

## Mémoire

**Auteur :** Bayart, Tina

**Promoteur(s) :** Abrahams, Pauline; 24161

**Faculté :** Faculté des Sciences

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

**Année académique :** 2023-2024

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/20818>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

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

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

---

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

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

# **EVALUATION DE LA RÉSILIENCE THERMIQUE D'UNE CONSTRUCTION WALLONNE INTELLIGENTE FACE AUX VARIATIONS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

**TINA BAYART**

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

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

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

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2023-2024**

**RÉDIGÉ SOUS LA DIRECTION DE PAULINE ABRAHAMS (ULIEGE) ET FADI FIKANI (UNILU)**

**COMITÉ DE LECTURE :**  
**ELISABETH DAVIN**  
**PHILIPPE ANDRÉ**

## Copyright

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

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

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : BAYART Tina [bayart.tina@gmail.com](mailto:bayart.tina@gmail.com)

## REMERCIEMENTS

---

Avec une immense gratitude, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ma promotrice de mémoire, Madame Pauline Abrahams, pour ses conseils avisés, son expertise précieuse et sa disponibilité tout au long de ce projet de rédaction et qui ont été essentiels à l'avancement de mes recherches.

Je tiens également à remercier tous les membres du corps professoral de l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg pour la qualité de leurs enseignements. Enfin, je remercie mon maître de stage et mes collègues dont les échanges enrichissants ont nourri ma réflexion.

Je remercie chaleureusement mes sœurs, et Esteban pour leur patience et leur soutien infailible tout au long de mes études et durant cette ultime étape de rédaction. Leur amour et leurs encouragements ont été une source de motivation inestimable.

Enfin, un remerciement particulier va à mes parents pour m'avoir donné l'opportunité de poursuivre des études supérieures. Plus encore, ce sont eux qui, dès mon plus jeune âge, ont su éveiller en moi une sensibilité particulière, une curiosité et une soif de connaissance pour les enjeux environnementaux. Leur ouverture d'esprit et leur engagement envers la nature ont grandement influencé mes choix d'étude et mes orientations professionnelles, me permettant ainsi d'être une citoyenne avertie des prochains enjeux du siècle.

A tous, merci.



## ABSTRACT

---

In an increasingly connected world where climate impacts are already being felt, this thesis explores the thermal resilience of intelligent buildings to changing weather conditions. By clarifying the concept of intelligent buildings and outlining the theoretical framework of thermal resilience, this study assesses the thermal performance of a standard new Walloon building through dynamic simulations using TRNSYS software. The aim is to analyze the thermal resilience of intelligent buildings to climate change by establishing several levels of intelligence and proposing a thermal resilience index that takes various parameters into account. The results show that, under current and future weather conditions, high levels of intelligence do not significantly improve the thermal resilience of the building. However, passive intelligence stands out by preserving a certain thermal resilience in the face of climate change and maintaining occupant comfort. Passive intelligence proves to be the essential foundation on which active intelligence can be added.

### ***Keywords***

Intelligent buildings, SMART buildings, climate change, Wallonia, thermal resilience

## RÉSUMÉ

---

Dans un monde de plus en plus connecté où les répercussions climatiques sont déjà perceptibles, ce mémoire examine la résilience thermique des bâtiments intelligents face aux conditions météorologiques changeantes. En précisant le concept de bâtiment intelligent et en développant le cadre théorique de la résilience thermique, cette étude évalue la performance thermique d'une nouvelle construction standard wallonne à l'aide des simulations dynamiques réalisées avec le logiciel TRNSYS. L'objectif est d'analyser la résilience thermique des bâtiments intelligents face au changement climatique en définissant plusieurs niveaux d'intelligence et en proposant un indice de résilience thermique prenant en compte divers paramètres. Les résultats démontrent que, sous les conditions météorologiques actuelles et futures, les niveaux élevés d'intelligence ne permettent pas d'améliorer la résilience thermique du bâtiment. Toutefois, l'intelligence passive se distingue en préservant une certaine résilience thermique face au changement climatique et en maintenant le confort des occupants. L'intelligence passive se révèle être le fondement essentiel sur lequel l'intelligence active peut être ajoutée.

