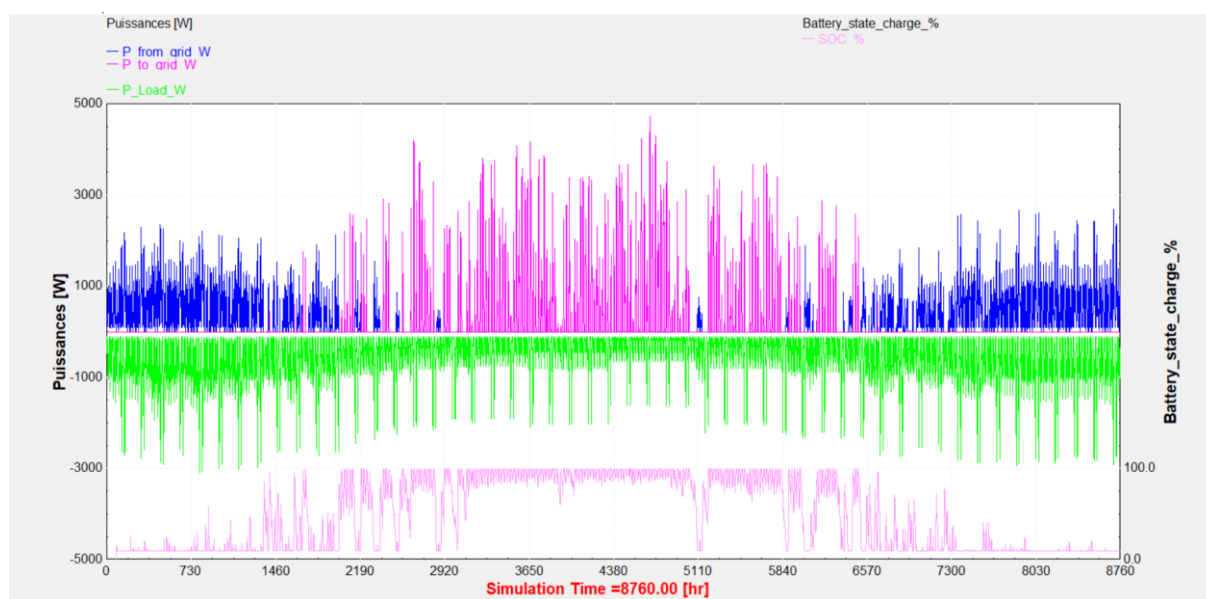


Figure 50 : Import et export depuis et vers le réseau électrique (PV 32,89m² - avec batterie)

Avec batterie, la dépendance au réseau chute à 39,8% d'heures négatives, et le rejet de la production électrique vers le réseau descend à 41,2%. Cela signifie que la batterie permet d'augmenter

l'autonomie du bâtiment de 32,9% et de réduire la quantité d'électricité produite et rejetée sur le réseau de 17,5%. La Figure 50 illustre ces résultats. La courbe rose clair représente l'état de charge de la batterie.

Pour évaluer le potentiel d'autonomie du bâtiment, nous avons réévalué ces indicateurs en considérant des panneaux photovoltaïques aussi sur la toiture « Est 1 », soit un total de 77,26m² de PV (soit grossièrement le double de la surface optimisée pour le bilan annuel).

Sans batterie, la dépendance au réseau s'élève à 61,1% d'heures négatives, et le rejet de la production électrique vers le réseau atteint 77,2%. Par rapport aux 32,89m² de PV sans batterie, l'autonomie s'améliore de 11,3% mais le rejet vers le réseau augmente de 18,5%. La Figure 51 illustre ces résultats.

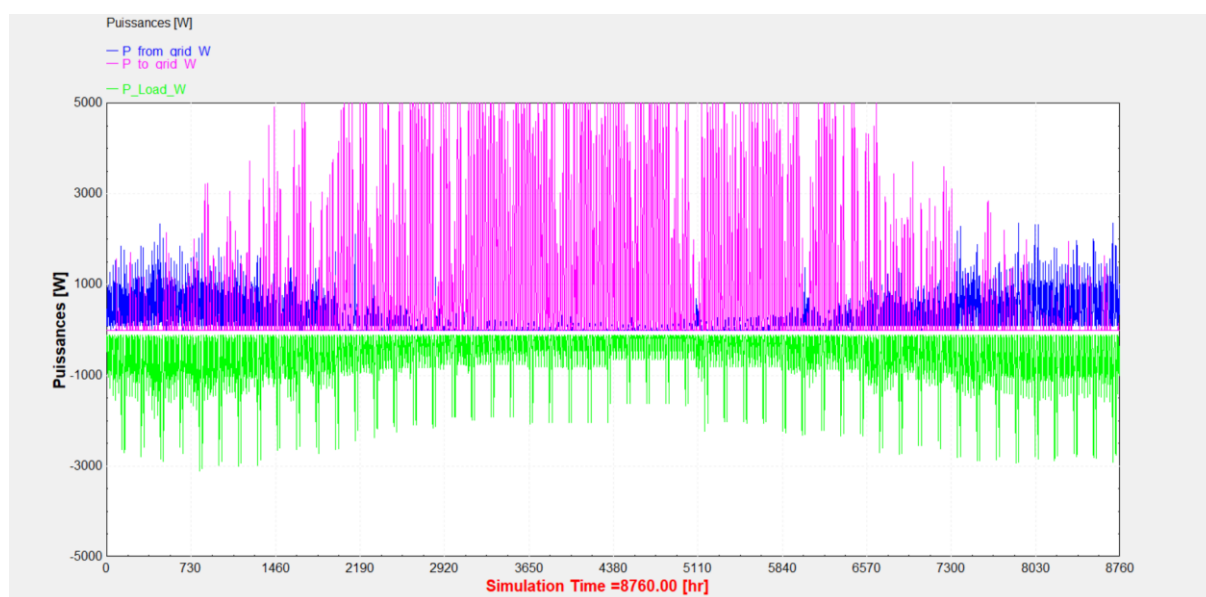


Figure 51 : Import et export depuis et vers le réseau électrique (PV 77,26m² - sans batterie)

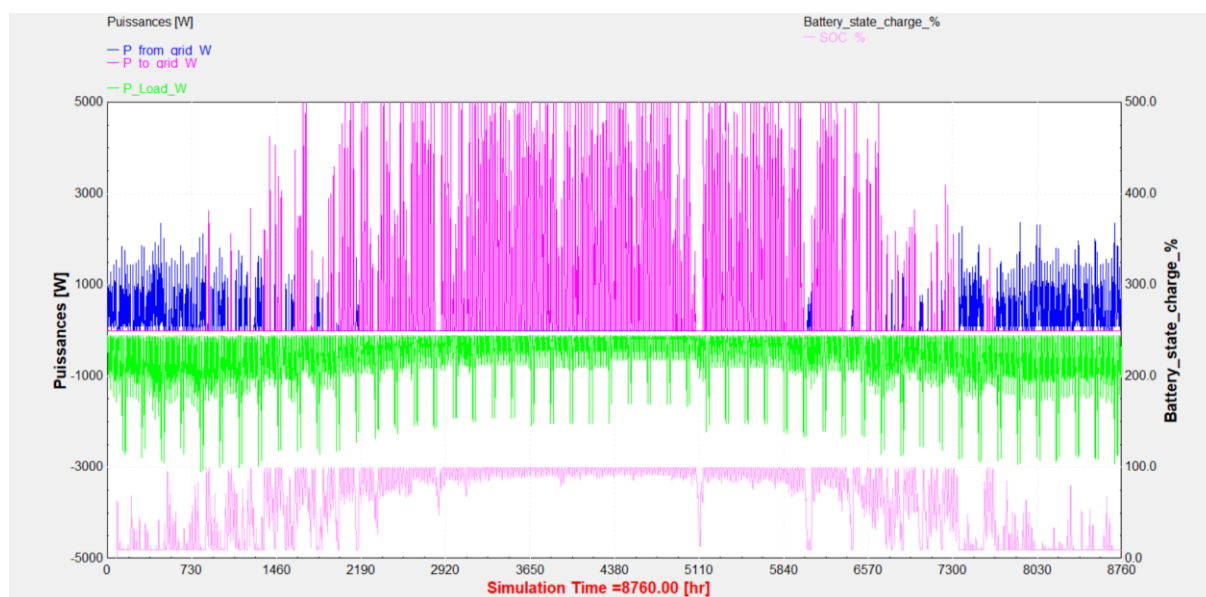


Figure 52 : Import et export depuis et vers le réseau électrique (PV 77,26m² - avec batterie)

Avec batterie, la dépendance au réseau atteint à 22,5% d'heures négatives. Le rejet de la production électrique vers le réseau est de 66,6%. Cela signifie qu'augmenter significativement le nombre de PV

permet de gagner en autonomie d'une part, mais que la quantité d'énergie produite et non-exploitée augmente d'autre part.

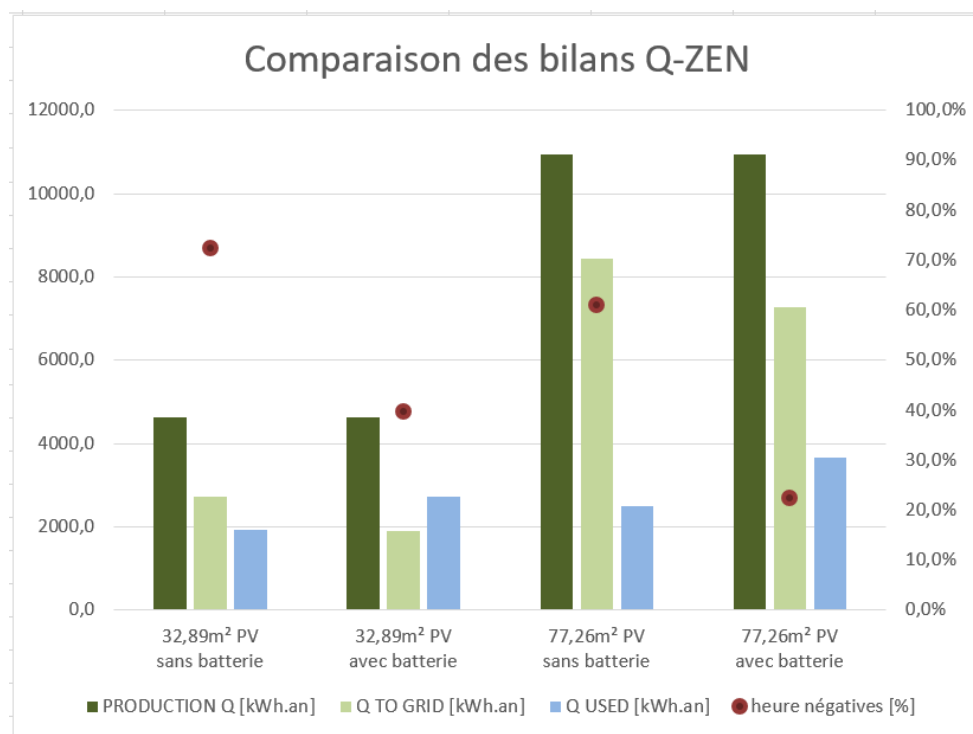


Figure 53 : Comparaison des bilans Q-ZEN en fonction de la surface PV, avec et sans batterie

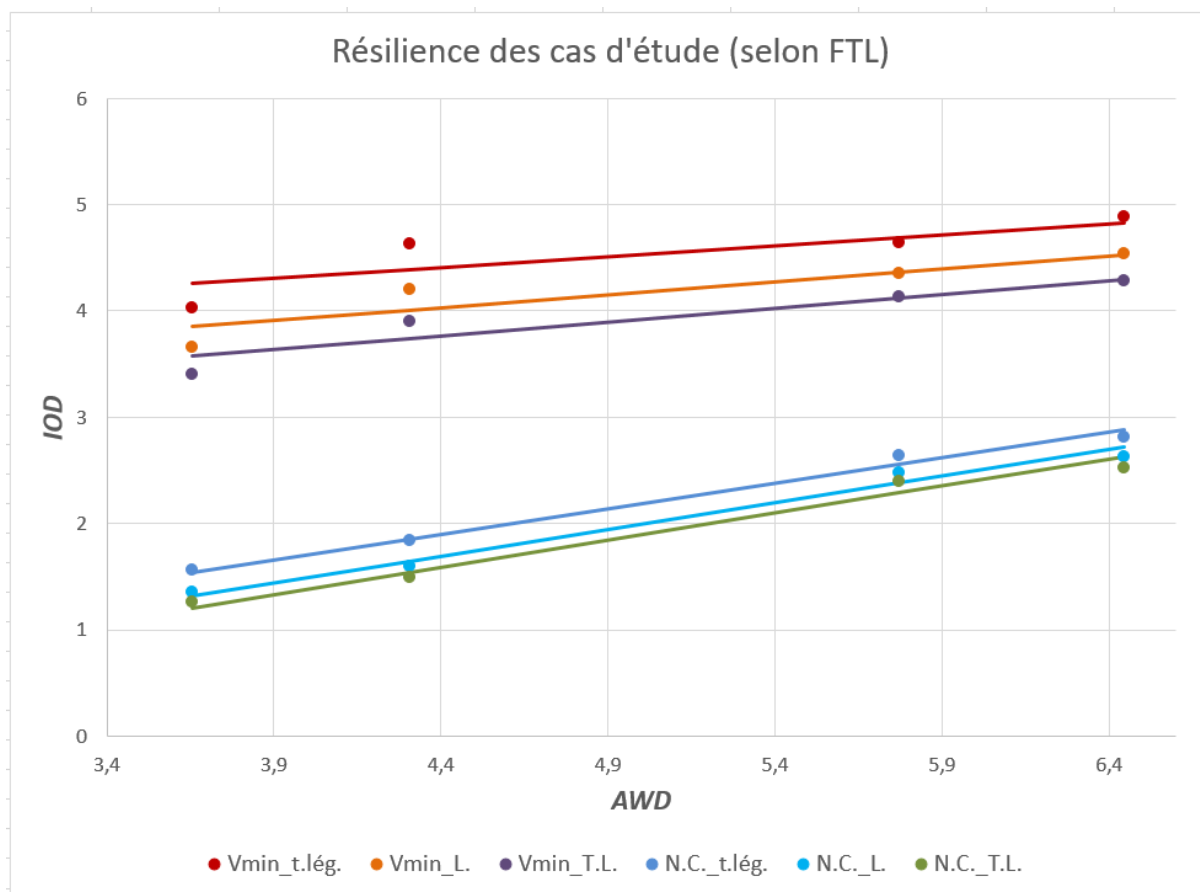
		32,89m² photovoltaïque		77,26m² photovoltaïque	
BESOINS	[kWh.an]	4609,8		4609,8	
PRODUCTION Q	[kWh.an]	4646,0		10942,0	
Q PRODUIT	[%]	100%		100%	
		sans batterie	avec batterie	sans batterie	avec batterie
BILAN ANNUEL	[kWh]	+ 36,2	+ 36,3	+ 6332,2	+ 6332,3
Q TO GRID	[%]	2727	1912	8445	7284
	[kWh]	58,7%	41,2%	77,2%	66,6%
Q USED	[%]	1919	2734	2497	3658
	[kWh]	41,3%	58,9%	22,8%	33,4%
HEURES NÉGATIVES	[%]	72,4%	39,8%	61,1%	22,5%

Tableau 27 : Comparaison des bilans Q-ZEN en fonction de la surface PV, avec et sans batterie

La solution optimale dépend donc de l'objectif souhaité : une grande autonomie ou une meilleure exploitation de l'énergie produite. La Figure 52 illustre ces résultats, et la Figure 53 et le Tableau 27 font la synthèse et la comparaison des résultats obtenus.

4.2. SURCHAUFFE ET POTENTIEL DU N.C. ET DE LA M.T.

Les 24 combinaisons possibles pour chaque critère de confort, illustrées Figure 46, sont simulées.

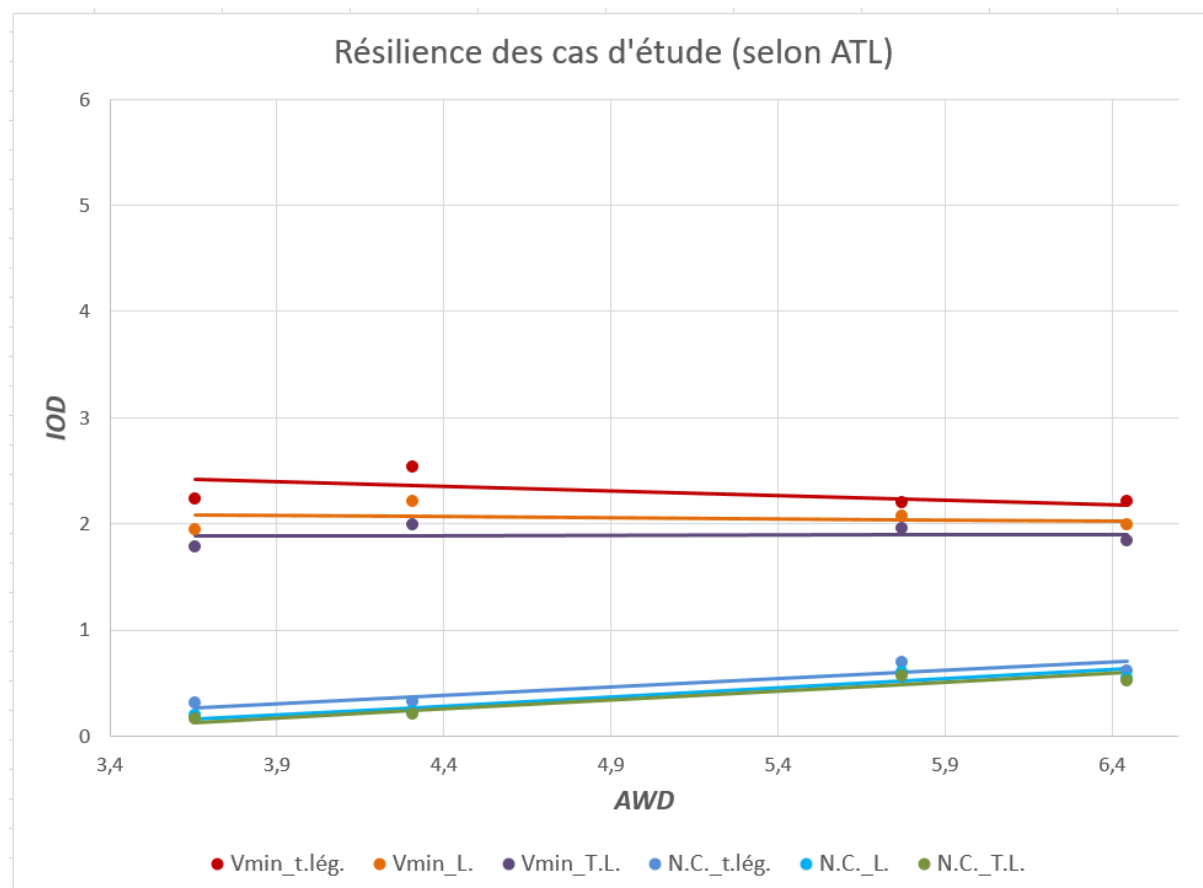


		CAS D'ETUDE					
		IOD (FTL)					
CLIMAT	AWD	Vmin_t.lég.	Vmin_L.	Vmin_T.L.	N.C._t.lég.	N.C._L.	N.C._T.L.
AWD (TMY2001_2020_ssp370)	3,657	4,027	3,659	3,409	1,565	1,360	1,260
AWD (TMY2041_2060_ssp370)	4,306	4,626	4,205	3,904	1,838	1,599	1,488
AWD (TMY2085_2100_ssp370)	5,773	4,638	4,353	4,138	2,637	2,472	2,393
AWD (TMY2085_2100_ssp585)	6,444	4,885	4,541	4,283	2,811	2,632	2,526
		BCVF					
		0,205	0,242	0,260	0,481	0,504	0,510

Figure 54 : Résilience des 6 combinaisons possibles en termes d'inertie quotidienne (très léger, Lourd, Très Lourd) et de ventilation (ventilation hygiénique ou night-cooling) simulées selon le critère de confort fixe (FTL). La résilience est exprimée par le Building Climate Vulnerability Factor (BCVF), soit la pente de la relation linéaire entre le Indoor Overheating Degree (IOD) et l'Ambient Warmness Degree (AWD)

La Figure 54 illustre les différentes résiliences des combinaisons possibles pour le critère fixe FTL. Les IOD obtenus sans ventilation nocturne sont de l'ordre de 4, ce qui souligne un risque très élevé de surchauffe, ou en tout cas un début d'inconfort, étant donné la sévérité des critères de confort considérés pour les FTL. L'inertie très lourde permet de gagner environ 0,6°C par rapport à la combinaison très légère dans le cas ventilation minimale, et environ 0,3°C dans le cas combiné au night-cooling. Les BCVF des droites de ventilation minimales sont de l'ordre de 0,250 et cette pente

augmente avec l'inertie thermique. Les BCFV des droites avec night-cooling sont de l'ordre de 0,500 soit le double de celles de la ventilation minimale. Cette différence s'explique par la plus forte dépendance du night-cooling et de son efficacité aux conditions climatiques extérieures.