### ***Mots-clés***

Bâtiments intelligents, changement climatique, Wallonie, résilience thermique

## TABLE DES MATIERES

I.	Table des abréviations .....	3
II.	Table des unités .....	3
III.	Liste des figures .....	4
IV.	Liste des tableaux.....	5
V.	Introduction .....	1
A.	Le changement climatique.....	2
1.	Les différents scénarios du changement climatique .....	2
2.	La vulnérabilité des bâtiments.....	5
B.	L'enjeu des bâtiments intelligents .....	6
VI.	Problématique.....	7
VII.	L'état de l'art .....	8
A.	Les bâtiments intelligents.....	8
1.	Définition.....	8
2.	Distinction entre les bâtiments intelligents, automatisés et les SMART buildings .....	11
3.	Les besoins de confort dans le bâtiment.....	12
4.	Les technologies des bâtiments intelligents.....	14
5.	Les indicateurs d'intelligence dans les bâtiments .....	21
6.	Les avantages des bâtiments intelligents .....	24
7.	Les limites des bâtiments intelligents.....	24
B.	La résilience .....	26
1.	Définition.....	26
2.	Distinction entre résilience, résistance, adaptabilité et ductilité.....	27
3.	La résilience climatique.....	27
4.	La résilience dans les bâtiments.....	29
5.	La résilience thermique des bâtiments .....	30
VIII.	Méthodologie.....	34
A.	Validation du modèle de référence.....	35
B.	Détermination des niveaux d'intelligence .....	36
C.	Détermination de l'indicateur de résilience thermique.....	37
D.	Simulation avec les données actuelles .....	39
E.	Simulation avec les données du changement climatique.....	41
F.	Collecte de données et analyse .....	44
G.	Présentation du bâtiment de référence .....	44
1.	Plans et zonage.....	44
1.	Systèmes .....	48
2.	Modélisation Sketchup .....	49
3.	Encodage TRNBuild .....	49
4.	Évaluation du niveau d'intelligence du bâtiment de référence.....	54
IX.	Exposition des paramètres des simulations.....	55

1.	Modèle de référence simulation actuelle (M RSA) – Modèle de référence simulation future (M RSF).....	55
2.	Intelligence passive simulation actuelle (IPSA) – Intelligence passive simulation future (IPSF).....	55
3.	Intelligence active simulation actuelle (IASA) – Intelligence active simulation future (IASF) ....	56
4.	Intelligence interactive simulation actuelle (IISA) – Intelligence interactive simulation future (IISF).....	59
X.	Exposition des résultats globaux des simulations.....	62
XI.	Analyse et interprétation des résultats.....	64
A.	Première interprétation .....	64
B.	Analyse des différentes simulations.....	65
1.	M RSA .....	65
2.	IPSA .....	66
3.	IASA.....	66
4.	IISA .....	67
5.	M RSF.....	68
6.	IPSF.....	69
7.	IASF.....	70
8.	IISF.....	71
C.	Analyse critique de la méthodologie et des résultats .....	72
XII.	Discussion des résultats.....	73
A.	Évolution de la demande en refroidissement .....	73
B.	Évolution de la demande en chauffage.....	74
C.	Évaluation de la résilience thermique.....	75
1.	Résumé et évaluation de la résilience thermique des simulations présentées.....	78
XIII.	Conclusion .....	79
XIV.	Bibliographie .....	I
XV.	Annexes .....	X
A.	Annexe 1 : Tableau des compositions de parois .....	X
B.	Annexe 2 : Tableau des compositions des parois composées.....	X
C.	Annexe 3 : Représentation des murs, planchers et plafonds encodés dans TRNBuild .....	XII
D.	Annexe 4 : Tableau des surfaces vitrées.....	XIII
E.	Annexe 5 : Tableau des gains internes .....	XIII
F.	Annexe 6 : Performance Énergétique du bâtiment (PEB) .....	XIV
G.	Annexe 7 : zoom sur la zone de Vide sur Séjour.....	XV
H.	Annexe 8 : Fiche projet du modèle de référence.....	XVI