		CAS D'ETUDE					
		IOD (ATL)					
CLIMAT	AWD	Vmin_t.lég.	Vmin_L.	Vmin_T.L.	N.C._t.lég.	N.C._L.	N.C._T.L.
AWD (TMY2001_2020_ssp370)	3,657	2,237	1,944	1,783	0,311	0,195	0,163
AWD (TMY2041_2060_ssp370)	4,306	2,536	2,207	1,997	0,325	0,231	0,205
AWD (TMY2085_2100_ssp370)	5,773	2,201	2,070	1,960	0,691	0,605	0,563
AWD (TMY2085_2100_ssp585)	6,444	2,208	1,995	1,843	0,615	0,546	0,524
		BCVF					
		-0,086	-0,020	0,005	0,157	0,170	0,169

Figure 55 : Résilience des 6 combinaisons possibles en termes d'inertie quotidienne (très léger, Lourd, Très Lourd) et de ventilation (ventilation hygiénique ou night-cooling) simulées selon le critère de confort adaptatif (ATL). La résilience est exprimée par le Building Climate Vulnerability Factor (BCVF), soit la pente de la relation linéaire entre le Indoor Overheating Degree (IOD) et l'Ambient Warmness Degree (AWD)

La Figure 55 illustre les différentes résiliences des combinaisons possibles pour le critère adaptatif ATL. Les IOD obtenus sans ventilation nocturne sont de l'ordre de 2, ce qui souligne un risque élevé de surchauffe par rapport à la souplesse et à la limite du critère adaptatif. L'inertie très lourde permet de gagner environ 0,4°C par rapport à la combinaison très légère dans le cas ventilation minimale, et environ 0,12°C dans le cas de night-cooling. Les BCFV des droites de ventilation minimales sont de l'ordre de 0, voire négatives. Cette pente augmente légèrement avec l'inertie thermique. Ce phénomène de pente négative s'explique par des températures opératives qui flirtent avec le critère adaptatif, lequel autorise une plus grande souplesse avec le changement climatique. En effet, le climat se réchauffe, les limites maximales augmentent dès lors dans une possible mesure, et le bâtiment

devient alors plus résilient pour une surchauffe factuelle plus ou moins inchangée ou relativement peu changée par rapport à l'élargissement de la souplesse du critère de confort. Les BCVF des droites avec night-cooling sont de l'ordre de 0,165 ainsi le bâtiment est relativement résilient lorsqu'il est ventilé de nuit, mais une hausse du IOD avec AWD annonce déjà une diminution du potentiel du night-cooling avec le changement climatique.

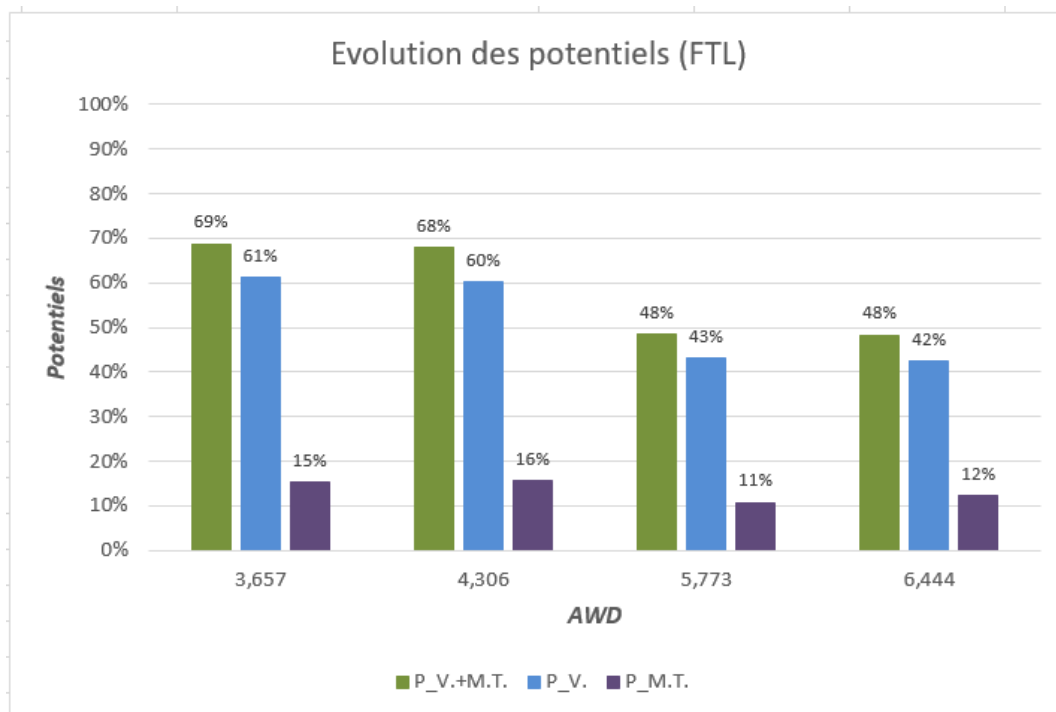


Figure 56 : Potentiels de la ventilation naturelle et de la masse thermique, seules et combinées, estimés selon le critère de confort fixe (FTL)

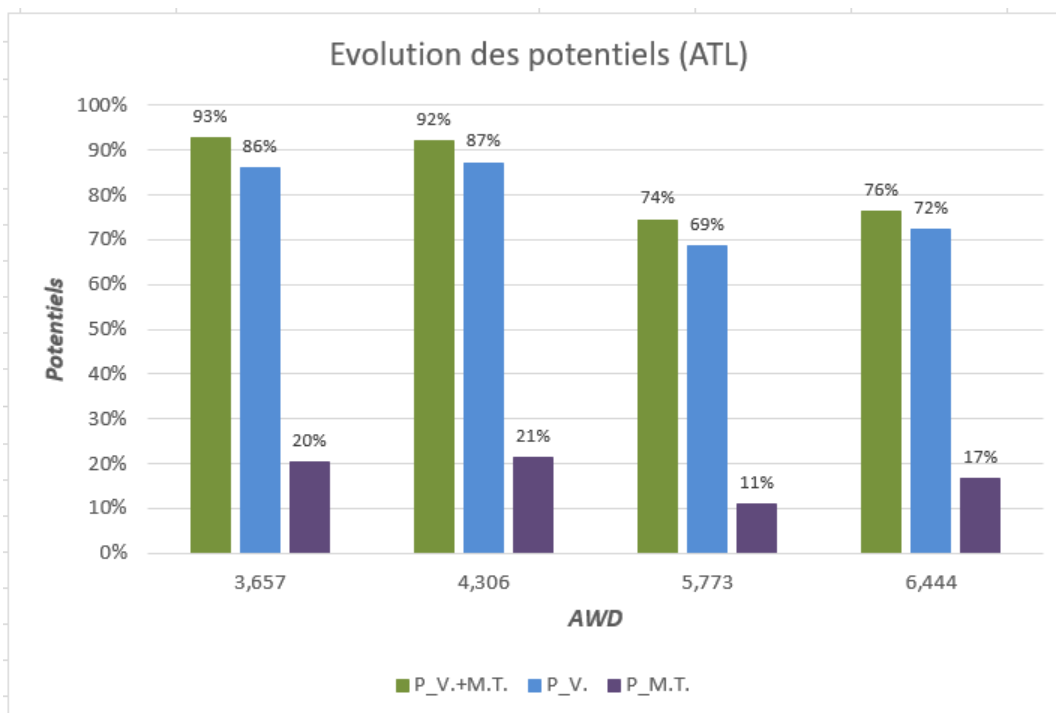


Figure 57 : Potentiels de la ventilation naturelle et de la masse thermique, seules et combinées, estimés selon le critère de confort adaptatif (ATL)

La Figure 56 et la Figure 57 illustrent les potentiels évalués pour les différentes solutions étudiées, seules ou combinées et évaluées pour le critère fixe et pour le critère adaptatif. En considérant le critère sévère FTL, le potentiel de la ventilation naturelle nocturne atteint 61%. Ce potentiel chute à 43% à l'horizon 2100. En considérant le critère plus souple adaptatif ATL, le potentiel actuel de la ventilation naturelle nocturne est de l'ordre de 93%, et descend aux alentours de 75% en 2100.

Seule, l'inertie thermique du bâtiment permet de réduire la surchauffe actuelle du bâtiment de l'ordre de 15% selon le FTL, et de l'ordre de 20% selon le ATL. À l'horizon 2100, ce potentiel descend aux alentours de 11% selon le FTL, et oscille entre 11% et 17% selon le ATL.

Enfin, combinée à la ventilation nocturne, la masse thermique du bâtiment permet d'améliorer le potentiel de la ventilation nocturne seule de 8% actuellement selon le FTL, et de 7% selon le ATL. À l'horizon 2100, cette contribution supplémentaire est d'environ 5,5% selon le FTL et de 4,5% selon le ATL.

5. DISCUSSION

5.1. REFORMULATION DU BUT DE L'ÉTUDE

L'objectif de ce travail était double.

D'une part, l'objectif était d'évaluer le bilan Q-ZEN du cas d'étude considéré, pour une période annuelle selon un pas de temps horaire. Il s'agissait aussi d'estimer la dépendance au réseau d'un bâtiment conçu comme Q-ZEN en Wallonie, et d'évaluer l'effet d'une batterie sur le bilan global.

D'autre part, l'objectif était d'évaluer la surchauffe du cas d'étude, qui est un bâtiment très léger à ossature bois, passif. Il s'agissait d'analyser la surchauffe avec un logiciel différent des études menées précédemment sur ce cas d'étude, de comparer le potentiel de la ventilation naturelle nocturne simulé avec notre logiciel et d'évaluer en plus le potentiel de l'inertie thermique du bâtiment comme solution de mitigation de la surchauffe, seule et combinée au night-cooling. Pour ces évaluations, nous avons utilisé des indicateurs de surchauffe récents et innovants, à savoir le IOD, le AWD et le BCVF.

5.2. RÉSULTATS CLÉS, RECOMMANDATION

L'étude du bilan Q-ZEN de notre cas d'étude a mis en évidence la grande dépendance au réseau d'un bâtiment Q-ZEN en Wallonie. Sans batterie de stockage, un bâtiment conçu de telle sorte que son bilan énergétique s'annule pour une période annuelle peut être dépendant du réseau à hauteur de 72,4% du temps. L'ajout d'une batterie d'une capacité de 10kWh permet de réduire cette dépendance au réseau à 39,8% du temps. Un moyen supplémentaire de réduire cette dépendance et étudié dans ce travail est le surdimensionnement de la production d'énergie renouvelable. Le cas étudié ici permet de limiter la dépendance au réseau à 22,5% avec une batterie de stockage, mais cette réduction de la dépendance engendre une surproduction de 6332kWh par an.

La difficulté à atteindre l'indépendance au réseau d'un bâtiment Q-ZEN en Belgique réside notamment dans l'écart saisonnier entre la production d'énergie photovoltaïque et les besoins et la difficulté d'équilibrer cet écart d'une saison à l'autre. La période de plus grande production est en été lorsque les journées sont plus longues et plus ensoleillées, tandis que les besoins sont les plus importants en hiver, lors de la période de chauffe. Une batterie domestique d'une capacité standard de 10kWh ne permet pas de conserver l'énergie produite en été et de la restituer en hiver, les besoins en chauffage s'élevant jusqu'à 650kWh d'électricité pour le fonctionnement de la PAC.

En revanche, le recours à une batterie semble être une bonne solution pour une meilleure interaction bâtiment-réseau. Elle favorise l'autoconsommation et participe à une meilleure stabilité du réseau, enjeu majeur dans la gestion d'un réseau énergétique intelligent dans lequel les bâtiments deviennent des éléments actifs, mais aussi lors d'épisodes de vagues de chaleur qui peuvent engendrer des surcharges, des pannes et des coupures.

L'étude de la surchauffe du cas d'étude a confirmé le risque de surchauffe actuel auquel est soumis le bâtiment. Ce risque est évalué à l'aide du logiciel de simulation dynamique TRNSYS et confirme les résultats obtenus par les études précédemment réalisées sur le logiciel DesignBuilder.

Le risque de surchauffe est évalué avec l'indicateur multizonal et multicritères IOD. Pour des critères de confort fixe stricts, le IOD est évalué à 4,027°C. À l'horizon 2100, cet indicateur devrait atteindre les 4,885°C dans un scénario pessimiste de changement climatique. Pour des critères de confort adaptatif, l'analyse de la surchauffe actuelle indique un IOD de 2,237°C. (Flores-Larsen, Filippín et Bre, 2023) proposent une échelle d'analyse du IOD, où :

- $IOD \leq 0,5^{\circ}\text{C}$ renseigne un impact modéré sur la surchauffe ;
- $0,5^{\circ}\text{C} < IOD \leq 2^{\circ}\text{C}$ renseigne un impact fort sur la surchauffe ;
- $IOD > 2^{\circ}\text{C}$ renseigne un impact extrême sur la surchauffe.

Notre bâtiment est donc déjà sujet à une surchauffe extrême.

À l'horizon 2100, l'indicateur IOD reste au-dessus du seuil des 2°C mais diminue sensiblement et atteint les 2,208°C. Cette diminution indique que l'augmentation générale des températures extérieures autorise un critère de confort adaptatif plus souple qui permet alors de diminuer sensiblement la surchauffe estimée, malgré une hausse possible des températures opératives intérieures. Cette analyse est cependant marginale puisque le risque de surchauffe reste extrême avec un IOD supérieur à 2°C.

En ce qui concerne l'évaluation du potentiel de la ventilation naturelle nocturne comme stratégie de refroidissement passive, l'étude a montré un potentiel actuel de 86% pour un critère ATL. Ce potentiel est évalué pour une différence entre un IOD initial de 2,237°C diminué à 0,311°C. On passe alors d'un impact extrême sur la surchauffe à un impact modéré. Ce potentiel est supérieur au potentiel évalué dans l'étude de RAHIF *et al.*, qui était de 63%. À l'horizon 2100, ce potentiel chute à 72% pour des projections pessimistes. Le IOD initial de 2,208°C ne descend pas sous 0,605°C qui indique la limite inférieure d'un impact fort sur la surchauffe. Nos résultats sont mis en perspective par rapport aux études précédentes Figure 58. La comparaison des résultats aux différentes études précédentes illustre l'amplitude que peuvent prendre ces résultats finaux selon les hypothèses considérées et la façon de concevoir le modèle. Comparer strictement ces résultats, sans les interpréter ou comprendre les hypothèses posées, est complexe.

En ce qui concerne l'évaluation du potentiel de l'inertie thermique comme stratégie de mitigation de la chaleur, l'étude a montré un potentiel actuel de 20% pour un critère ATL. Ce potentiel est évalué pour une différence de IOD initial de 2,237°C qui diminue jusqu'à 1,783°C. On passe alors d'un impact extrême sur la surchauffe à un impact fort. À l'horizon 2100, ce potentiel descend à 17% pour des projections pessimistes. Le IOD initial de 2,208°C descend sous le seuil des 2°C (impact extrême) et atteint 1,843°C qui indique alors un impact fort sur la surchauffe. Ce résultat indique donc qu'un bâtiment sans système de refroidissement par ventilation naturel efficace, ou qu'un bâtiment dont le système de refroidissement actif tomberait en panne lors d'épisodes de chaleur, présente un potentiel actuel de 20% supérieur pour résister à la chaleur s'il est très lourd plutôt que très léger. Bien que ce potentiel soit bien inférieur à celui de la ventilation naturelle nocturne, ce potentiel est à garder en considération. La masse thermique apporte une résistance au bâtiment face au risque de surchauffe, alors que le potentiel de ventilation nocturne est voué à diminuer plus significativement avec le changement climatique comme notre étude l'a encore montré. Aussi notre cas d'étude est un cas isolé mais en zone urbaine le potentiel du night-cooling est affecté par les effets d'îlot de chaleur comme décrit dans (Santamouris, 2004). Les vitesses de l'air en centre urbain sont amoindries, les températures sont plus hautes qu'en périphérie, or ces deux éléments sont fondamentaux dans l'estimation du potentiel du night-cooling.

Étude	AWD	IOD	Potentiel	BCVF	hypothèses
"Master thesis : Evaluation of the overheating risk and the potential of ventilative cooling : A case study in Belgium" (FANI, 2020)	3,5°C	1,95°C à 0,36°C	82%	/	AWD pour Tb = 18°C calcul : 1er mai au 30 sept. FTL : Top = 26°C 8AC/h (nightcooling) + 2 AC/h (ventilation mécanique) de jour
"Climate change sensitive overheating assessment in dwellings: a case study in Belgium" (RAHIF et al., 2021)	3,2°C 5,4°C 5,8°C 7,1°C	3,1°C à 1,2°C 3,9°C à 1,4°C 4,1°C à 1,6°C 5,2°C à 2,1°C	62,7% 62,0% 61,0% 58,9%	0,527 (Vmin) 0,244 (Vmax)	AWD pour Tb = 14°C calcul : 1er janv. au 31 déc. ATL : Top = "a.Trm +b" (liv.) et Top = 26°C (ch.) 8AC/h (liv.) et 5 AC/h (ch.) (nightcooling)
"Évaluation du risque de surchauffe d'une maison QZEN et du potentiel de la ventilation naturelle et de la masse thermique : Un cas d'étude Wallon" (POSKIN, 2025)	3,7°C 4,3°C 5,8°C 6,4°C	4,0°C à 1,6°C 4,6°C à 1,8°C 4,6°C à 2,6°C 4,9°C à 2,8°C	61,1% 60,3% 43,1% 42,5%	0,205 (Vmin) 0,481 (Vmax)	AWD pour Tb = 14°C calcul : 1er mai au 31 oct. FTL : Top = 26°C (liv.) et 23°C (ch) 8AC/h (liv.) et 5 AC/h (ch.) (nightcooling)
	3,7°C 4,3°C 5,8°C 6,4°C	2,2°C à 0,3°C 2,5°C à 0,3°C 2,2°C à 0,7°C 2,2°C à 0,6°C	86,1% 87,2% 68,6% 72,1%	-0,086 (Vmin) 0,157 (Vmax)	AWD pour Tb = 14°C calcul : 1er mai au 31 oct. ATL : Top = "a.Trm +b" (liv.) et 26°C (ch) 8AC/h (liv.) et 5 AC/h (ch.) (nightcooling)
"The impact of climate change on the overheating risk in dwellings—A Dutch case study" (HAMDY et al., 2017)	0,6°C 1,6°C 3,0°C 6,0°C	1,0°C à 1,0°C 2,0°C à 1,0°C 4,0°C à 2,0°C 7,0°C à 4,0°C	83,0% 77,0% 72,0% 53,0%	0,1 à 1,2	AWD pour Tb = 18°C calcul : 1er mai au 30 sept. FTL : Top = 28°C (liv.) et 26°C (ch) 5 AC/h (ch.) (nightcooling)
	0,6°C 1,6°C 3,0°C 6,0°C	0,0°C à 0,0°C 1,0°C à 0,0°C 2,0°C à 1,0°C 4,0°C à 2,0°C	87,0% 82,0% 75,0% 61,0%	0,1 à 1,2	AWD pour Tb = 18°C calcul : 1er mai au 30 sept. ATL : Top = "a.Trm +b" (liv.) et "c.Trm +d" (ch) 5 AC/h (ch.) (nightcooling)

Figure 58 : Intégration des résultats de l'étude aux résultats des études précédentes

Combinés, la ventilation naturelle nocturne et l'inertie thermique permettent d'atteindre un potentiel actuel de 93%. La ventilation nocturne est la stratégie qui a la plus grande contribution, mais la masse thermique permet de passer d'un IOD de 0,311°C à un IOD de 0,163°C, ce qui n'est pas négligeable. Cependant, le BCVF du bâtiment Très Lourd avec night-cooling (0,169) est supérieur à celui du bâtiment très léger avec night-cooling (0,157). Cela traduit une baisse proportionnellement plus importante du potentiel de la masse thermique combinée au night-cooling que celle du potentiel du night-cooling seul. Néanmoins, la pente de la courbe représentant la masse thermique combinée au night-cooling est supérieure à celle du night-cooling seul (BCVF supérieur), elle reste malgré tout plus à des ordonnées inférieures à celle du night-cooling seul, traduisant donc des IOD plus faibles et donc une meilleure atténuation du risque de surchauffe.