## I. Table des abréviations

GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
SSP	Shared Socio-economic Pathways
GSB	Green smart building
BI	Bâtiment intelligent
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
HVAC	Chauffage, ventilation et refroidissement
BAS	Building automation system
EIS	Energy information system
AOS	Automatic optimisation system
IP	Internet protocole
HTTP	Hyptertexte transfert protocole
SRI	Smart readiness indicator
R2S	Ready to service
IBI	Intelligent building index
AIIB	Institut asiatique des bâtiments intelligents
LEED	Leadership in energy and environmental design
USGBC	U.S Green building council
PEER	Performance excellence in electricity renewal
ECS	Eau chaude sanitaire
MRSA	Modèle de référence simulation actuelle
IPSA	Intelligence passive simulation actuelle
IASA	Intelligence active simulation actuelle
IISA	Intelligence interactive simulation actuelle
MRSF	Modèle de référence simulation future
IPSF	Intelligence passive simulation future
IASF	Intelligence active simulation future
IISF	Intelligence interactive simulation future

## II. Table des unités

°C	Degré Celsius
°F	Degré Fahrenheit
K	Kelvin
kW	kilowatt
kWh	kilowattheure
J	Joule
g	gramme
h	heure
m	mètre

### III. Liste des figures

---

Figure 1: Représentations des différents scénarios d'élévation de la température moyenne en fonction des émissions de gaz à effet de serre. (Calvin et al., 2023).....	2
Figure 2: Évolutions projetées de la température maximale quotidienne annuelle, de l'humidité totale moyenne de la colonne de sol et des précipitations maximales journalières annuelles au niveau de réchauffement global de 1,5°C, 2°C, 3°C et 4°C par rapport à la période 1850-1900. (Calvin et al.,2023).....	3
Figure 3: Représentation de l'influence du changement climatique sur les bâtiments (Lepage, 2021).....	5
Figure 4: The City Place Building (Cahill, s. d.) .....	9
Figure 5: Tableau de distinction entre les termes associés aux bâtiments intelligents (Buckman et al., 2014).....	11
Figure 6: Graphique représentatif de la consommation d'énergie finale dans les ménages (Average US Household Energy Consumption - How Do You Compare ? , 2021) .....	14
Figure 7: Représentation du phénomène de chauffage passif (Rameshwar et al., 2019).....	20
Figure 8: Les six thèmes d'évaluation du label R2S (Cadre de Référence R2S, s. d.) .....	22
Figure 9: Représentation des quatre dimensions de la résilience climatique (Menna Allah SALAH Refai Mahmoud, 2023) .....	28
Figure 10: Les facteurs influençant la résilience thermique des bâtiments (Hong et al., 2023) .....	31
Figure 11: Représentation de la méthodologie .....	34
Figure 12: Représentation des différents niveaux d'intelligence considérés dans cette étude .....	36
Figure 13: Heat Index (NOAA's National Weather Service, s. d.) .....	38
Figure 14: Représentation de l'environnement de simulation général TRNSYS.....	39
Figure 15: Graphique illustrant la comparaison des températures actuelles et celles prédites pour une année typique entre 2040 et 2060 .....	42
Figure 16: Graphique illustrant la comparaison des données d'humidité actuelles et celles prédites pour une année typique entre 2040 et 2060 .....	42
Figure 17: Représentation de l'environnement de simulation TRNSYS exploitant les données météorologiques futures.....	43
Figure 18: Plan de coupe 1 du bâtiment de référence .....	44
Figure 19: Plan du bâtiment référence - exposition Nord .....	45
Figure 20: Plan de coupe 2 du bâtiment de référence .....	45
Figure 21: Plan du bâtiment de référence - exposition Sud .....	46
Figure 22: Zonage du rez-de-chaussée du bâtiment de référence.....	47
Figure 23: Zonage de l'étage du bâtiment de référence .....	47
Figure 24: Modélisation Sketchup des façades sud et Est du modèle de référence .....	49
Figure 25: Modélisation Sketchup des façades nord et ouest du modèle de référence .....	49
Figure 26: Représentation graphique du temps d'occupation du séjour en semaine.....	51
Figure 27: Représentation graphique du temps d'occupation du séjour le week-end .....	52
Figure 28 : Représentation graphique du temps d'occupation de la cuisine en semaine .....	52
Figure 29: Représentation graphique du temps d'occupation de la cuisine le week-end.....	52
Figure 30: Représentation graphique du temps d'occupation de la salle de bain .....	53
Figure 31: Représentation graphique du temps d'occupation des chambres.....	53

Figure 32: Niveau d'intelligence du bâtiment de référence .....	54
Figure 33: Modélisation Sketchup des façades sud et est du premier niveau d'intelligence .	56
Figure 34: Modélisation Sketchup des façades nord et ouest du premier niveau d'intelligence .....	56
Figure 35: Consignes de température de chauffage pour la simulation IASA-IASF - séjour ...	57
Figure 36 : Consignes de température de chauffage pour la simulation IASA-IASF - cuisine .	57
Figure 37: Consignes de température de chauffage pour la simulation IASA-IASF - SDB & chambres .....	58
Figure 38: Consignes de température de chauffage pour la simulation IISA-IISF - séjour .....	59
Figure 39: Consignes de température de chauffage pour la simulation IISA-IISF - cuisine ....	60
Figure 40: Consignes de température de chauffage pour la simulation IISA-IISF - SDB & chambres .....	60
Figure 41: Graphique représentant l'évolution de la demande annuelle en refroidissement pour les simulations concernées .....	73
Figure 42: Graphique représentant la demande annuelle en chauffage pour toutes les simulations .....	74
Figure 43: Graphique représentant l'évolution du pourcentage annuel moyen de surchauffe pour toutes les simulations .....	75
Figure 44: Graphique représentant l'évolution du Heat Index moyen pour toutes les simulations .....	76
Figure 45: Tableaux de comparaison des données du Heat Index avec et sans modifications de la zone vide sur séjour .....	77

## IV. Liste des tableaux

Tableau 1 : Représentation des murs, planchers et plafonds encodés dans TRNBuild .....	50
Tableau 2: Les consignes de chauffage par zone.....	53
Tableau 3: Consigne de ventilation pour les débits de ventilation de la simulation IISA .....	61
Tableau 4: Tableau comparatif de tous les résultats des simulations .....	64
Tableau 5: Résultats simulation MRSA .....	65
Tableau 6: Résultats simulation IPSA .....	66
Tableau 7: Résultats IASA .....	66
Tableau 8: Résultats simulation IISA.....	67
Tableau 9: Résultats simulation MRSF .....	68
Tableau 10: Résultats IPSF.....	69
Tableau 11: Résultats simulation IASF.....	70
Tableau 12: Résultats simulation IISF .....	71

## V. Introduction

---

**4,6 milliards d'euros**, c'est l'estimation des coûts annuels des dommages liés au changement climatique subis par le parc immobilier français entre 2020 et 2050. (Delahais & Robinet, 2023). Ces chiffres, bien qu'impressionnants, ne représentent qu'une partie des conséquences du changement climatique sur la société et l'environnement. L'impact sur les vies humaines, la destruction des écosystèmes et les migrations climatiques soulignent également l'urgence d'adaptation au changement climatique.

Confronté à cette réalité alarmante, la course à la résilience climatique des bâtiments débute. Une nouvelle ère de défis émerge ; les bâtiments construits aujourd'hui devront faire face à des phénomènes climatiques déstabilisateurs plus extrêmes et plus fréquemment tout au long de leur cycle de vie. Des vagues de chaleurs accablantes, des inondations dévastatrices, des périodes de froids paralysants et des sécheresses mortelles, ce sont les scénarios climatiques que les bâtiments seront confrontés couramment.