5.3. FORCES ET LIMITES

La première force de notre étude est la validité de notre modèle grâce à toutes les données disponibles sur le cas d'étude et notre analyse fine des paramètres sur lesquels nous pouvions agir pour calibrer le modèle. La connaissance de données de consommation d'électricité et de chauffage sur plusieurs années nous a permis un calibrage robuste selon la méthode ASHRAE.

La deuxième force de notre travail réside dans notre choix d'indicateurs de surchauffe, de même que la méthode d'évaluation de la surchauffe et du potentiel des stratégies passives étudiées. Ces indicateurs nous ont aidés à définir au mieux les critères de confort à prendre en compte dans les différentes zones de notre cas d'étude, et à comparer les résultats selon la théorie du confort fixe et la théorie du confort adaptatif. Ils nous ont aussi permis d'évaluer l'évolution des potentiels des stratégies passives avec le changement climatique pour des scénarios définis.

La troisième force de notre travail est notre outil de simulation de systèmes transitoires, TRNSYS, qui nous permet de comparer les résultats précédemment obtenus avec le logiciel DesignBuilder pour le potentiel du night-cooling. Aussi, l'utilisation d'un logiciel différent nous a permis de revoir l'ensemble de l'encodage et de revoir les hypothèses faites dans le modèle. Nous avons pu requestionner certaines hypothèses et certains choix précédemment posés dans les études précédentes, et valider ces hypothèses ou, lorsque nécessaire, poser nos propres choix.

Une dernière force de notre travail est l'évaluation du potentiel d'une nouvelle variable pour ce cas d'étude, à savoir l'inertie thermique du bâtiment. Le cas d'étude est un bâtiment à ossature bois très léger très sujet à la surchauffe. Évaluer le potentiel d'un apport de masse thermique peut être décisif dans les choix techniques de conception du bâtiment. La caractérisation des trois classes d'inertie quotidienne selon la méthode détaillée est aussi une force de l'étude. Dans notre travail, la variation de l'inertie thermique est simulée fictivement par l'ajout de couches de béton, mais des solutions concrètes existent pour améliorer l'inertie des bâtiments en bois. Un exemple de solution concrète sont les galets d'argile développés dans le cadre du projet AGROMOB, développé par l'entreprise Mobic en collaboration avec l'Université de Liège (*Apport d'inertie Argimob - Mobic Autoconstruction*, 2015).

La première limite de notre étude est l'échantillon considéré. À moins que notre méthodologie ne soit appliquée à d'autres cas d'étude, nous ne pouvons pas généraliser les résultats obtenus. La contribution de ce travail est minime, mais les questionnements soulevés lors de la reproduction du modèle initial, l'étude du bilan QZEN ou encore l'évaluation du potentiel de l'inertie thermique n'en demeurent pas moins intéressants.

Une limite de notre étude est le pas de temps considéré pour l'étude du bilan QZEN. Nous avons dû considérer un pas de temps horaire, contraint par nos fichiers météo calibrés sur ce pas de temps et dont l'extrapolation n'est pas possible par la nature des données liées à la radiation solaire. Un pas de temps d'une heure peut sous-évaluer la demande de la charge maximale en termes de refroidissement et de conditionnement d'air, et ignorer certains phénomènes transitoires importants, comme des changements rapides dans la demande des systèmes HVAC (Tabares-Velasco, 2013). Cependant, pour une étude menée sur plusieurs mois ou dont l'objectif est de quantifier une demande annuelle, le pas de temps horaire permet tout de même une bonne estimation des phénomènes physiques du bâtiment et permet un gain de temps dans les simulations.

Une autre limite est l'ensemble de nos hypothèses sur les profils d'utilisation horaire des électroménagers. Nous n'avons que les données mensuelles, or pour le bilan horaire et la dépendance

au réseau du logement, l'autoconsommation est un enjeu primordial. Cependant, nos hypothèses de profils d'utilisation sont basées sur les profils d'occupation du bâtiment, et en partie sur le bon sens (certains électro-ménagers peuvent être utilisés en dehors des heures d'occupation du bâtiment, comme un lave-vaisselle dont le cycle est lancé le matin avant de partir au travail. D'autres électroménagers ne peuvent être utilisés que pendant les heures d'occupation du logement, comme un sèche-cheveux ou encore un chargeur de téléphone. C'est sur ce « bon sens » qu'ont été en partie définis nos profils d'utilisation horaire).

Une limite intrinsèque à notre indicateur AWD est l'absence de la prise en compte de la radiation solaire. En effet, l'indicateur repose uniquement sur la température extérieure, or il semblerait que le changement climatique modifie grandement la part radiative, plus que la température extérieure. Il faudrait donc établir un indicateur qui tienne compte de ce paramètre, pour obtenir de meilleures évaluations du AWD, lequel affecte les résultats liés du BCVF.

Une autre limite est l'étude d'un potentiel de ventilation nocturne considéré comme « idéal ». En effet, et comme dans les études précédentes, nous étudions l'effet de débits de ventilation nocturne importants, sans tenir compte de certaines réalités. En effet, nous avons considéré un comportement des occupants idéal, alors que le night-cooling et la gestion des systèmes demandent une opération et une connaissance de la part des occupants, parfois manquante, qui peut justifier des différences entre les résultats simulés et les résultats réels (Brown et Cole, 2009). Aussi, le contexte peut jouer un rôle sur le potentiel de ventilation de nuit, comme les risques d'effraction, ou encore les effets d'îlots de chaleur, qui peuvent tous deux diminuer ce potentiel. Des études pourraient être menées sur l'effet du contexte sur le potentiel de la ventilation nocturne.

Une autre limite de notre étude est la période considérée pour la surchauffe. Nous avons considéré l'ensemble de la période estivale, mais nous n'avons pas étudié le potentiel de nos solutions passives sur de plus courtes périodes, lors d'une vague de chaleur par exemple. L'étude (Amaripadath *et al.*, 2024) s'est aussi concentré sur notre cas d'étude, durant une vague de chaleur, et a mis en évidence l'incapacité des mesures passives initiales mises en place dans le cas de base de la maison Kettenis dans la gestion de la surchauffe. Ces mesures sont les casquettes solaires horizontales au sud et les pare-solaires verticaux en façade ouest. AMARIPADATH *et al.* ont démontré que ces mesures sont insuffisantes pour assurer l'habitabilité de la maison lors de vagues de chaleur intenses (la température opérative demeurant supérieure à 30°C). Ils n'ont cependant pas évalué le potentiel des stratégies passives, comme le night-cooling ou une augmentation de l'inertie thermique, durant ces vagues de chaleur. Ils se sont limités au cas de référence (bâtiment passif à ossature bois, très léger, avec un débit de ventilation hygiénique minimum de 10L/s/pers.). Il serait intéressant de transposer cette étude à nos variantes du cas d'étude de base, où la ventilation nocturne est intégrée et la variation de l'inertie thermique aussi.

Une dernière limite de l'étude est la caractérisation des classes d'inertie, que nous avons basées sur une inertie quotidienne. Il serait intéressant de modifier le bâtiment selon les classes d'inertie séquentielle et de voir les différences possibles de résultats.

5.4. IMPLICATIONS SUR LA PRATIQUE ET TRAVAUX FUTURS

Une implication de notre étude est l'interprétation de la nouvelle refonte de 2024 de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) et son adoption à l'échelle nationale. Alors que l'exigence QZEN est aujourd'hui d'application en Wallonie, la nouvelle directive européenne va au-delà des critères fixés en Wallonie. La trajectoire passe du « quasi zéro-énergie » au « zéro émission » (*Nearly-zero energy and zero-emission buildings - European Commission, 2024*) et l'ensemble de la conception d'un bâtiment va en être modifié. C'est l'étude du cycle de vie entier qui doit être étudié et non plus sa phase d'usage seulement. Ce changement de paradigme implique le recours à la simulation dynamique, et tient compte aussi du changement de la gestion du confort estival. La surchauffe estivale n'est plus considérée comme un calcul en bout de chaîne mais comme un enjeu principal dont il faut tenir compte dans une conception intégrée, avec des indicateurs mis à jour. Notre travail, par l'adoption de ces facteurs d'évaluation de la surchauffe et par l'approche globale dynamique du bilan énergétique, peut contribuer à l'adoption nationale de ces nouvelles exigences.

Les recherches futures doivent continuer l'approche multizonale, continuer l'évaluation du risque de surchauffe et des potentiels des différentes stratégies passives, à différentes échelles temporelles et pour des pas de temps plus ou moins serrés, comme lors d'épisodes de vagues de chaleur, en cas de panne de la ventilation minimale hygiénique ou lors d'autres phénomènes particulièrement transitoires. Ces études doivent aussi être menées sur des échantillons plus larges et donc plus représentatifs. L'étude du bilan QZEN doit aussi être poursuivie, son analyse doit être affinée en considérant un pas de temps plus court et reposer sur des données mesurées. Il peut être intéressant aussi d'étudier ce bilan et son évolution en fonction de l'évolution des besoins en énergie de chauffage et de refroidissement.

6. CONCLUSION

Cette étude s'inscrit dans un *continuum* de travaux menés sur les risques de surchauffe subis par les bâtiments hautement performants en Wallonie et qui répondent aux exigences QZEN actuelles. Ce travail contribue à l'évaluation du risque de surchauffe des bâtiments QZEN et du potentiel de stratégies passives. Le travail se base sur un cas d'étude situé à Kettenis (Eupen) et est fondé sur une méthode quantitative, réalisée à l'aide d'un logiciel de simulation dynamique de systèmes transitoires, TRNSYS.

Le premier aspect traité dans ce cadre de recherche est le bilan QZEN du cas de référence et la mise à jour de ses systèmes. Initialement conçu comme bâtiment passif, un ajout de 32,9m² panneaux photovoltaïques d'une puissance de 300Wc est suffisant à caractériser le bâtiment de quasi zéro-énergie. L'évaluation du bilan annuel a montré qu'un bâtiment conçu de telle façon est dépendant du réseau à hauteur de 72,4% du temps, et qu'il rejette 58,7% de l'énergie qu'il produit sur le réseau. Le changement de paradigme de conception de bâtiments zéro énergie vers un modèle zéro émission bouscule l'approche des énergies renouvelables et contraint les nouveaux bâtiments à davantage s'inscrire dans un réseau énergétique intelligent. Ainsi, nous avons étudié l'impact d'une batterie sur le bilan annuel d'un bâtiment QZEN. Une batterie d'une capacité de 10kWh permet de réduire la dépendance au réseau à 39,8% du temps, et limite le rejet de l'énergie renouvelable produite à 41,2%. Ces résultats sont valables pour notre cas d'étude, soit un bâtiment initialement conçu pour répondre aux critères passifs et situé isolément, en dehors de toute communauté énergétique.

Le second aspect étudié dans ce travail est la surchauffe du bâtiment et l'évaluation de deux stratégies de refroidissement passif et de mitigation de la chaleur. Pour ce faire, nous avons utilisé une méthodologie d'évaluation de la surchauffe issue de la littérature, basée sur trois grandeurs : le *Indoor Overheating Degree* (IOD), le *Ambient Warmness Degree* (AWD), et le *Building Climate Vulnerability Factor* (BCVF). Notre modèle confirme les résultats des études menées précédemment sur le bâtiment qui dénoncent unanimement le risque actuel de surchauffe auquel il est soumis. Notre modèle déclare un risque de surchauffe actuel qualifié d'extrême, quantifié par un IOD de 2,237°C calculé sur base de critères liés au confort adaptatif. Notre modèle confirme aussi les résultats relatifs au potentiel de la ventilation naturelle nocturne comme stratégie de refroidissement passif efficace, avec un potentiel actuel maximal de 86%. Ce potentiel est voué à décroître avec le changement climatique, nos simulations annonçant un potentiel de 72% à l'horizon 2100 pour un scénario pessimiste de réchauffement climatique. Enfin, nous avons évalué le risque de surchauffe du bâtiment pour trois classes d'inertie quotidienne. Nous avons montré qu'un bâtiment très lourd présente un potentiel de mitigation de la surchauffe de 20% par rapport à un bâtiment très léger. Ce potentiel devrait lui aussi se dégrader à l'horizon 2100, notre modèle l'estimant à 17%. En revanche, contrairement à la ventilation naturelle, l'inertie thermique ne nécessite aucun contrôle de la part des utilisateurs du bâtiment et son potentiel repose donc sur moins d'hypothèses de modélisation et d'idéalisation. Combinée à la ventilation nocturne, l'inertie thermique permet un gain de potentiel de 7% supplémentaires dans la réduction de la surchauffe actuelle par rapport à une ventilation nocturne seule.

Sur base de ces conclusions, nous recommandons au gouvernement wallon d'agir et de prendre des mesures pour protéger les bâtiments QZEN existants du risque actuel et croissant de surchauffe, et de fixer de nouvelles exigences aux bâtiments neufs pour qu'ils répondent au mieux aux enjeux actuels. Parmi ces mesures, promouvoir le refroidissement nocturne, inciter les entreprises à améliorer l'inertie

thermique des bâtiments à ossature bois, dépasser une approche purement annuelle et quasi-statique du bilan énergétique, et mettre en place des solutions pour connecter au mieux ces bâtiments au réseau électrique semblent être des priorités.

7. BIBLIOGRAPHIE

Amaripadath, D. *et al.* (2024) « Multi-criteria decision support framework for climate change-sensitive thermal comfort evaluation in European buildings », *Energy and Buildings*, 303, p. 113804. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113804>.

Apport d'inertie Argimob - Mobic Autoconstruction (2015). Disponible sur: <http://perso.mobic-autoconstruction.fr/nos-innovations/apport-inertie-Argimob> (Consulté le: 1 décembre 2025).

Attia, S. (2018) *Net Zero Energy Buildings (NZEB): Concepts, frameworks and roadmap for project analysis and implementation*. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03166-2>.

Attia, S. et Gobin, C. (2020) « Climate Change Effects on Belgian Households: A Case Study of a Nearly Zero Energy Building », *Energies*, 13(20), p. 5357. Disponible sur: <https://doi.org/10.3390/en13205357>.

Bhamare, D.K., Rathod, M.K. et Banerjee, J. (2019) « Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art », *Energy and Buildings*, 198, p. 467-490. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.023>.

Brown, Z. et Cole, R.J. (2009) « Influence of occupants' knowledge on comfort expectations and behaviour », *Building Research & Information*, 37(3), p. 227-245. Disponible sur: <https://doi.org/10.1080/09613210902794135>.

Commission européenne (2020) *À la une: l'efficacité énergétique des bâtiments - Commission européenne*. Disponible sur: https://commission.europa.eu/news-and-media/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_fr (Consulté le: 3 janvier 2026).

« Confort thermique : généralité » (2025) *Energie Plus Le Site*. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/> (Consulté le: 6 décembre 2025).

Construire avec l'énergie: des réalisations concrètes (2008) *Site énergie du Service public de Wallonie*. Disponible sur: <https://energie.wallonie.be/fr/des-realisations-concretes.includehtml?IDC=6146&IDD=11507> (Consulté le: 1 novembre 2025).

Dartevelle, O. *et al.* (2021) « Long-term evaluation of residential summer thermal comfort: Measured vs. perceived thermal conditions in nZEB houses in Wallonia », *Building and Environment*, 190(107531). Disponible sur: <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal%3A242686?> (Consulté le: 1 septembre 2025).

Dartevelle, O. *et al.* (2022) « Indoor Summer Thermal Comfort in a Changing Climate: The Case of a Nearly Zero Energy House in Wallonia (Belgium) », *Energies*, 15(7). Disponible sur: <https://doi.org/10.3390/en15072410>.

Dartevelle, O. et Vanwelde, V. (2018) « MEASURE-Rapport de synthèse ».

De Meester, T. (2008) « Etude du comportement thermique et énergétique d'une maison passive par modélisation dynamique ».

Directive sur la performance énergétique des bâtiments (2025). Disponible sur: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (Consulté le: 19 août 2025).

Doutreloup, S. *et al.* (2022) « Historical and future weather data for dynamic building simulations in Belgium using the regional climate model MAR: typical and extreme meteorological year and heatwaves », *Earth System Science Data*, 14(7), p. 3039-3051. Disponible sur: <https://doi.org/10.5194/essd-14-3039-2022>.

Elnagar, E., Zeoli, A., *et al.* (2023) « A qualitative assessment of integrated active cooling systems: A review with a focus on system flexibility and climate resilience », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 175, p. 113179. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113179>.

Elnagar, E., Gendebien, S., *et al.* (2023) « Framework to assess climate change impact on heating and cooling energy demands in building stock: A case study of Belgium in 2050 and 2100 », *Energy and Buildings*, 298, p. 113547. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113547>.

Energguide.be (2025) *Combien les appareils électroménagers consomment-ils ?*, *Energguide*. Disponible sur: <https://www.energguide.be/fr/questions-reponses/combien-les-appareils-electromenagers-consomment-ils/71/> (Consulté le: 20 novembre 2025).

European Environment Agency (EEA) (2024) *Greenhouse gas emissions from energy use in buildings in Europe*. Disponible sur: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-energy> (Consulté le: 27 août 2025).

« Exigences QZEN 2021 (2019 pour les bâtiments publics) » (2025) *Energie Plus Le Site*. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/reglementations/le-batiment3/exigences-qzen-2021-2019-pour-les-batiments-publics/> (Consulté le: 31 décembre 2025).

Fanger, P.O. (1970) *Thermal comfort : analysis and application in environmental engineering*. Danish Technical Press. Copenhagen.

Fani, A.R. (2020) « Master thesis : Evaluation of the overheating risk and the potential of ventilative cooling : A case study in Belgium ».

« Fiche01-3.qxd » (sans date). Disponible sur: <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/fiche01-3.pdf?IDR=9420> (Consulté le: 9 octobre 2025).