Dans un monde de plus en plus connecté, la technologie apparaît comme un allié potentiel dans la quête de résilience. Les bâtiments intelligents, performants énergétiquement et autonome semblent offrir une solution préservant le confort intérieur tout en faisant face aux phénomènes climatiques perturbateurs.

La véritable efficacité des bâtiments intelligents confrontés au changement climatique est devenue une question cruciale. Sont-ils réellement plus performants que les constructions traditionnelles ? Peuvent-ils garantir un confort intérieur pour les occupants dans un contexte de conditions climatiques changeantes ? L'intelligence des bâtiments, telle que définie actuellement, est-elle capable de répondre aux défis météorologiques futurs imposés par le changement climatique ?

Face à ces interrogations, cette étude propose d'examiner l'intégration de l'intelligence dans une nouvelle construction type wallonne et d'évaluer sa résilience thermique face au changement climatique. Cette analyse inclura un exposé du cadre théorique sur les bâtiments intelligents et la résilience, une méthodologie détaillée avec la validation du bâtiment de référence, la conceptualisation des différents niveaux d'intelligence à intégrer, la définition de l'indice de résilience thermique, ainsi que des simulations dans des contextes météorologiques actuels et futurs. L'objectif de cette étude est de déterminer si les bâtiments intelligents offrent une meilleure résilience thermique face au changement climatique ou si les constructions actuelles peuvent tout aussi bien garantir un confort intérieur aux occupants.

## A. Le changement climatique

### 1. Les différents scénarios du changement climatique

L'humain est responsable du changement climatique. Bien que ce phénomène soit avant tout un phénomène climatique naturel, celui-ci a été altéré et accentué par les activités humaines, notamment par les émissions de gaz à effet de serre. Le sixième rapport du GIEC détermine que les activités humaines sont responsables de l'élévation de la température de 1,1°C par rapport à la période 1850-1900, mesurée dans la décennie 2011-2020. (Calvin et al., 2023). Cette influence initiée par l'impact humain provoque de nombreux impacts et changement sur le climat et l'environnement. Le niveau moyen des mers a augmenté de 0,20m entre 1901 et 2018, avec une responsabilité humaine constatée depuis au moins 1971, soit près d'un demi-siècle. (Calvin et al., 2023).

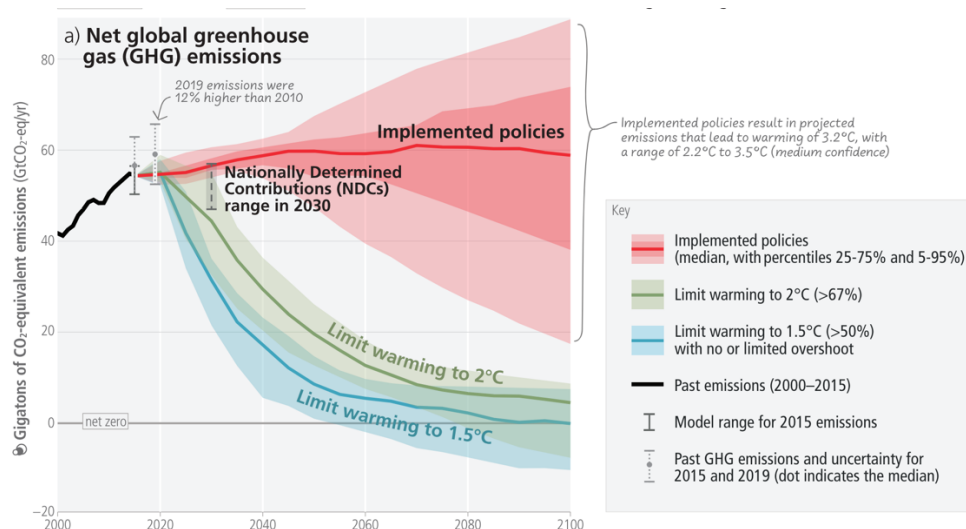


Figure 1: Représentations des différents scénarios d'élévation de la température moyenne en fonction des émissions de gaz à effet de serre. (Calvin et al., 2023).

Les projections des scénarios météorologiques futurs présentées par le GIEC lors du sixième rapport reposent sur des trajectoires modélisées en fonction des émissions de gaz à effet de serre. (Calvin et al., 2023). Afin de représenter l'avenir du changement climatique, le GIEC a développé cinq scénarios basés sur des Trajectoires Socioéconomiques Partagées (SSP). Ces scénarios, trois d'entre eux représentés dans la figure ci-dessus (cf. Figure 1), représentent les futures évolutions possibles de la température. Les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5 incluent des niveaux élevés et très élevés d'émissions de gaz à effet de serre. Dans ces scénarios, les émissions de CO<sub>2</sub> augmentent d'environ deux fois par rapport aux niveaux actuels d'ici 2100 et 2050. (Calvin et al., 2023). Le scénario SSP2-4.5, dans lequel les émissions de CO<sub>2</sub> restent stables, représente des émissions intermédiaires de gaz à effet de serre. Ce scénario, illustré par la ligne rouge dans la figure ci-dessus (cf. Figure 1), reflète les politiques actuellement mises en œuvre. Autrement dit, sans interventions et politiques nouvelles et significatives, les mesures actuelles mèneront à une augmentation de la température moyenne mondiale d'environ 3,2°C. Les scénarios les plus prometteurs, SSP1-1.9 et SSP1-2.6, représentent des niveaux très faibles et faibles d'émissions de gaz à effet de serre. Dans ces scénarios, les



émissions de CO<sub>2</sub> diminuent pour atteindre zéro net autour de 2050 et 2070 respectivement, suivies de niveaux variables d'émissions nettes négatives de CO<sub>2</sub>. (Calvin et al., 2023).

Les Accords de Paris, adoptés en 2015, symbolisent un engagement mondial visant à limiter le réchauffement climatique bien en deçà de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels, reflétant ainsi les scénarios SSP1-1.9 et SSP1-2.6. Toutefois, la concrétisation de ces accords et la réalisation des objectifs climatiques dépendent des impulsions politiques, en particulier les choix européens actuels et futurs qui jouent un rôle décisif. À l'approche des prochaines élections européennes cruciales, chaque décision politique est soumise aux volontés des nouveaux élus. Cette dynamique crée une certaine atmosphère d'insécurité, car le changement climatique n'attend pas les décisions politiques. Ainsi, il est crucial de comprendre que les décisions présentes déterminent le visage de l'avenir. L'urgence d'adopter des mesures audacieuses pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et atténuer les impacts du changement climatique n'a jamais été aussi pressante.

Au-delà de l'élévation de la température moyenne, les différents scénarios du GIEC prévoient des altérations des autres paramètres météorologiques. L'illustration (a) représente le changement de la température maximale quotidienne en fonction des différents scénarios exposés. L'illustration (b) utilise l'écart-type de la variabilité de l'humidité du sol sur l'année. Enfin, l'illustration (c) démontre les changements relatifs aux précipitations en fonction des différents scénarios d'augmentation de la température moyenne. (Calvin et al., 2023).