Flores-Larsen, S., Filippín, C. et Bre, F. (2023) « New metrics for thermal resilience of passive buildings during heat events », *Building and Environment*, 230, p. 109990. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.109990>.

Gobin, C. (2016) « Bâtiments d'aujourd'hui, Climat de demain : Évaluation de l'impact du réchauffement climatique sur le confort thermique et l'efficacité énergétique d'un bâtiment résidentiel passif existant en Belgique ».

Gresham House (2024) « Global Timber Outlook », *Gresham House Specialist Asset Management*. Disponible sur: https://greshamhouse.com/wp-content/uploads/2024/05/Gresham-House-Timber-Outlook_v15-new-logo-2024-web-version.pdf.

Hamdy, M. *et al.* (2017) « The impact of climate change on the overheating risk in dwellings—A Dutch case study », *Building and Environment*, 122, p. 307-323. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.031>.

Harvard Dataverse / Data at Harvard University (2025). Disponible sur: <https://data.harvard.edu/dataverse> (Consulté le: 3 octobre 2025).

Hout info Bois (2025) « État de la construction bois en Belgique, 2011-2024 ». Disponible sur: https://www.houtinfobois.be/wp-content/uploads/2025/03/Enquete_FR_HIB_2011-2024-BR-VERSION-FINALE.pdf.

Institut de la maison passive (2025). Disponible sur: <https://passiv.de/> (Consulté le: 24 décembre 2025).

Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc) (2023) *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1^{re} éd. Cambridge University Press. Disponible sur: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

Korbee, Smolders et Stofberg (1979) « Milieu voorop bij uitwerking van een global bestemmings plan », BOUW(22).

Mun, J., Lee, J. et Kim, M. (2021) « Estimation of Infiltration Rate (ACH Natural) Using Blower Door Test and Simulation », *Energies*, 14(4), p. 912. Disponible sur: <https://doi.org/10.3390/en14040912>.

NBN EN ISO 13786:2017 - EN (2018). Disponible sur: https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=197207&p40_language_code=en&p40_detail_id=83385 (Consulté le: 24 novembre 2025).

Nearly-zero energy and zero-emission buildings - European Commission (2024). Disponible sur: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/nearly-zero-energy-and-zero-emission-buildings_en (Consulté le: 1 janvier 2026).

« Norme NBN EN 15251:2007 : Critères d’ambiance intérieure » (2007) *Energie Plus Le Site*. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/reglementations/confort44/norme-nbn-en-15251-2007-criteres-d-ambiance-interieure/> (Consulté le: 22 décembre 2025).

Okamoto-Mizuno, K. et Mizuno, K. (2012) « Effects of thermal environment on sleep and circadian rhythm », *Journal of Physiological Anthropology*, 31(1), p. 14. Disponible sur: <https://doi.org/10.1186/1880-6805-31-14>.

Parlement européen (2024) « Directive (UE) 2024/1275 du Parlement européen et du Conseil du 24 avril 2024 sur la performance énergétique des bâtiments (refonte) (Texte présentant de l’intérêt pour l’EEE) ».

Rahif, R. et al. (2021) « Climate change sensitive overheating assessment in dwellings: a case study in Belgium », in. 2021 *Building Simulation Conference*. Disponible sur: <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30125>.

Rahif, R. et al. (2022) « Simulation-based framework to evaluate resistivity of cooling strategies in buildings against overheating impact of climate change », *Building and Environment*, 208, p. 108599. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108599>.

Rahif, R. (2023) *Impact of Climate Change on High-Performance Belgian Houses: Thermal Comfort, HVAC Energy Performance, and HVAC GHG Emissions*. Ph.D. thesis. Disponible sur: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023PhDT.....36R> (Consulté le: 1 septembre 2025).

Santamouris, M. (2004) « La ventilation naturelle en zone urbaine », *Ventilation Information Paper, Air Infiltration and Ventilation Center - IEA*, 3.

Sartori, I., Napolitano, A. et Voss, K. (2012) « Net zero energy buildings: A consistent definition framework », *Energy and Buildings*, 48, p. 220-232. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032>.

SPW (2025) *Arrêté du Gouvernement wallon portant exécution du décret du 28 novembre 2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments, Wallex*. Disponible sur: <https://wallex.wallonie.be/eli/arrete/2014/05/15/2014027210/2015/01/01> (Consulté le: 6 septembre 2025).

Tabares-Velasco, P.C. (2013) « Time Step Considerations When Simulating Dynamic Behavior of High-Performance Homes », *ASHRAE* [Preprint].

Zeoli, A.S. et Lemort, V. (2022) « Passive cooling techniques to improve resilience of nZEBs in Belgium », *CLIMA 2022 conference* [Preprint]. Disponible sur: <https://doi.org/10.34641/clima.2022.372>.

LISTE FIGURES, EQUATIONS, TABLEAUX

Liste des figures

Figure 1 : Émissions de gaz à effet de serre liées à la consommation d'énergie dans les bâtiments en Europe (European Environment Agency (EEA), 2024)	1
Figure 2 : Émissions de GES liées à la consommation d'énergie dans les bâtiments, par pays (European Environment Agency (EEA), 2024).....	2
Figure 3 : Demande énergétique pour le refroidissement des bâtiments, pour différents scénarios de rénovation de l'ensemble du parc immobilier belge (Elnagar, Gendebien, et al., 2023)	3
Figure 4 : Résultats concernant la surchauffe des logements QZEN de l'enquête POE menée par (Dartevelle et Vanwelde, 2018).....	4
Figure 5 : Principes fondamentaux dans la conception des NZEB (Attia, 2018)	7
Figure 6 : Classification des techniques de refroidissement passif étudiées par (Bhamare, Rathod et Banerjee, 2019) et schématisées par (Rahif, 2023)	9
Figure 7 : Classification des techniques de refroidissement passif étudiées par (Elnagar, Zeoli, et al., 2023), et schématisées par (Rahif, 2023).....	10
Figure 8 : Framework.....	15
Figure 9 : Workflow simulations.....	17
Figure 10 : Élévations (de droite à gauche : nord, ouest, sud) (Construire avec l'énergie: des réalisations concrètes, 2008).....	18
Figure 11 : Plans du Rez-de-Chaussée et de l'étage (Gobin, 2016)	18
Figure 12 : Étapes de conception du modèle géométrique pour le type 56.....	19
Figure 13 : Modèle 3D énergétique (.IDF) modélisé dans TRNSYS-3D.....	19
Figure 14 : Zones du modèle	20
Figure 15 : Schéma du calcul de la résistance thermique d'une paroi hétérogène	21
Figure 16 : Consignes de chauffage hebdomadaires.....	23
Figure 17 : Températures annuelles de l'air dans le salon et dans la salle de bain, sans « facteurs de calibrage »	24
Figure 18 : Températures annuelles de l'air dans le salon et dans la salle de bain, avec « facteurs de calibrage »	24
Figure 19 : Plans avec zones de pulsion, de transfert et d'extraction d'air (De Meester, 2008)	26
Figure 20 : Températures du niveau supérieur et inférieur du ballon d'ECS	30
Figure 21 : Besoins électriques auxiliaires électriques pour l'ECS.....	30
Figure 22 : Profils annuels des consommations en électricité mesurées	33
Figure 23 : Profils annuels des consommations en électricité mesurées et simulées (essai 1)	34
Figure 24 : Profils annuels des consommations en électricité mesurées et simulées (essai 2 – modèle calibré).....	35
Figure 25 : Profil annuel des besoins horaires en électricité simulés (essai 2 – modèle calibré)	35
Figure 26 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées.....	36
Figure 27 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées (essai 1)	37

Figure 28 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées par (Fani, 2020) avant calibrage	38
Figure 29 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées par (Fani, 2020) après calibrage	39
Figure 30 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées (essai 2a)	41
Figure 31 : Surchauffe initiale simulée avec $g = 0,60$ (14062°h.an)	42
Figure 32 : Surchauffe initiale simulée avec $g = 0,35$ (5720°h .an)	42
Figure 33 : Évolution des températures intérieures pendant les mois d'août, septembre et octobre	43
Figure 34 : Évolution des températures intérieures pendant les mois d'août, septembre et octobre avec ajout de refroidissement nocturne	44
Figure 35 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées (essai 3)	45
Figure 36 : Températures de décembre et janvier, TMY 2001-2020	46
Figure 37 : Températures de décembre et janvier, TMY 2006-2020	46
Figure 38 : Températures de décembre et janvier, TMY 1991-2005	47
Figure 39 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées (essai 4)	48
Figure 40 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées (essai 4 – modèle calibré).....	48
Figure 41 : Workflow synthétique du calibrage	49
Figure 42 : COP de la PAC en fonction de la température extérieure (donnée de référence)	50
Figure 43 : Évolution annuelle du COP dans TRNSYS	51
Figure 44 : Demande de chaleur et demande électrique pour la PAC horaires et annuelles	51
Figure 45 : Explications des données météorologiques et climatiques (Laboratoire de Climatologie de L'Université de Liège)	58
Figure 46 : Combinaisons des variables pour l'étude de la surchauffe.....	62
Figure 47 : Production (PV $32,89\text{m}^2$) vs Consommation électrique totale	63
Figure 48 : Bilan annuel optimisé (PV $32,89\text{m}^2$)	63
Figure 49 : Import et export depuis et vers le réseau électrique (PV $32,89\text{m}^2$ - sans batterie).....	64
Figure 50 : Import et export depuis et vers le réseau électrique (PV $32,89\text{m}^2$ - avec batterie)	64
Figure 51 : Import et export depuis et vers le réseau électrique (PV $77,26\text{m}^2$ - sans batterie).....	65
Figure 52 : Import et export depuis et vers le réseau électrique (PV $77,26\text{m}^2$ - avec batterie)	65
Figure 53 : Comparaison des bilans Q-ZEN en fonction de la surface PV, avec et sans batterie	66
Figure 54 : Résilience des 6 combinaisons possibles en termes d'inertie quotidienne (très léger, Lourd, Très Lourd) et de ventilation (ventilation hygiénique ou night-cooling) simulées selon le critère de confort fixe (FTL). La résilience est exprimée par le Building Climate Vulnerability Factor (BCVF), soit la pente de la relation linéaire entre le Indoor Overheating Degree (IOD) et l'Ambient Warmness Degree (AWD)	67
Figure 55 : Résilience des 6 combinaisons possibles en termes d'inertie quotidienne (très léger, Lourd, Très Lourd) et de ventilation (ventilation hygiénique ou night-cooling) simulées selon le critère de confort adaptatif (ATL). La résilience est exprimée par le Building Climate Vulnerability Factor (BCVF), soit la pente de la relation linéaire entre le Indoor Overheating Degree (IOD) et l'Ambient Warmness Degree (AWD).....	68
Figure 56 : Potentiels de la ventilation naturelle et de la masse thermique, seules et combinées, estimés selon le critère de confort fixe (FTL).....	69
Figure 57 : Potentiels de la ventilation naturelle et de la masse thermique, seules et combinées, estimés selon le critère de confort adaptatif (ATL)	69
Figure 58 : Intégration des résultats de l'étude aux résultats des études précédentes	73
Figure 59 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées (essai 2b)	XIX

Liste des tableaux

Tableau 1 : Propriétés du matériau équivalent de la paroi hétérogène "ossature 2"	21
Tableau 2 : Coefficients de transfert de chaleur par convection et absorptions solaires.....	22
Tableau 3 : valeurs des coefficients U des parois.....	22
Tableau 4 : Propriétés des fenêtres	23
Tableau 5 : « Facteurs de calibrage » entrés dans les couplings.....	25
Tableau 6 : Électroménagers retenus et tirés de (Energuide.be, 2025) et hypothèses.....	29
Tableau 7 : Consommation électrique annuelle par pièce et total.....	29
Tableau 8 : Consommations mensuelles en électricité mesurées	33
Tableau 9 : Consommations mensuelles en électricité mesurées et simulées (essai 1).....	33
Tableau 10 : Facteurs de calibrage mensuels appliqués aux besoins en électricité	34
Tableau 11 : Consommations mensuelles en électricité mesurées et simulées (essai 2 – modèle calibré)	34
Tableau 12 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées	36
Tableau 13 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées et simulées (essai 1)	37
Tableau 14 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées et simulées (essai 2a)	40
Tableau 15 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées et simulées (essai 3)	44
Tableau 16 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées et simulées (essai 4)	47
Tableau 17 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées et simulées (essai 4 – modèle calibré)	49
Tableau 18 : Potentiel de production électrique photovoltaïque de la toiture	52
Tableau 19 : Production électrique photovoltaïque optimale	52
Tableau 20 : Bilan Q-ZEN annuel potentiel maximum et optimum	53
Tableau 21 : Classe d'inertie quotidienne d'un niveau de bâtiment déterminée par le calcul (NBN EN ISO 13786)	57
Tableau 22 : Surfaces de notre cas d'étude	57
Tableau 23 : Modifications de notre cas d'étude pour la variable « Lourde »	58
Tableau 24 : Modifications de notre cas d'étude pour la variable « Très Lourde ».....	58
Tableau 25 : Scénarios climatiques envisagés comme variable de notre étude.....	59
Tableau 26 : Synthèse des variables de l'étude de la surchauffe.....	62
Tableau 27 : Comparaison des bilans Q-ZEN en fonction de la surface PV, avec et sans batterie	66
Tableau 28 : Études similaires pertinentes (partie 1/2)	V
Tableau 29 : Études similaires pertinentes (partie 2/2)	VI
Tableau 30 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées et simulées (essai 2b).....	XIX

Liste des équations

Équation 1 : Expression générale de la température limite supérieure dans l'approche de confort adaptatif	8
Équation 2 : Résistance équivalente	21
Équation 3 : Résistance thermique limite supérieure	21
Équation 4 : Résistance thermique limite inférieure	21
Équation 5 : Lambda équivalent pour chaque couche d'épaisseur i.....	21
Équation 6 : Relation empirique entre le taux d'infiltration et le résultat n50 et la différence de pression	25

Équation 7 : Mean Bias Error (NMBE)	32
Équation 8 : Coefficient of Variation of Root Square Mean Error (CV (RMSE))	32
Équation 9 : Définition du COP.....	51
Équation 10 : Bilan annuel Q-ZEN	53
Équation 11 : Dépendance au réseau du bâtiment (Bilan annuel de pas de temps horaire et indicateurs)	53
Équation 12 : Épaisseur efficace.....	56
Équation 13 : Épaisseur maximale efficace.....	56
Équation 14 : Capacité thermique quotidienne d'un niveau	57
Équation 15 : Capacité thermique surfacique quotidienne d'une paroi.....	57
Équation 16 : Surface d'échange équivalente.....	57
Équation 17 : Indoor Overheating Degree (IOD)	59
Équation 18 : Ambient Warmness Degree (AWD)	60
Équation 19 : Overheating Escalation Factor (α_{iod}).....	60
Équation 20 : Contribution de la ventilation	60
Équation 21 : Potentiel de la ventilation.....	60
Équation 22 : Contribution de l'inertie thermique.....	60
Équation 23 : Potentiel de l'inertie thermique.....	60
Équation 24 : Contribution de l'inertie thermique combinée à la ventilation	61
Équation 25 : Potentiel de l'inertie thermique combinée à la ventilation.....	61

ANNEXES

Annexe 1 : Études similaires pertinentes, tableaux comparatifs

Étude	Objectif	Résultats	Points forts	Limites	Suggestions
TFE "Etude du comportement thermique et énergétique d'une maison passive par modélisation dynamique" (DE MEESTER, 2008)	Fournir une liste de bonnes pratiques dans la conception d'un bâtiment d'un bâtiment passif (Kettenis) pour assurer au mieux tant son confort d'été que son confort d'hiver	Les maisons à ossature bois passives ne peuvent garantir un confort d'été égal à celui d'une maison traditionnelle. L'optimisation énergétique des besoins de chauffage a affaibli le confort d'été	Simulation sur un logiciel dynamique (TRNSYS)	Approche très globale ; Pas d'indicateur / de quantification de la surchauffe (analyse visuelle des T° int.) ; Modèle non calibré	Étudier le stockage de l'énergie
TFE "Bâtiments d'aujourd'hui, Climat de demain : Évaluation de l'impact du réchauffement climatique sur le confort thermique et l'efficacité énergétique d'un bâtiment résidentiel passif existant en Belgique" (GOBIN, 2016)	Mesurer l'impact du changement climatique sur la surchauffe d'une maison passive (Kettenis)	En considérant un critère de surchauffe actuellement respecté, tous les scénarios de projections climatiques annoncent une augmentation considérable de la surchauffe. Dénonciation du manque de résilience du modèle de la conception passive.	Simulation sur un logiciel dynamique (DesignBuilder) Modèle calibré Met en évidence le manque de résilience du bâtiment	Calibrage par rapport aux critères passifs supposés respectés Indicateur de surchauffe exprimé en [h/an] (T>25°C -5% = 438h/an max) critère passif	Développer des solutions (passives et actives) pour améliorer la résilience des bâtiments à haute performance énergétique
Article "The impact of climate change on the overheating risk in dwellings—A Dutch case study" (HAMDIY et al., 2017)	Définir de nouveaux indicateurs qui permettent de mieux évaluer la surchauffe des bâtiments, basés sur différentes théories du confort en fonction des zones et qui tiennent mieux compte du potentiel d'adaptation de l'occupant ; Évaluer le potentiel de la ventilation (Pays-Bas)	Potentiel de la ventilation actuel est estimé à 83% (FTL) et 87% (ATL). Ce potentiel va diminuer avec le changement climatique	La représentativité des simulations, les typologies considérées permettent de représenter 9216 combinaisons (building design and operation parameters), étude représentative à l'échelle nationale (Pays-Bas)	La validité des indicateurs repose notamment sur une hypothèse de radiation solaire constante avec le changement climatique, AWD repose principalement sur une variation de températures extérieures	L'étude évalue principalement le potentiel de la ventilation naturelle et des dispositifs d'ombrage, mais pas d'autres stratégies passives
Article "Climate Change Effects on Belgian Households: A Case Study of a Nearly Zero Energy Building" (ATTIA, GOBIN, 2020)	Mesurer l'impact du changement climatique sur la surchauffe d'une maison passive (Kettenis) selon plusieurs critères de confort et adaptatif	L'étude confirme que la surchauffe dans les nZEBs naturellement ventilés ne pourra pas être évité d'ici 2050 et 2100 (confort fixe et adaptatif)	La pluralité des critères de confort considérés pour évaluer la surchauffe (confort du standard passif, confort adaptatif ASHRAE 55), confort adaptatif EN 16798)	Le degré d'incertitude lié aux scénarios climatiques envisagés	Développer une stratégie d'adaptation au changement climatique en Belgique, développer un plan de transition énergétique pour le secteur du bâtiment
TFE "Evaluation of the overheating risk and the potential of ventilative cooling : A case study in Belgium" (FANI, 2020)	Comparer l'évaluation du risque de surchauffe prédit par l'outil PEB wallon et celui prédit par un outil de simulation dynamique (Kettenis) ; Quantifier ce risque avec des indicateurs nouveaux Quantifier le potentiel de stratégie de refroidissement passive (ventilation mécanique diurne et ventilation naturelle nocturne)	Le modèle PEB annonce une surchauffe de 438h par an (T>23°C) alors que le modèle dynamique annonce une surchauffe de 1386h par an (T>26°C). IOD = 1,95°C pour AWD = 3,5°C. IOD ventilé = 0,36 ; soit 767h par an. Potentiel de 82% de la ventilation sur la surchauffe.	Évaluation à l'aide d'indicateurs nouveaux (IOD, AWD) Simulation dynamique (DesignBuilder) Bâtiment calibré	Pas d'évaluation selon le confort adaptatif, un seul critère de confort (confort fixe) évalué	Étudier d'autres solutions passives Augmenter la taille de l'échantillon
Article "Climate change sensitive overheating assessment in dwellings: a case study in Belgium" (RAHIF et al., 2021)	Évaluer le potentiel de la ventilation nocturne, actuel et futur, avec des indicateurs nouveaux (Kettenis)	Potentiel de la ventilation nocturne actuel de 62,7%, mais ce potentiel va diminuer avec le changement climatique	Évaluation à l'aide d'indicateurs nouveaux (IOD, AWD) Simulation dynamique (DesignBuilder) Bâtiment calibré, nouveaux indicateurs, théorie du confort adaptatif	Un seul critère de confort (confort adaptatif) évalué	Développer des modèles de confort exacts et distincts (statique, adaptatif, hybride), pour des bâtiments ventilés naturellement, mécaniquement, ou mixtes. Évaluer le potentiel de mesures complémentaires, comme la masse thermique ou des dispositifs d'ombrage