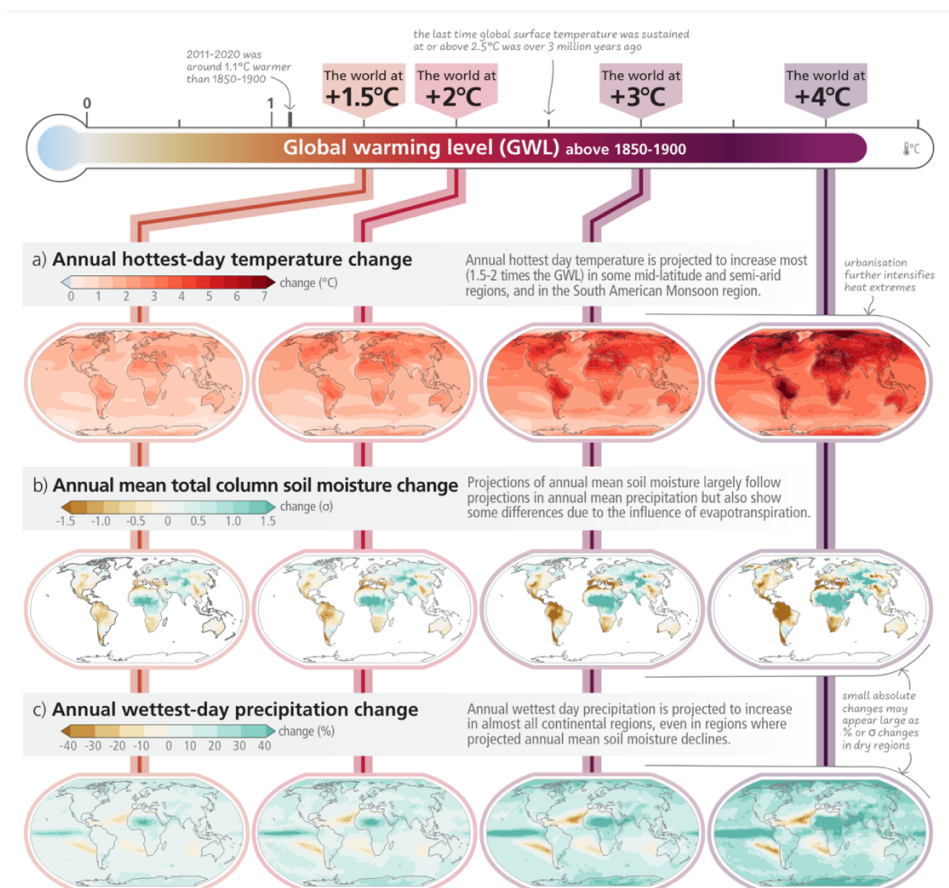


Figure 2: Évolutions projetées de la température maximale quotidienne annuelle, de l'humidité totale moyenne de la colonne de sol et des précipitations maximales journalières annuelles au niveau de réchauffement global de 1,5°C, 2°C, 3°C et 4°C par rapport à la période 1850-1900. (Calvin et al., 2023)

La figure ci-dessus (cf. Figure 2) présente une perspective générale sur les impacts du changement climatique. En effet, ce phénomène ne sera pas uniformément ressenti dans toutes les régions, mais son incidence se fera ressentir à l'échelle mondiale. En Europe, il est possible de s'attendre à une intensification des températures maximales, une augmentation des précipitations et une diminution de l'humidité du sol. Ces résultats mettent en évidence l'urgence d'agir dès à présent pour atténuer les effets du changement climatique et de mettre en œuvre des solutions permettant de s'adapter aux nouvelles conditions climatiques.

## 2. La vulnérabilité des bâtiments

« En 2010, les bâtiments du monde entier représentaient 32 % de la consommation finale d'énergie mondiale et 19 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à l'énergie. » (University of Cambridge, 2014). La consommation énergétique des bâtiments pourrait doubler voire tripler d'ici 2050 si aucune mesure d'atténuation ne se met en place. (University of Cambridge, 2014). Les bâtiments sont extrêmement vulnérables aux impacts du changement climatique dû à leur long cycle de vie provoquant des « verrouillages ». Face à l'augmentation générale de la température moyenne, la demande énergétique en climatisation devrait augmenter de 300 TWh en 2000 à 4000 TWh en 2050. (University of Cambridge, 2014).

Cependant, il est crucial de ne pas oublier que le changement climatique s'accompagne de diverses altérations des paramètres climatiques. Il est estimé que ces modifications devraient également entraîner une augmentation de la consommation énergétique pour le chauffage, avec une consommation plus marquée dans les pays en développement. (University of Cambridge, 2014).