Tableau 28 : Études similaires pertinentes (partie 1/2)

Étude	Objectif	Résultats	Points forts	Limites	Suggestions
Article "Long-term evaluation of residential summer thermal comfort: Measured vs. perceived thermal conditions in nZEB houses in Wallonia" (DARTEVELLE et al., 2021)	Donner un aperçu des conditions thermiques estivales mesurées et perçues dans les nZEBs (Wallonie), et évaluer la capacité des critères actuels à prédire ou non la satisfaction des occupants en période estivale	Les nZEBs souffrent en effet d'un inconfort thermique en été, en particulier dans les chambres (importance de l'approche multizonale). Dans les zones de jours, l'inconfort est plutôt reporté lors de températures extrêmes. Dans les chambres, une plus petite déviation de la température entraîne déjà un inconfort, à cause du manque de capacité d'adaptation durant le sommeil. Les critères évalués se sont révélés incapable d'évaluer les inconforts modérés reportés dans la POE	Étude basée sur une évaluation post-occupancy (POE) de 23 cas Le nombre de critères de confort étudiés (2 critères statiques ; 3 critères adaptatifs) et évalués distinctement dans les zones de jours et dans les zones de nuit	Le manque de la prise en compte de la présence ou de l'absence de l'occupant durant la journée	Mener des études plus larges pour définir les seuils considérés dans le confort adaptatif dans le contexte résidentiel, car actuellement il ne reporte pas l'inconfort modéré. La prise en compte de la capacité des occupants à agir sur leur environnement est très importante et devrait être approfondie.
Article "Indoor Summer Thermal Comfort in a Changing Climate: The Case of a Nearly Zero Energy House in Wallonia (Belgium)" (DARTEVELLE et al., 2022)	Évaluer dans quelle mesure l'exploitation réelle d'un nZEB (un cas Wallon) permet d'assurer le confort thermique d'été dans un climat changeant	Les stratégies passives déployées actuellement dans les nZEBs ne seront pas suffisantes dans le futur.	Prend en compte la fermeture des rideaux internes et l'ouverture des fenêtres Calibrage basé sur du data mesuré (T) et par méthode PSO (optimisation par essaim de particules) Analyse multicritère	Taille de l'échantillon (1 bâtiment) ; seulement 2 stratégies passives étudiées	Évaluer la baisse du potentiel du nightcooling comme solution passive avec le changement climatique. Il faut continuer d'affiner la compréhension de la surchauffe et des stratégies passives et de leur potentiel pour améliorer la résilience des nZEBs
Article "Passive cooling techniques to improve resilience of nZEBs in Belgium" (ZEOLI, LEMORT, 2022)	Évaluer la consommation énergétique et le confort thermique d'un nZEB (Wallonie) et le potentiel de stratégies de refroidissement passives	Classement des stratégies étudiées selon leur efficacité vis-à-vis du nombre d'heures de surchauffe (N.C. , Day.C. , Protect. Sol. , Vitrage Therm. , IEC, Protect. Sol. Fixe)	Évaluation basée sur le confort adaptatif Évaluation de nombreuses stratégies de refroidissement passif (les protections solaires fixes, le vitrage solaire, le vitrage thermochromique, le day-cooling, le night-cooling, le refroidissement par évaporation indirecte IEC), seules et combinées Évaluation sur l'année et durant une vague de chaleur	Calibrage par méthode comparative, i.e. les résultats obtenus par 2 logiciels différents sont comparés mais aucun data de référence mesuré in-situ Étude monozonale Hypothèse forte sur le comportement (idéalisé) des occupants, primordial dans les stratégies passives Indicateur de surchauffe exprimé en [h/an]	Étudier l'interaction occupant - bâtiment, de sorte à trouver un équilibre entre automatisation et confort thermique (adaptatif)
Article "Multi-criteria decision support framework for climate change-sensitive thermal comfort evaluation in European buildings" (AMARIPADATH et al., 2024)	Évaluer la surchauffe d'un nZEB (Kettenis) pendant une vague de chaleur, pour la situation actuelle et future	Le risque de surchauffe durant une vague de chaleur sera 101% plus élevé en 2090 qu'en 2010. Le dépassement du seuil critique de 30°C passera de 48Kh en 2010 à 1584Kh en 2090	Évaluation à l'aide des indicateurs (IOD, AWD) Simulation dynamique (DesignBuilder) Bâtiment calibré, théorie du confort adaptatif	Aucune stratégie de refroidissement n'est étudiée, pas même la ventilation nocturne ou mécanique diurne. Il s'agit juste du modèle Kettenis initial	Étudier le potentiel de stratégies passives et actives, et tenir compte d'autres indicateurs de performance du bâtiment, comme les émissions CO2 ou l'utilisation de l'énergie

Tableau 29 : Études similaires pertinentes (partie 2/2)

Annexe 2 : Propriétés des matériaux et compositions des parois initiales

Matériaux	Nom complet	ρ	λ _normalisée		C		R_utile	épaisseur	U_utile
		[kg/m³]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[J/kgK]	[kJ/kgK]			
bois_1	Planche de bois	600	0,130	0,468	1880	1,88			
bois_1	Lattage	600	0,130	0,468	1880	1,88			
bois_1	Contre-lattage	600	0,130	0,468	1880	1,88			
bois_2	Ossatures	800	0,130	0,468	1888	1,888			
bois_2	Lattage 40/60	800	0,130	0,468	1888	1,888			
bois_3	Bardage	600	0,163	0,587	1880	1,88			
bois_4	Panneau OSB	650	0,130	0,468	1880	1,88			
bois_5	Panneau fibre de bois	110	0,045	0,162	1880	1,88			
bois_6	Planches de bois	300	0,13	0,468	1880	1,88			
laine_minérale	Laine Minérale	80	0,040	0,144	840	0,84			
cellulose	Cellulose insufflée	110	0,040	0,144	840	0,84			
vide_FV_30	Vide faiblement ventilé_30mm	1,25	0,163	0,587	1017	1,017	0,184	0,03	
bois_2	Ossatures	800	0,130	0,468	1888	1,888	0,462		
laine_minérale	Laine Minérale	80	0,040	0,144	840	0,84	1,500		
ossature_1_LM	Ossature-Laine Minérale	166	0,051	0,183	966	0,966	1,18	0,06	0,847
	0,12	0,06							
bois_2	Ossatures	800	0,130	0,468	1888	1,888	1,923		
cellulose	Cellulose insufflée	110	0,040	0,144	840	0,84	6,250		
ossature_2_Cellulose	Ossature-Cellulose	193	0,051	0,183	966	0,966	4,92	0,25	0,203
	0,12	0,25							
bois_1	Lattage	600	0,130	0,468	1880	1,88	0,231		
vide_FV	vide faiblement ventilé_30mm	1,25	0,163	0,587	1017	1,017	0,184	0,03	
ossature_3_Vide	Lattage-Vide ventilé	73	0,158	0,568	1121	1,121	0,19	0,03	5,263
	0,12	0,03							

Matériaux	Nom complet	ρ	λ _normalisée		C		R_utile	épaisseur	U_utile
		[kg/m³]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[J/kgK]	[kJ/kgK]			
bois_2	Ossatures	800	0,130	0,468	1888	1,888	2,308		
laine_minérale	Cellulose insufflée	110	0,040	0,144	840	0,84	7,500		
ossature_4_Pannes	Ossature Pannes-Cellulose	193	0,051	0,183	966	0,966	5,91	0,3	0,169
	0,12	0,3							
vide_FV_50	Vide faiblement ventilé_50mm	1,25	0,272	0,978	1017	1,017	0,184	0,05	
bois_2	Lattage 40/60	800	0,130	0,468	1888	1,888	0,385		
vide_FV_50	Vide faiblement ventilé_50mm	1,25	0,272	0,978	1017	1,017	0,184	0,05	
ossature_5_Vide	Lattage-Vide ventilé	97	0,250	0,900	1122	1,122	0,2	0,05	5,000
	0,12	0,05							
tuiles	tuiles	2000	1,400	5,040	840	0,84			
bois_2	Ossature Solives	800	0,130	0,468	1888	1,888	1,923		
cellulose	Cellulose insufflée	110	0,040	0,144	840	0,84	6,250		
ossature_6_Solives	Ossature Solives-Cellulose	193	0,051	0,183	966	0,966	4,92	0,25	0,203
	0,12	0,25							
carrelage	Carrelage	2000	1,2	4,320	840	0,84			
chape	Chape	2200	1,44	5,184	840	0,84			
fibre_ciment	Fibre ciment	2000	1,25	4,500	840	0,84			
bois_2	Ossatures	800	0,130	0,468	1888	1,888	0,462		
laine_minérale	Laine Minérale	80	0,040	0,144	840	0,84	1,500		
ossature_7_LM	Ossature-Laine Minérale	188	0,052	0,186	997	0,997	1,16	0,06	0,862
	0,15	0,06							

Matériaux	Nom complet	ρ	λ _normalisée		C		R_utile	épaisseur	U_utile
		[kg/m³]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[J/kgK]	[kJ/kgK]	[m²K/W]		
chassis	châssis								
vitrage	triple vitrage								0,5
fenetre	fenêtre								0,810
béton		2400	2	7,200	1000	1			

"Construction Type" Manager

construction type:

Layer

No.	Layer	Thickness	Type
1	BOIS_1	0.018	massive
2	OSSATURE_1	0.060	massive
3	BOIS_4	0.015	massive
4	OSSATURE_2	0.250	massive
5	BOIS_5	0.020	massive
6	OSSATURE_3	0.030	massive
7	BOIS_3	0.030	massive

<- new ...
 <<- Library ...
 PUTZ
 KST
 DAEMA
 GIPS
 HOLZ
 BET
 TEPP
 ESTR
 MIWO
 DAEMM
 massless_layer
 BOIS_1
 OSSATURE_1
 BOIS_4

back

total thickness: m

u - value: W/m²K for reference only
 (incl. h_i=7.7 W/m²K and h_e=25 W/m²K)

Solar Absorbance

front:

back:

Longwave Emission Coefficient

front:

back:

Note:
The emissivity of inside surfaces are applied by the detailed longwave radiation mode only!
For the standard model fixed values of 0.9 are used.

Convective Heat Transfer Coefficient

front

☒ userdefined ☐ internal calculation

kJ/h m²K

back

☒ userdefined ☐ internal calculation

kJ/h m²K

Construction Type Manager

"Construction Type" Manager

construction type:

Layer

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	BOIS_1	0.018	massive
2	OSSATURE_1	0.060	massive
3	OSSATURE_4	0.300	massive
4	BOIS_4	0.022	massive
5	OSSATURE_5	0.050	massive
6	TUILES	0.020	massive

back

total thickness: m

u - value: W/m² K for reference only
(incl. h_i=7.7 W/m² K and h_o=25 W/m² K)

Solar Absorptance

front: -

back: -

Longwave Emission Coefficient

front: -

back: -

Note:
The emissivity of inside surfaces are applied by the detailed longwave radiation mode only!
For the standard model fixed values of 0.9 are used.

Convective Heat Transfer Coefficient

front

☒ userdefined ☐ internal calculation

kJ/h m² K

back

☒ userdefined ☐ internal calculation

kJ/h m² K

Construction Type Manager

"Construction Type" Manager

construction type:

Layer

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	CARRELAGE	0.030	massive
2	CHAPE	0.060	massive
3	BOIS_4	0.022	massive
4	OSSATURE_6	0.250	massive
5	FIBRE_CIME	0.010	massive

back

total thickness: m

u - value: W/m² K for reference only
(incl. h_i=7.7 W/m² K and h_o=25 W/m² K)

Solar Absorptance

front: -

back: -

Longwave Emission Coefficient

front: -

back: -

Note:
The emissivity of inside surfaces are applied by the detailed longwave radiation mode only!
For the standard model fixed values of 0.9 are used.

Convective Heat Transfer Coefficient

front

☒ userdefined ☐ internal calculation

kJ/h m² K

back

☒ userdefined ☐ internal calculation

kJ/h m² K

Construction Type Manager

"Construction Type" Manager

construction type: 4_PLANCHER_R1

Layer

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	BOIS_1	0.015	massive
2	CELLULOSE	0.040	massive
3	BOIS_6	0.024	massive

back

total thickness: 0.079 m

u - value: 0.680 W/m² K for reference only
(incl. h_i=7.7 W/m² K and h_o=25 W/m² K)

Solar Absorptance

front: 0.1

back: 0.5

Longwave Emission Coefficient

front: 0.9

back: 0.9

Note:
The emissivity of inside surfaces are applied by the detailed longwave radiation mode only!
For the standard model fixed values of 0.9 are used.

Convective Heat Transfer Coefficient

front

☒ userdefined ☐ internal calculation

11 kJ/h m² K

back

☒ userdefined ☐ internal calculation

11 kJ/h m² K

Construction Type Manager

"Construction Type" Manager

construction type: 5_PLANCHER_R2

Layer

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	BOIS_1	0.015	massive
2	CELLULOSE	0.040	massive
3	BOIS_6	0.024	massive

back

total thickness: 0.079 m

u - value: 0.680 W/m² K for reference only
(incl. h_i=7.7 W/m² K and h_o=25 W/m² K)

Solar Absorptance

front: 0.1

back: 0.5

Longwave Emission Coefficient

front: 0.9

back: 0.9

Note:
The emissivity of inside surfaces are applied by the detailed longwave radiation mode only!
For the standard model fixed values of 0.9 are used.

Convective Heat Transfer Coefficient

front

☒ userdefined ☐ internal calculation

11 kJ/h m² K

back

☒ userdefined ☐ internal calculation

11 kJ/h m² K

Construction Type Manager

"Construction Type" Manager

construction type: 6_MUR_INT

Layer

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	BOIS_4	0.020	massive
2	OSSATURE_7	0.060	massive
3	BOIS_4	0.020	massive

back

total thickness: 0.100 m

u - value: 0.610 W/m² K for reference only
(incl. h_j=7.7 W/m² K and h_o=25 W/m² K)

Solar Absorbance

front: 0.4

back: 0.4

Longwave Emission Coefficient

front: 0.9

back: 0.9

Note:
The emissivity of inside surfaces are applied by the detailed longwave radiation mode only!
For the standard model fixed values of 0.9 are used.

Convective Heat Transfer Coefficient

front

☒ userdefined ☐ internal calculation

11 kJ/h m² K

back

☒ userdefined ☐ internal calculation

11 kJ/h m² K

Construction Type Manager

"Construction Type" Manager

construction type: FICTIVE_WALL

Layer

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	MASSLESS_L		massless

back

total thickness: 0.000 m

u - value: 5.531 W/m² K for reference only
(incl. h_j=7.7 W/m² K and h_o=25 W/m² K)

Solar Absorbance

front: 0.4

back: 0.4

Longwave Emission Coefficient

front: 0.9

back: 0.9

Note:
The emissivity of inside surfaces are applied by the detailed longwave radiation mode only!
For the standard model fixed values of 0.9 are used.

Convective Heat Transfer Coefficient

front

☒ userdefined ☐ internal calculation

11 kJ/h m² K

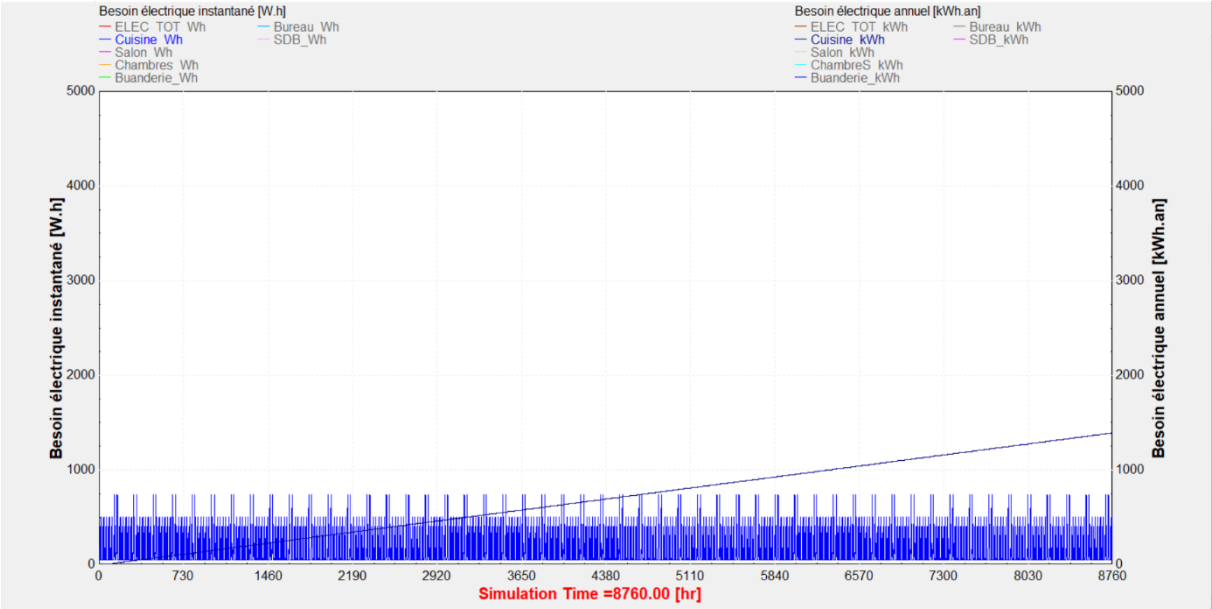
back

☒ userdefined ☐ internal calculation

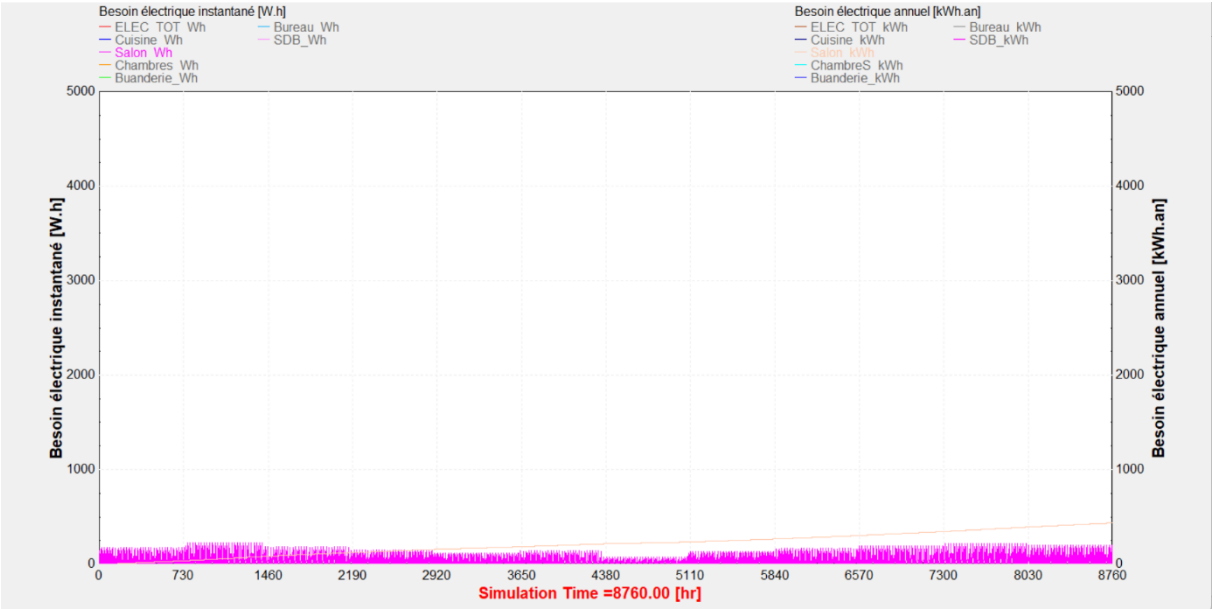
11 kJ/h m² K

Annexe 3 : Profils de consommations électriques par pièce

CUISINE

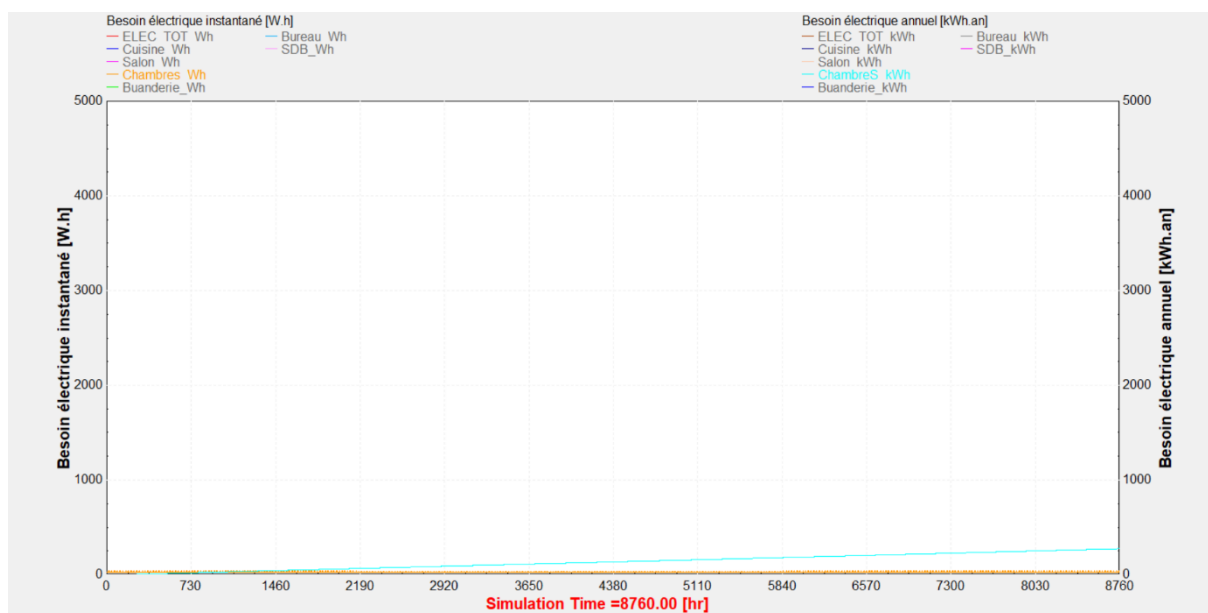


SALON

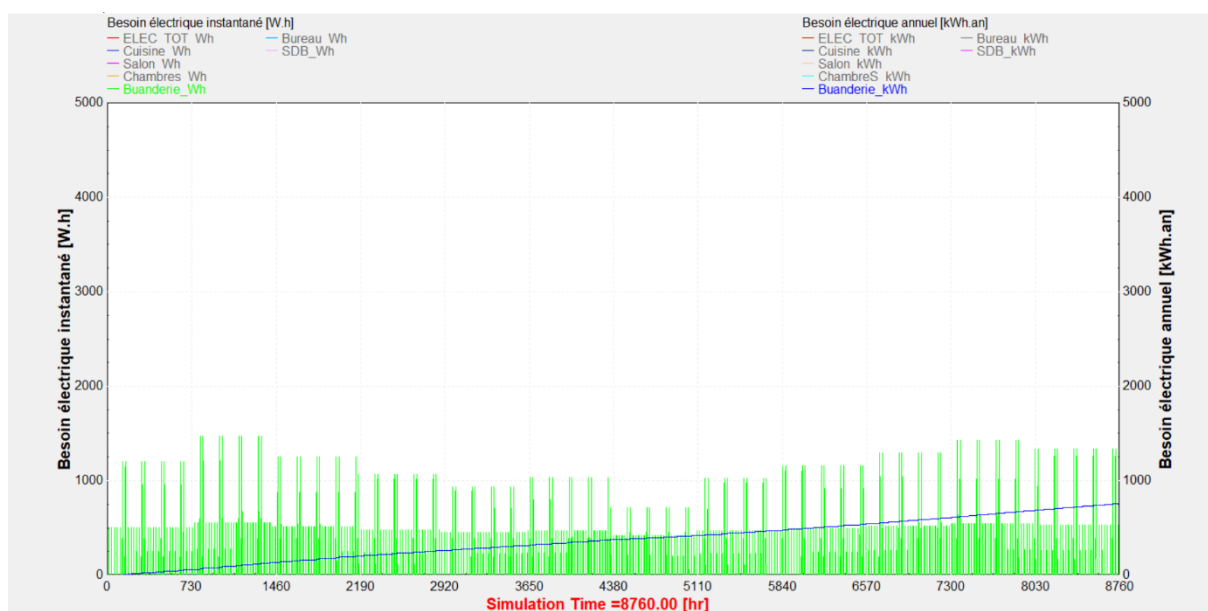


CHAMBRES

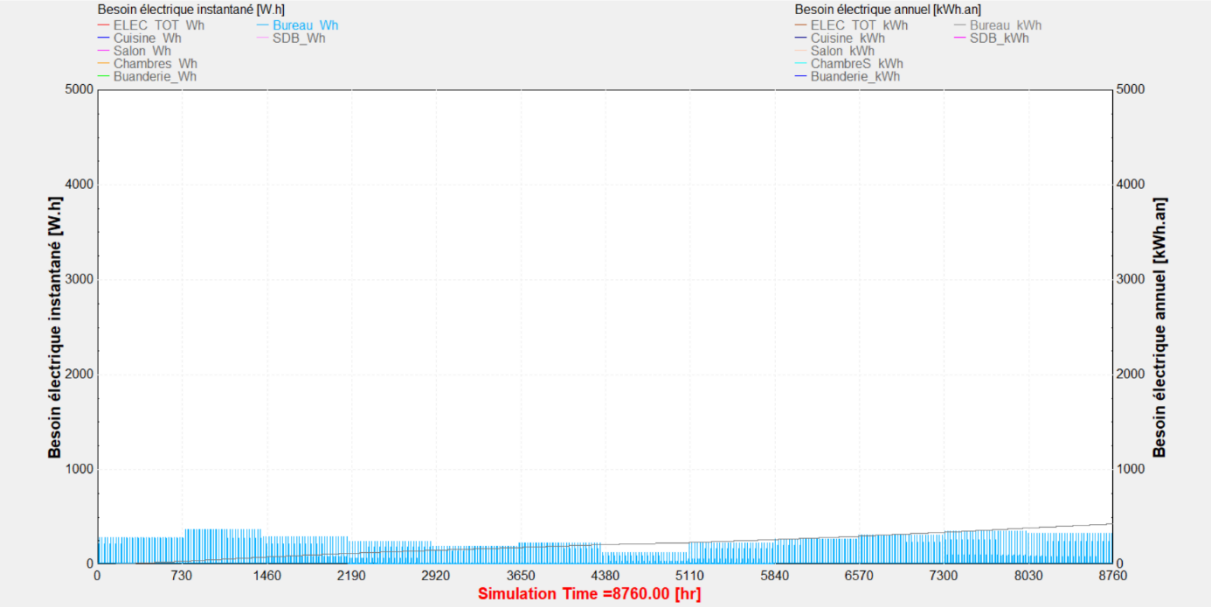




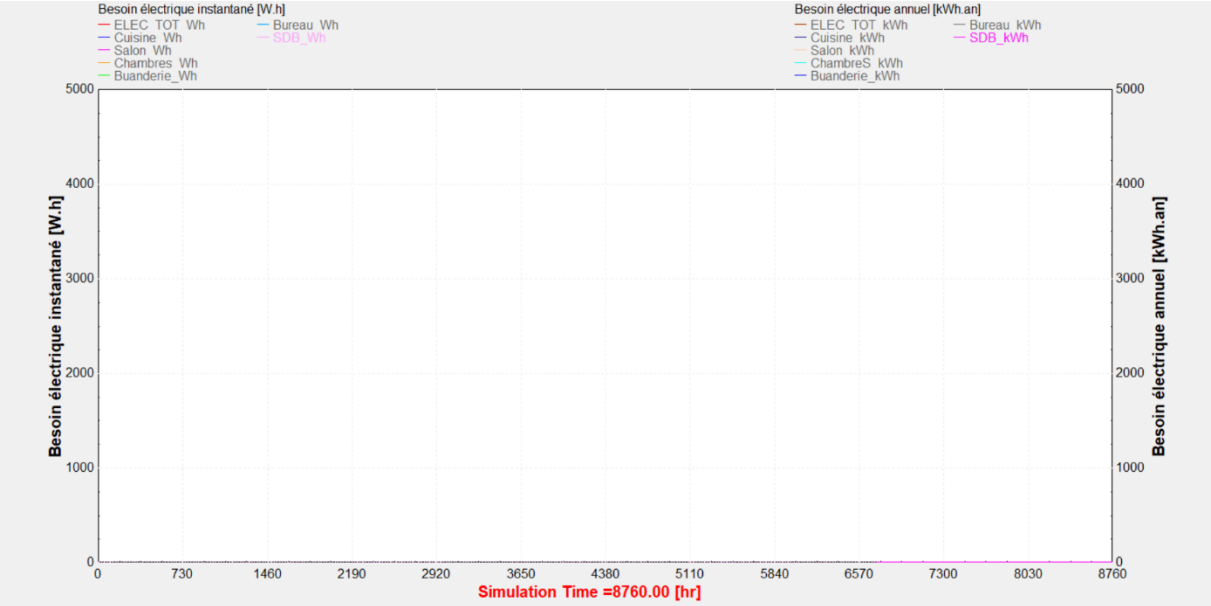
BUANDERIE



BUREAU



SALLE DE BAIN



Annexe 4 : Fiche technique des panneaux solaires et du ballon solaire



Ecosol 2.32 : Le capteur plan le plus performant

Descriptif

Le capteur plan ECOSOL 2.32 est le fruit d'un développement technologique constant de l'entreprise ESE. Les très hautes performances de ce capteur sont atteintes grâce à des innovations fortes:

- Le revêtement sélectif de l'absorbeur «Epsilon» est déposé sous vide sur une tôle de cuivre ce qui le rend très performant: Absorption = 95% et Emissivité = 4%
- L'absorbeur «Solsnake» est composé d'une tôle plane soudée par ultrasons sur un réseau hydraulique en tube de cuivre. Le réseau est réalisé en serpentin continu, permettant un échange optimisé grâce à un écoulement fortement turbulent.
- L'isolation thermique du caisson est tout particulièrement soignée. Elle est réalisée en deux couches successives: une première couche de 20 mm continue de mousse PIR haute T° dans le fond et sur les bords du capteur. La mousse est recouverte par un film d'aluminium pour éviter les pertes par rayonnement IR, sur lequel est disposé un panneau de laine de roche de 25mm d'épaisseur.
- Le vitrage sélectif antireflet permet d'atteindre une transmission de 94%.
- Le collage automatique par colle à chaud du verre sur le châssis acier laqué utilisant une colle à chaude résistante aux UV.



Certifications

- Solar Keymark



- CSTBat



Avantages

Les technologies de fabrication confèrent au capteur ECOSOL d'excellentes propriétés physiques et thermiques. La manipulation, la pose et les raccordements hydrauliques sont simplifiés.

L'esthétique a également été étudiée en conférant au cadre des tons harmonieux.

Ecosol 2.32 peut être fourni avec une option pour intégration en toiture avec accessoires adaptés.



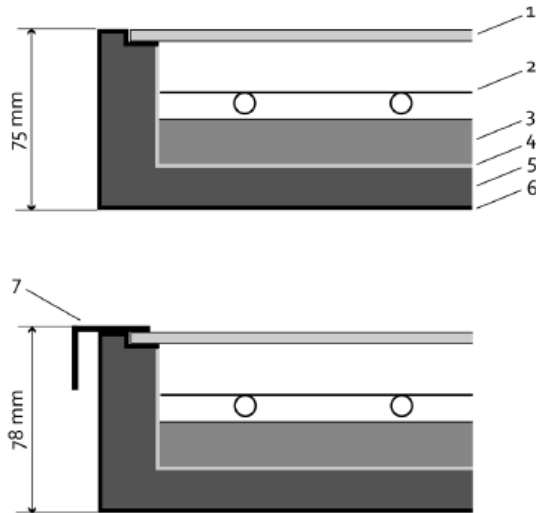
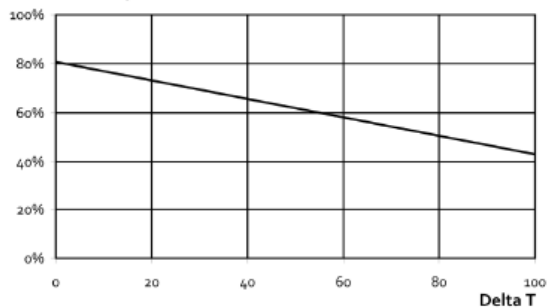


Figure 1 - Capteur plan ECOSOL 2.32 en coupe. 1: Verre trempé 4mm, 2: Absorbeur, 3: 25mm de laine de roche, 4: Film d'aluminium, 5: 20mm de mousse PIR, 6: Cadre, 7: Pare-close pour la version intégrable.

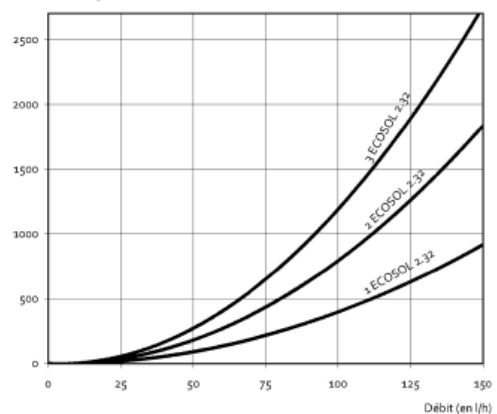
Capteur ECOSOL 2.32	Version standard	Version Intégrable
Coefficient d'absorption		95%
Coefficient d'émissivité IR		4%
Rendement capteur	$\eta_p = 0.807 - a_1 = 3.7660 (W/m^2).K$ $a_2 = 0.0059 (W/m^2).K^2$	
Surface brute	2.48 m ²	2.56 m ²
Ouverture optique		2.32 m ²
Dimensions hors tout (en mm)	2050 x 1210 x 75	2075 x 1235 x 78
Inclinaison mini/maxi	10°-90°	15°-75°
Surface de l'absorbeur		2.32 m ²
Caïsson du capteur	Cadre en acier galvanisé laqué à chaud	
Poids à vide	48 kg	50 kg
Contenance fluide		0.87 l
Pression de service max.		10 bar
Raccords hydrauliques	Cu Ø 10 x 1	
Vitrage	4 mm de verre trempé avec traitement antireflet	
Température de stagnation		193 °C
résistance à l'arrachement		3200 Pa

Caractéristiques techniques

Rendement capteur



Pertes de charge (en mbar)



Accusol : Le réservoir d'énergie solaire

Descriptif

ESE a conçu des accumulateurs parfaitement adaptés aux collecteurs ECOSOL et VACOSOL grâce à l'utilisation de l'interface DYNASOL.

L'ACCUSOL dispose d'un socle pour la mise en place sur sol plat.

L'ACCUSOL est livrable en différentes capacités :

200, 300, 400, 500, 800 et 1000 l.

Deux types sont également disponibles :

Double émaillage, procédé par vitrification à haute température en deux étapes bien distinctes et l'acier inox 316.

L'équipement standard de l'ACCUSOL comporte une anode de protection en magnésium, un thermomètre analogique dans la partie supérieure, un manchon fileté pour recevoir une résistance électrique, plusieurs emplacements pour la mesure de température par sondes, une ouverture dans la partie inférieure donnant accès à l'intérieur du réservoir, une jaquette d'isolation et de protection, dont l'isolation est en polyuréthane dur sans CFC, injecté indirectement sur le réservoir et protégé par un feillard de démontage pour le recyclage futur.

Il est disponible en version 1 échangeur ou 2 échangeurs en fonction de la source d'appoint prévue.

Fonctionnement du produit

L'ACCUSOL est le carrefour des sources d'énergies solaires et d'appoints pour la production d'eau chaude sanitaire. L'échangeur solaire est doté d'une grande surface d'échange et est placé dans la partie inférieure, ce qui permet par le phénomène de convection de chauffer l'entièreté du volume.

Cette convection est favorisée par le fonctionnement en « low flow ».

En effet, étant donné l'excellent rendement de nos capteurs, le fonctionnement à faible débit est permis. Ce type de fonctionnement augmente la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur solaire et permet ainsi la préparation d'eau chaude à température d'utilisation plus rapidement. L'échangeur d'appoint est dimensionné de manière à satisfaire une demande continue d'eau chaude. Il ne chauffe que la partie supérieure étant donné sa position. Les 2/3 inférieurs du volume peuvent ainsi être chauffés par l'énergie solaire. Une résistance électrique peut être placée dans la partie centrale, elle sera alimentée de préférence par un tarif réduit. Le placement d'une vanne mélangeuse à trois voies à la sortie d'eau chaude est fortement conseillé pour des raisons de sécurité et de limitation des pertes de chaleur dans la distribution.



Avantages

Le concept multi énergie de L'ACCUSOL présente de nombreux avantages:

Il intègre tous les appoints possibles: thermique dans la partie supérieure grâce à un serpentin pouvant être raccordé à une chaudière, et muni d'une résistance électrique, L'ACCUSOL est autosuffisant pour la production de l'eau chaude sanitaire. Il est équipé de tous les éléments nécessaires à sa sécurité, protection et contrôle. Ses dimensions et sa position verticale améliorent la stratification.

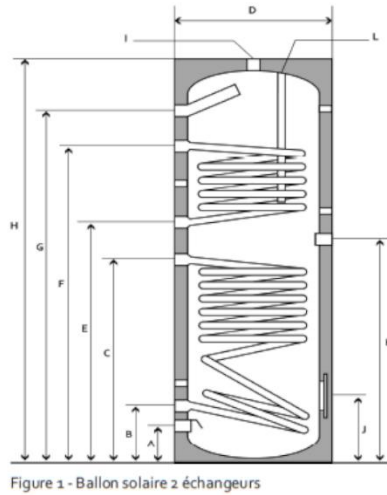


Figure 1 - Ballon solaire 2 échangeurs

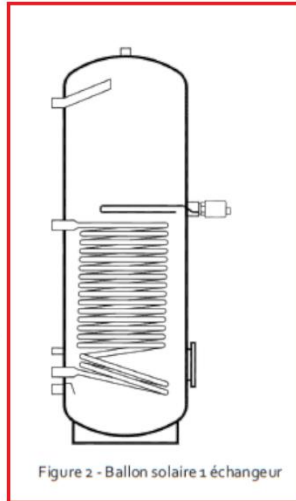


Figure 2 - Ballon solaire 1 échangeur

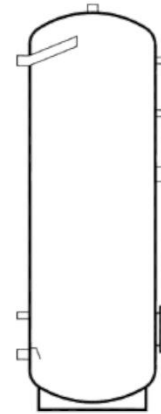


Figure 3 - Ballon tampoon

		ACCUSOL 200	ACCUSOL 300	ACCUSOL 400	ACCUSOL 500	ACCUSOL 800	ACCUSOL 1.000
Hauteur hors tout (en mm)	H	1.215	1.615	1.460	1.690	1.780	2.040
Mesure basculante, diagonale (en mm)		1.375	1.735	1.700	1.900	1.900	
Diamètre isolé (en mm)	D	600	600	750	750	990	990
Capacité (en litres)		212	291	423	500	765	888
Pression d'utilisation max. (en bar)		10	10	10	10	10	10
Isolation en mousse PU (en mm)		50	50	50	50	100	100
Coefficient de pertes thermiques (en W/K)		< 2,3	< 2,8	< 3,2	< 3,6	< 3,9	< 4,1
Température max. d'utilisation (en °C)		95	95	95	95	95	95
Poids à vide, non équipé (en kg)		95	130	150	170	220	265
Piquage pour anode	L	1" 1/4 F	1" 1/4 F	1" 1/4 F	1" 1/4 F	1" 1/2 F	1" 1/2 F
Piquage ECS - taille	I	1" 1/4 F	1" 1/4 F	1" 1/4 F	1" 1/4 F		
Piquage ECS - taille	G	1" F	1" F	1" F	1" F	1" 1/4 M	1" 1/4 M
hauteur (en mm)		1.070	1.390	1.185	1.415	1.455	1.700
Piquage EF - taille	A	1" F	1" F	1" F	1" F	1" 1/4 M	1" 1/4 M
hauteur (en mm)		220	220	265	265	210	210
Trappe de visite 180/120 (en mm)	J	320	320	365	365	435	440
Piquage pour thermoplongeur électrique - taille	K	1" 1/2 F	1" 1/2 F	1" 1/2 F	1" 1/2 F	935	1.085
hauteur (en mm)		810	955	835	960	1" 1/2 F	1" 1/2 F

Annexe 5 : Influence du châssis sur les consommations mensuelles de chauffage

	measured 2004-2005	measured 2006-2007	moyenne 2004-2007	3a ; g = 0,20 U = 2,22 W/m	3b ; g = 0,20 U = 0,28 W/m	3c ; g = 0,20 U = 6,11 W/m
janvier	2,51	1,92	2,20	2,38	2,21	2,57
février	2,33	1,77	2,01	1,96	1,81	2,12
mars	2,16	1,57	1,82	1,68	1,53	1,84
avril	1,68	1,03	1,27	0,80	0,70	0,92
mai	0,80	0,30	0,55	0,49	0,42	0,56
juin	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02
juillet	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
août	0,89	0,21	0,57	0,00	0,00	0,00
septembre	1,65	1,12	1,33	0,00	0,00	0,01
octobre	2,04	1,33	1,70	0,71	0,60	0,82
novembre	2,30	1,74	1,99	1,65	1,51	1,80
décembre	2,45	1,83	2,10	1,56	1,43	1,70
TOT kWh						
MBE				-28	-34	-21
CV (RMSE)				33	32	35

Tableau 30 : Consommations mensuelles de chauffage mesurées et simulées (essai 2b)

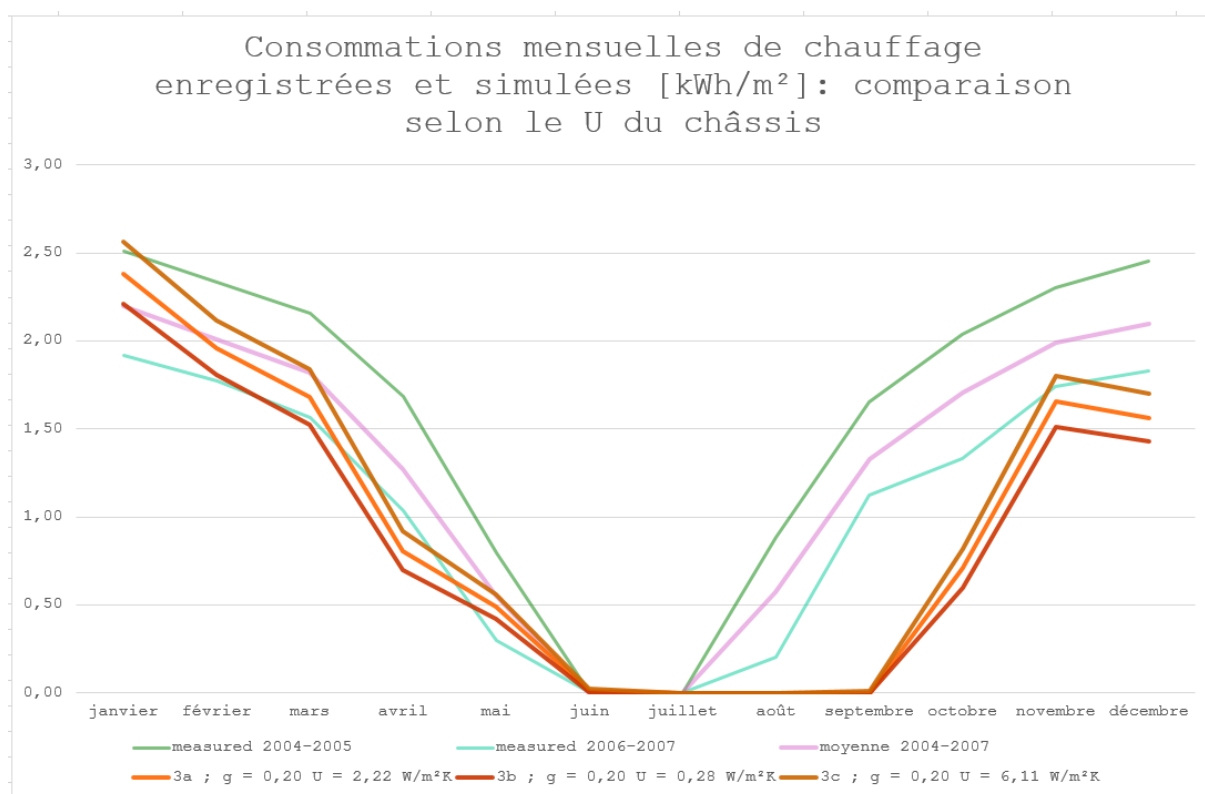
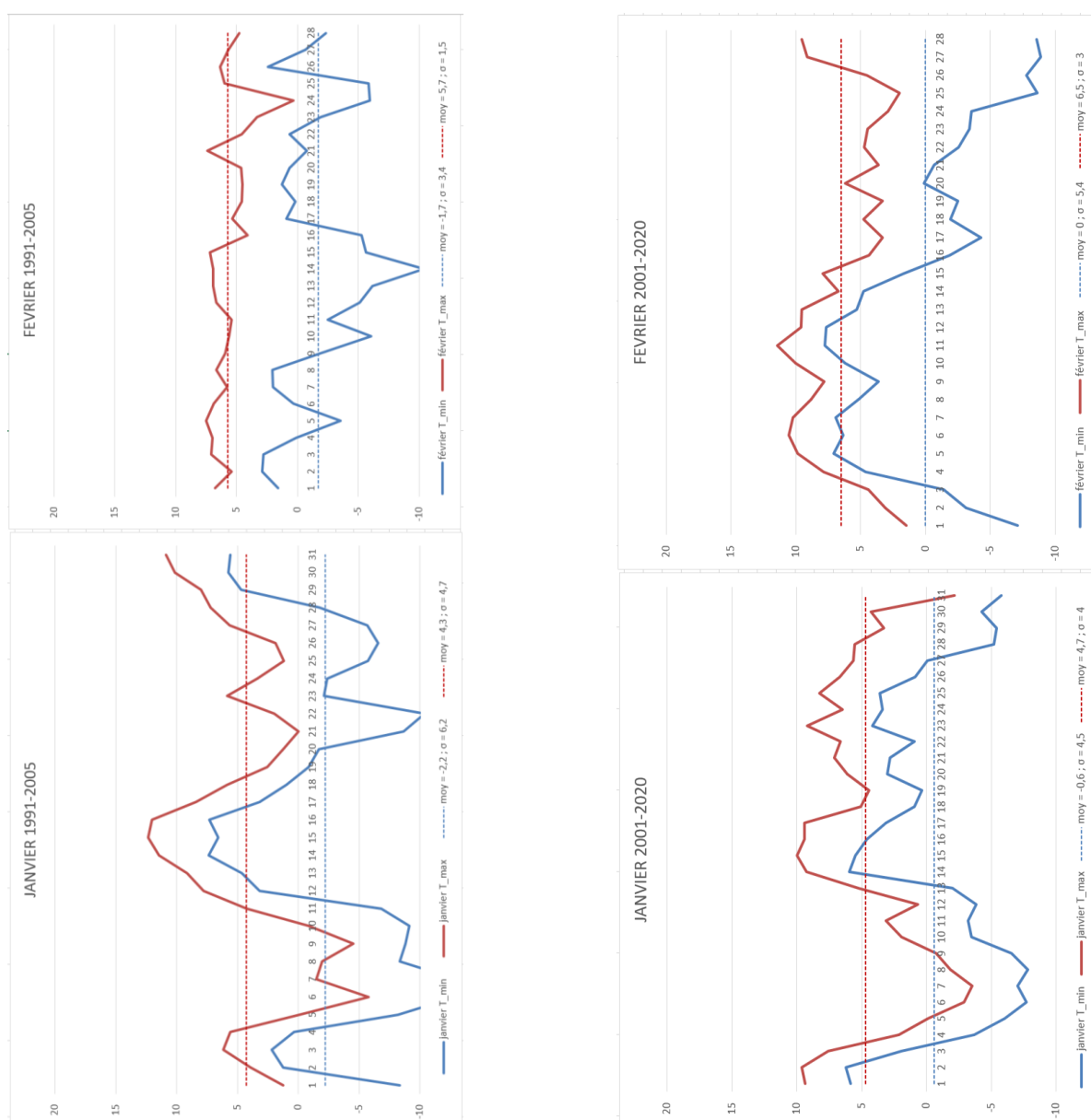
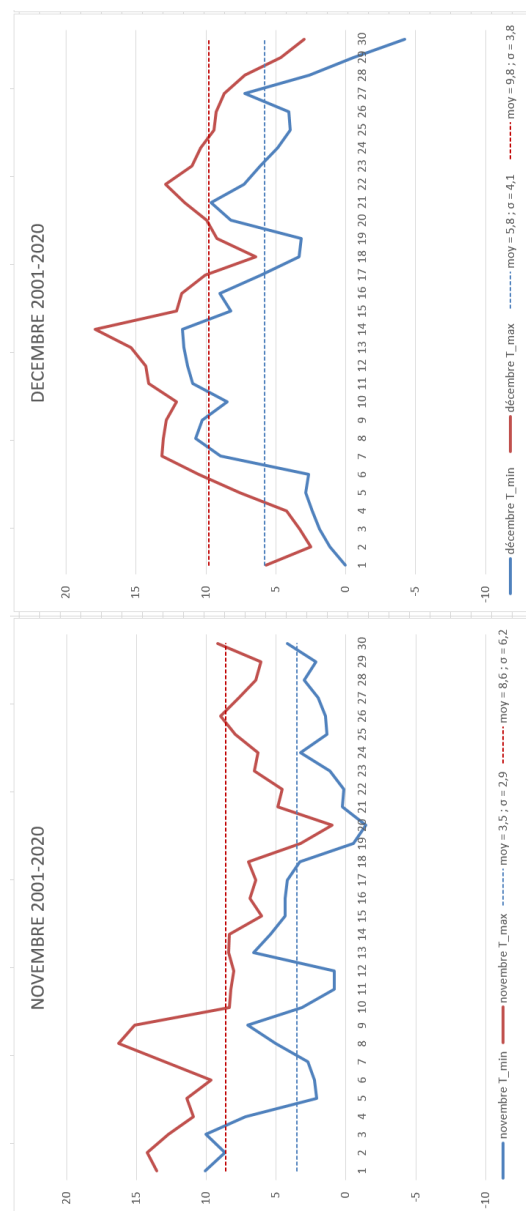
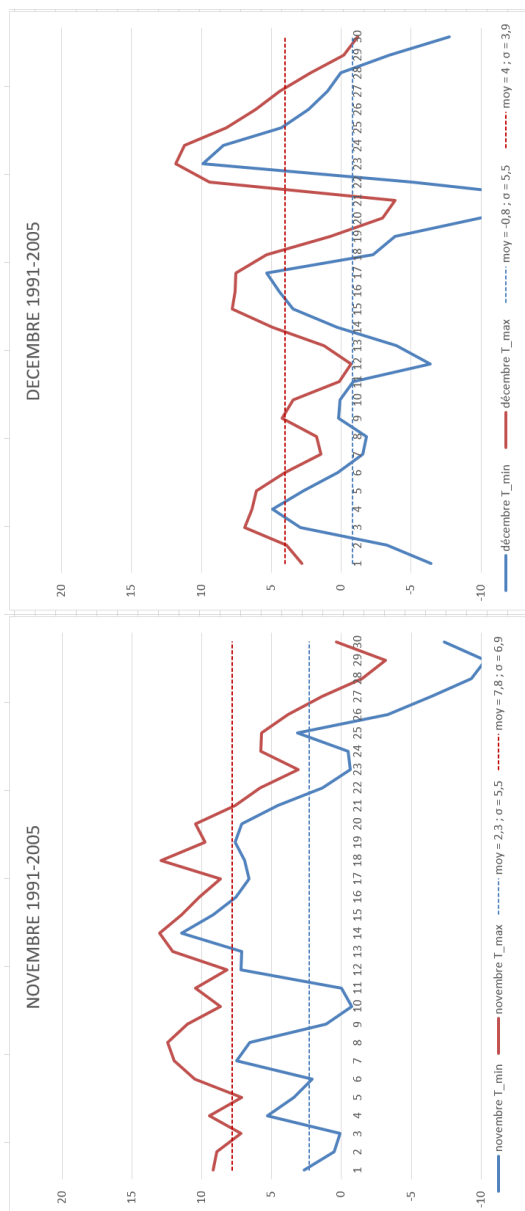
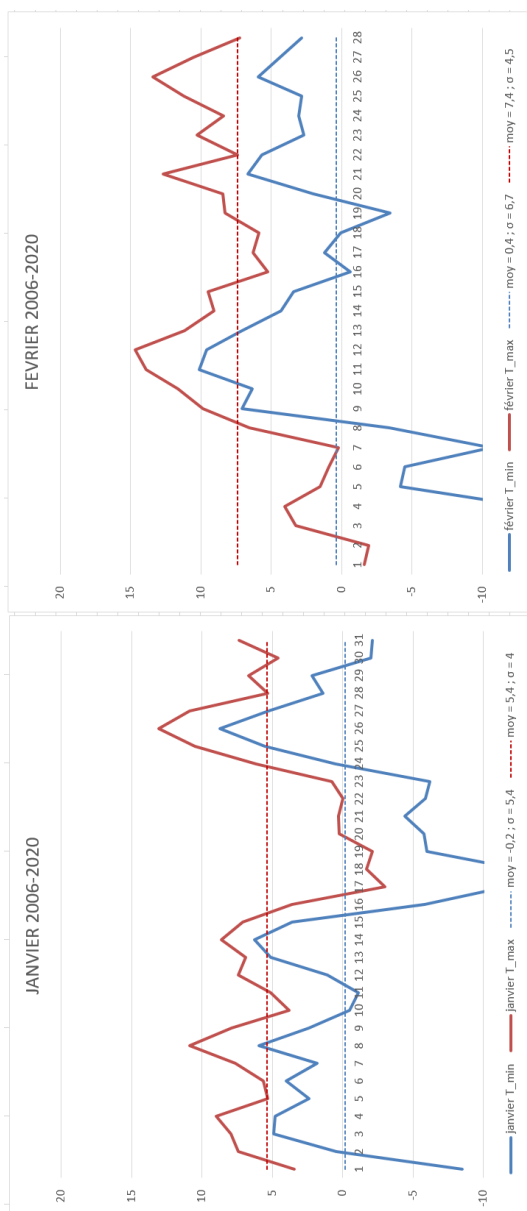


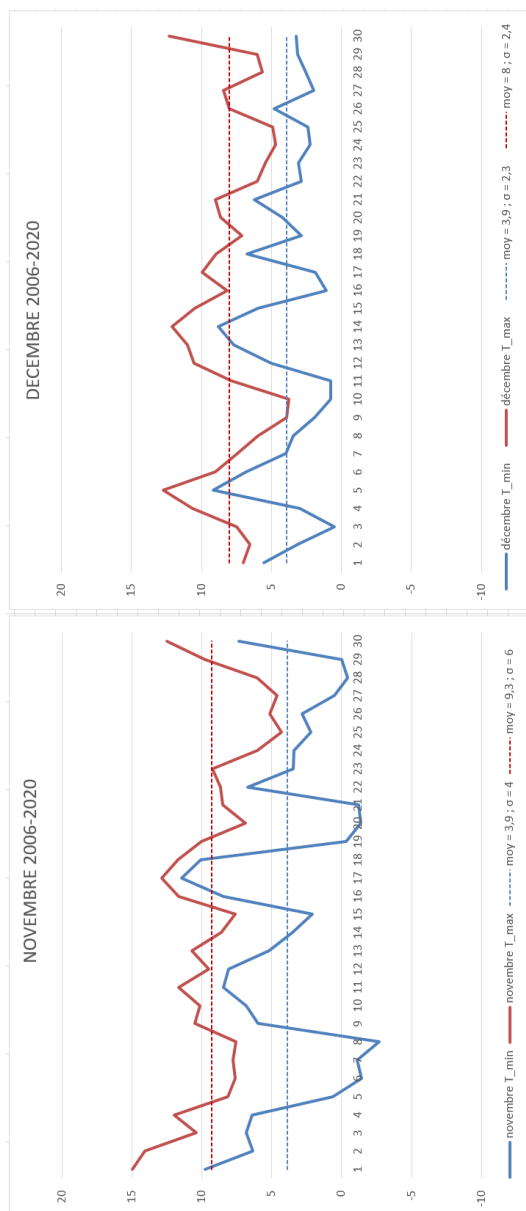
Figure 59 : Profils annuels des consommations de chauffage mesurées et simulées (essai 2b)

Annexe 6 : Températures hivernales des fichiers météo TMY 1991-05, 2001-20 et 2006-20

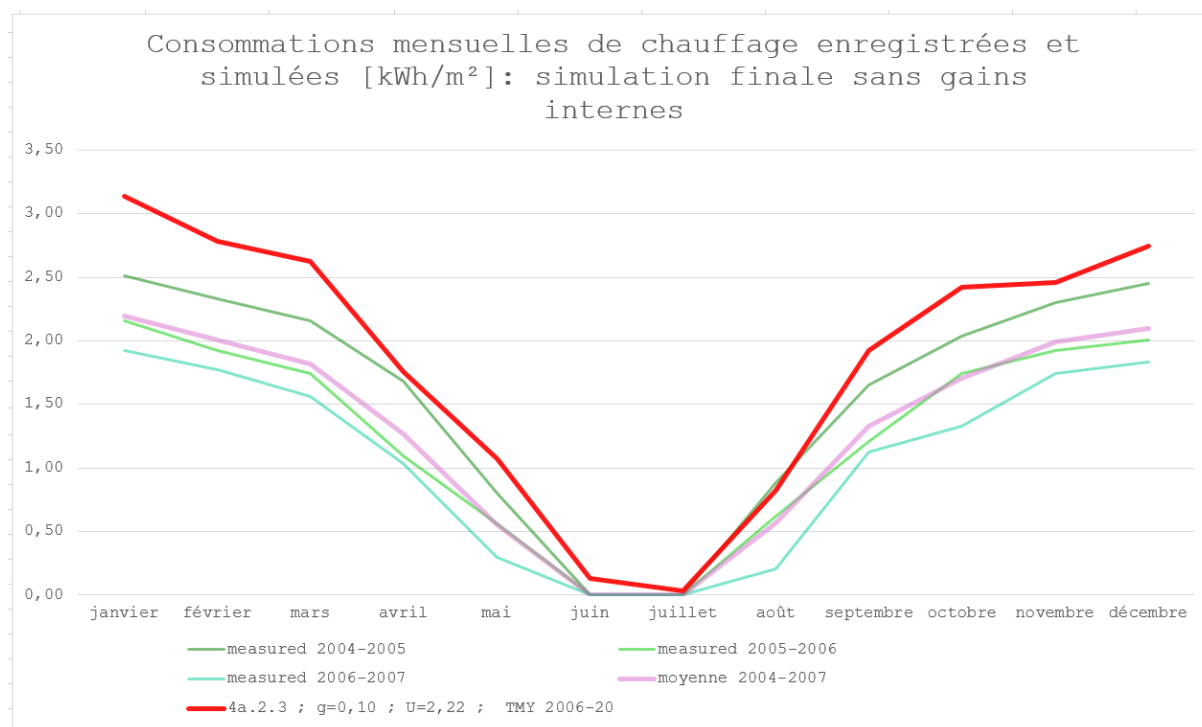








Annexe 7 : Influence des gains internes sur les consommations mensuelles de chauffage



	measured 2004-2005	measured 2005-2006	measured 2006-2007	moyenne 2004-2007	4a.2.3 ; g=0,10 ; TMY 2006-20
janvier	2,51	2,16	1,92	2,20	3,14
février	2,33	1,92	1,77	2,01	2,78
mars	2,16	1,74	1,57	1,82	2,62
avril	1,68	1,09	1,03	1,27	1,76
mai	0,80	0,56	0,30	0,55	1,08
juin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13
juillet	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
août	0,89	0,62	0,21	0,57	0,83
septembre	1,65	1,21	1,12	1,33	1,92
octobre	2,04	1,74	1,33	1,70	2,42
novembre	2,30	1,92	1,74	1,99	2,46
décembre	2,45	2,01	1,83	2,10	2,75
TOT kWh				15,54	21,91
MBE	16%	46%	71%	41%	< 5%
CV (RMSE)	12%	24%	33%	21%	< 15 %

Annexe 8 : Fiche technique de la PAC

Vitocal 222-S (suite)

2.2 Caractéristiques techniques

Données techniques

Appareils 230 V

Types AWT/AWT-AC	221.A04	221.A05	221.A07	221.A10	221.A13
Performances de chauffage selon EN 14511 (A2/W35)					
Puissance nominale kW	3,00	3,70	5,60	7,70	10,60
Vitesse du ventilateur tr/mn	870	500	650	650	650
Puissance électr. absorbée kW	0,91	1,06	1,73	2,20	3,25
Coefficient de performance ε (COP) en mode chauffage	3,27	3,50	3,24	3,50	3,26
Régulation de puissance kW	1,10 à 3,80	1,30 à 6,50	1,30 à 7,70	4,40 à 9,90	5,00 à 11,90
Performances de chauffage selon EN 14511 (A7/W35, écart 5 K)					
Puissance nominale kW	4,50	5,40	8,39	10,90	14,60
Vitesse du ventilateur tr/mn	870	500	650	650	650
Débit volumique de l'air m³/h	2090	2600	3600	4210	4210
Puissance électr. absorbée kW	0,97	1,13	1,93	2,36	3,40
Coefficient de performance ε (COP) en mode chauffage	4,64	4,79	4,35	4,62	4,29
Régulation de puissance kW	1,20 à 5,30	1,80 à 8,40	1,80 à 9,50	5,00 à 14,00	5,00 à 16,10
Performances de chauffage selon EN 14511 (A-7/W35)					
Puissance nominale kW	3,20	5,00	6,60	8,72	9,14
Puissance électr. absorbée kW	1,27	1,91	2,68	3,46	3,70
Coefficient de performance ε (COP) en mode chauffage	2,58	2,61	2,49	2,55	2,47
Performances de rafraîchissement selon EN 14511 (type AWB-AC uniquement) (A35/W7, écart de 5 K)					
Puissance de rafraîchissement nominale kW	3,20	4,62	6,20	7,40	9,10
Vitesse du ventilateur tr/mn	870	500	650	650	650
Puissance électr. absorbée kW	1,08	1,64	2,40	2,69	3,64
Coefficient de performance EER	2,96	2,81	2,58	2,75	2,50
Régulation de puissance kW	1,20 à 3,80	1,60 à 7,00	1,60 à 8,00	2,40 à 8,50	2,40 à 10,00
Performances de rafraîchissement selon EN 14511 (type AWB-AC uniquement) (A35/W18, écart de 5 K)					
Puissance de rafraîchissement nominale kW	4,20	6,30	8,80	10,00	12,60
Vitesse du ventilateur tr/mn	870	500	650	650	650
Puissance électr. absorbée kW	1,13	1,52	2,63	2,80	4,20
Coefficient de performance EER	3,72	4,14	3,35	3,57	3,00
Température d'entrée d'air					
Mode rafraîchissement (type AWB-AC)					
– Mini. °C	15	15	15	15	15
– Maxi. °C	45	45	45	45	45
Mode chauffage					
– Mini. °C	–15	–15	–15	–15	–15
– Maximum °C	35	35	35	35	35
Eau de chauffage (circuit secondaire)					
Capacité l	16,7	16,7	16,7	17,7	17,7
Débit volumique minimal l/h	750	1000	1000	1600	1600
Volume minimal de l'installation de chauffage (sans dispositif de verrouillage) l	25	50	50	50	50
Perte de pression externe maxi. (RFH) mbar	450	400	400	450	450
au débit volumique minimal kPa	45	40	40	45	45
Température de départ maxi. °C	55	55	55	55	55
Paramètres électriques de l'unité extérieure					
1/N/PE 230 V/50 Hz					
– Tension nominale du compresseur					
– Intensité de service maxi. du compresseur A	13,5	15,7	15,7	19,6	26,5
– Intensité de démarrage du compresseur A	11	15	15	10	10
– Intensité de démarrage du compresseur avec rotor bloqué A	20	25	25	25	32
– Protection par fusibles	1 x B16A	1 x B16A	1 x B16A	1 x B20A	1 x B32A
– Indice de protection IP	X4	X4	X4	X4	X4

5817 539 B1f

Courbes (suite)

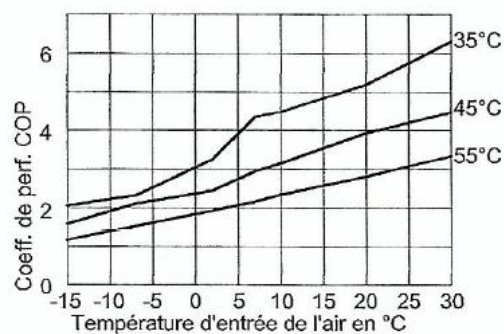
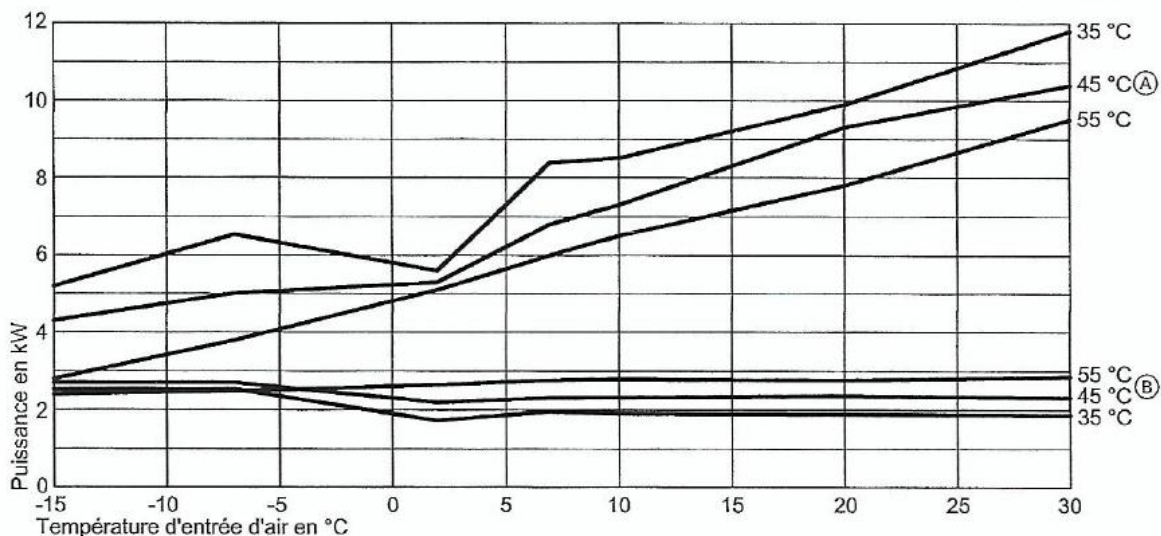
5.3 Diagrammes de puissance de l'unité extérieure 7 kW, 230 V

Chauffage

Pompe à chaleur

■ Vitocal 200-S, type
AWB 201.B07
AWB-E 201.B07

AWB-AC 201.B07
■ Vitocal 222-S, type
AWT 221.A07
AWT-AC 221.A07
■ Vitocal 242-S, type
AWT 241.A07
AWT-AC 241.A07



Courbes de chauffe en fonction de la température de départ :

- (A) Puissance calorifique pour des températures de départ 35 °C, 45 °C, 55 °C
- (B) Puissance électrique absorbée en chauffage pour des températures de départ 35 °C, 45 °C, 55 °C

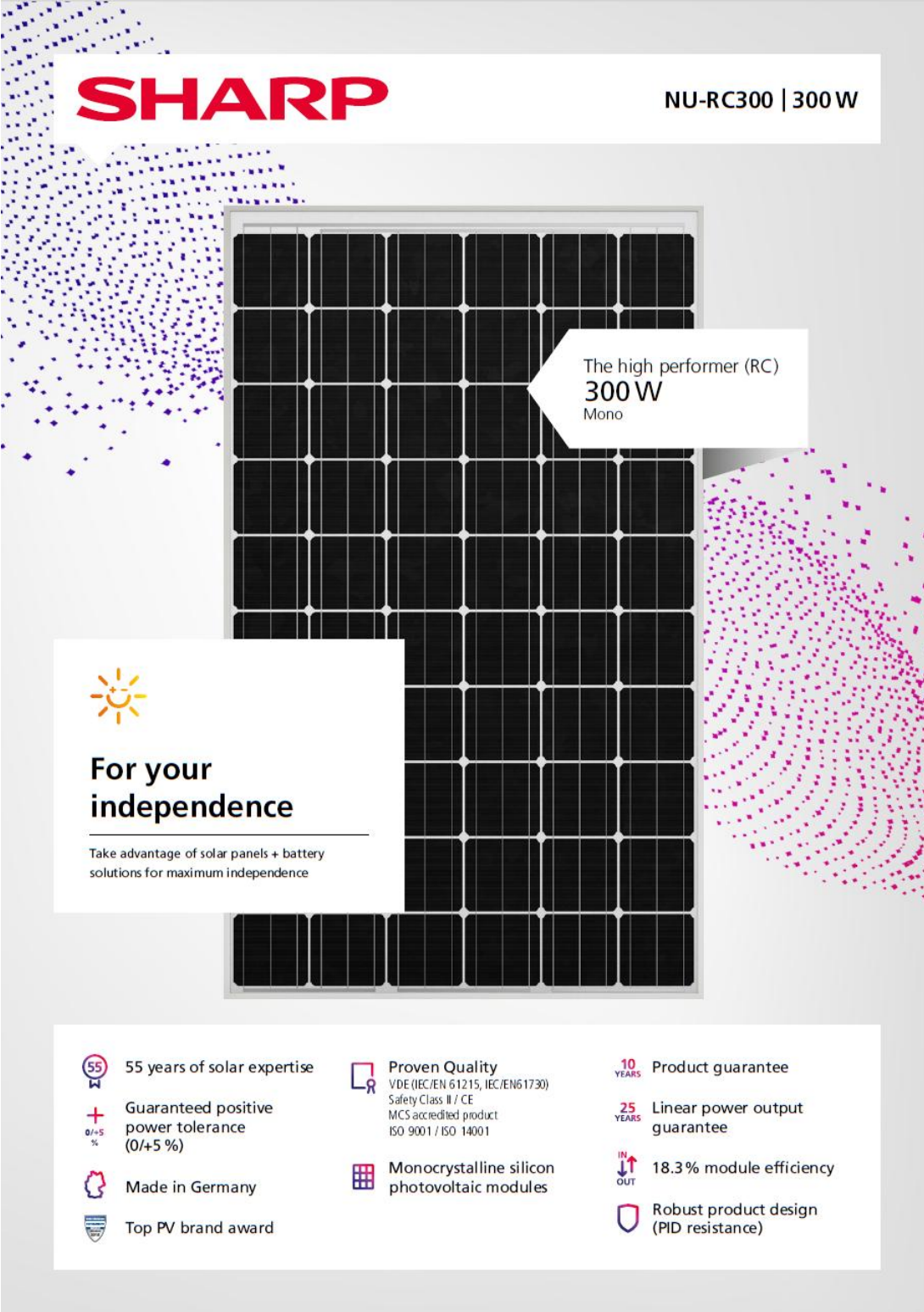
Remarque

- Les données pour le COP des tableaux et diagrammes ont été déterminées en se basant sur la norme EN 14511.
- Ces performances s'appliquent aux appareils neufs avec échangeurs de chaleur à plaques propres.

Point de fonctionnement	W	°C	35						
	A	°C	-15	-7	2	7	10	20	30
Puissance calorifique		kW	5,20	6,60	5,60	8,38	8,50	9,90	11,80
Puissance électr. absorbée		kW	2,53	2,68	1,73	1,93	1,91	1,90	1,86
Coefficient de performance ε (COP)			2,06	2,49	3,50	4,35	4,48	5,19	6,31


Point de fonctionnement	W	°C	45						
	A	°C	-15	-7	2	7	10	20	30
Puissance calorifique		kW	4,30	5,00	5,30	6,80	7,30	9,30	10,40
Puissance électr. absorbée		kW	2,70	2,70	2,19	2,31	2,32	2,36	2,32
Coefficient de performance ε (COP)			1,59	2,11	2,44	2,94	3,15	3,93	4,47











Annexe 9 : Fiche technique des panneaux photovoltaïques



SHARP NU-RC300 | 300 W

The high performer (RC)
300 W
Mono


For your independence
Take advantage of solar panels + battery solutions for maximum independence

 55 years of solar expertise	 Proven Quality VDE (IEC/EN 61215, IEC/EN 61730) Safety Class II / CE MCS accredited product ISO 9001 / ISO 14001	 10 YEARS Product guarantee
 Guaranteed positive power tolerance (0/+5 %)	 Monocrystalline silicon photovoltaic modules	 25 YEARS Linear power output guarantee
 Made in Germany	 18.3% module efficiency	 Robust product design (PID resistance)
 Top PV brand award		

Electrical data (STC)

NU-RC300			
Maximum power	P_{max}	300	W_p
Open-circuit voltage	V_{oc}	39.4	V
Short-circuit current	I_{sc}	9.97	A
Voltage at point of maximum power	V_{mp}	31.2	V
Current at point of maximum power	I_{mp}	9.63	A
Module efficiency	η_m	18.3	%

STC = Standard Test Conditions: irradiance 1,000 W/m², AM 1.5, cell temperature 25 °C.

Rated electrical characteristics are within $\pm 10\%$ of the indicated values of I_{sc} , V_{oc} and 0 to +5% of P_{max} (power measurement tolerance $\pm 3\%$).

Reduction of efficiency from an irradiance of 1,000 W/m² to 200 W/m² (Tmodule = 25 °C) is less than 2%.

Electrical data (NOCT)

NU-RC300			
Maximum power	P_{max}	220	W_p
Open-circuit voltage	V_{oc}	36.3	V
Short-circuit current	I_{sc}	8.07	A
Voltage at point of maximum power	V_{mp}	28.5	V
Current at point of maximum power	I_{mp}	7.72	A
Module efficiency	η_m	16.7	%

Electrical values measured under nominal operating conditions of cells : 800 W/m² irradiance, air temperature of 20 °C, wind speed of 1 m/s. NOCT : 48 °C (nominal operating cell temperature).

Mechanical data

Length	1,660 mm
Width	990 mm
Depth	50 mm
Weight	20 kg

Temperature coefficient

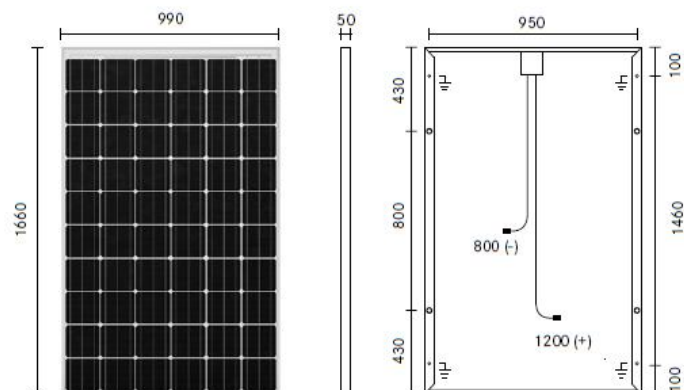
P_{max}	-0.40 %/°C
V_{oc}	-0.29 %/°C
I_{sc}	0.05 %/°C

Limit values

Maximum system voltage	1,000 V
Over-current protection	20 A
Temperature range	-40 bis 85° C
Max. mechanical load (snow/wind)	2,400 Pa

Tested snow load (IEC61215 test pass*) 5,400 Pa

Dimensions (mm)



*Please refer to Sharp's installation manual for details.

General data

Cells	monocrystalline, 156 mm x 156 mm, 60 cells in series
Front glass	low iron tempered glass, 3.2 mm
Frame	anodized aluminium alloy, silver
Connection box	PPE/PPO resin, IP67 Rating, 148 x 123 x 27 mm, 3 bypass diodes
Cable	CE cable, length 1,200 mm (+), 800 mm (-)
Connector	MC4

Packaging data

Modules per pallet	22 pcs
Pallet size (L x W x H)	1.2 m x 1.0 m x 1.85 m
Pallet weight	approx. 477 kg
Modules packed in one carton	22 pcs



www.sharp.eu

SHARP

Contact Sharp

SHARP ENERGY SOLUTIONS EUROPE
A DIVISION OF SHARP ELECTRONICS (EUROPE) LTD.
SONNINSTR. 3
20097 HAMBURG
GERMANY
T: +49 (0) 40 / 2376-2436
F: +49 (0) 40 / 2376-2193

Contact Installer

Local responsibility: **Benelux** SolarInfo.seb@sharp.eu, **France** SolarInfo.fr@sharp.eu, **Germany** SolarInfo.de@sharp.eu, **Poland** energy-info.pl@sharp.eu
Spain & Portugal SolarInfo.es@sharp.eu, **United Kingdom** SolarInfo.uk@sharp.eu, **Other countries** SolarInfo.Europe@sharp.eu

Note: Technical data is subject to change without prior notice. Before using Sharp products, please request the latest data sheets from Sharp. Sharp accepts no responsibility for damage to devices which have been equipped with Sharp products on the basis of unverified information. The specifications may deviate slightly and are not guaranteed. Installation and operating instructions are to be found in the corresponding handbooks, or can be downloaded from www.sharp.eu/solar. This module should not be directly connected to a load.

NU-RC300_07716EN