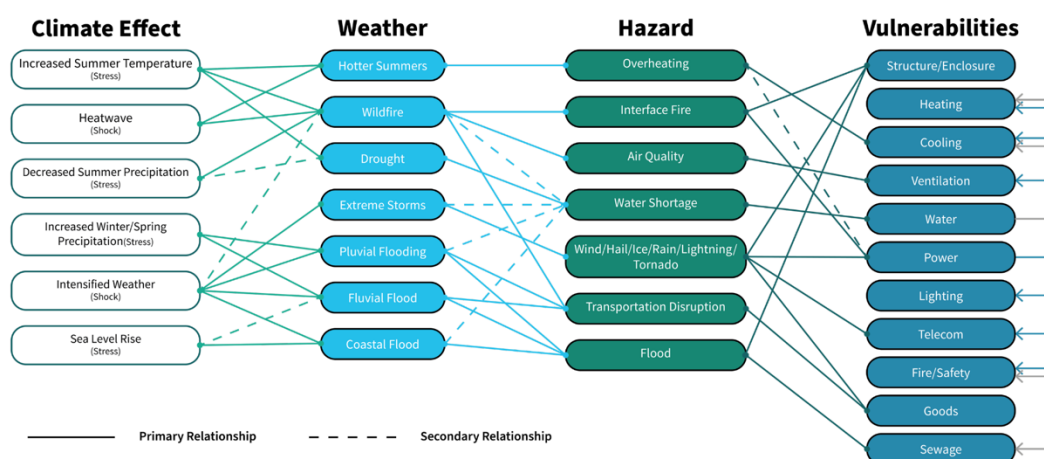


Figure 3: Représentation de l'influence du changement climatique sur les bâtiments (Lepage, 2021)

Les bâtiments et leur consommation énergétique exercent une influence significative sur le changement climatique. La figure ci-dessus (cf. Figure 3) illustre l'impact de ce phénomène sur les bâtiments. Ces derniers, conçus pour résister à des conditions climatiques sur plusieurs décennies, se retrouvent désormais confrontés à des projections climatiques changeantes. Comme le démontre la Figure 3, l'élévation des températures estivales peut entraîner des étés plus chauds, des périodes de sécheresse et des incendies. Ces événements peuvent entraîner un surchauffage, des incendies, des problèmes de qualité de l'air, des pénuries d'eau, etc. Tous ces risques peuvent affecter les bâtiments en réduisant le confort intérieur, la stabilité des structures, ainsi que les systèmes de chauffage, de refroidissement, d'approvisionnement en eau et/ou en électricité. Bref, les dangers engendrés par le changement climatique exposent la vulnérabilité des bâtiments face à ce phénomène, provoquant des répercussions sur les systèmes le composant et le confort des occupants. (Lepage, 2021)

## B. L'enjeu des bâtiments intelligents

Il est indéniable que la prise en compte des mesures passives dans la conception des bâtiments est cruciale pour assurer des conditions viables et une certaine résilience. Plusieurs études, notamment celle menée par Hong et al. (2023), soulignent l'importance de ces mesures passives pour garantir la résilience et la sécurité des occupants (Košir, 2024).

Cependant, bien que ces mesures puissent assurer une résilience thermique, elles ne garantissent pas nécessairement un confort intérieur optimal pour tous les occupants. Ce qui est considéré comme des conditions viables pour un groupe de population peut différer pour un autre groupe, comme les jeunes par rapport aux personnes âgées.

Les mesures actives, notamment celles liées à l'intelligence des bâtiments, offrent théoriquement la possibilité de maintenir des conditions intérieures confortables (Košir, 2024). Cependant, il est essentiel de reconnaître que les mesures actives et passives ne doivent pas être considérées de manière isolée.

En réalité, l'intégration de l'intelligence dans la conception des bâtiments peut également renforcer les fonctionnalités passives de ces derniers. Tandis que les mesures passives ont déjà prouvé leur efficacité dans des conditions météorologiques antérieures, il est maintenant temps d'explorer le potentiel des mesures actives, en lien avec l'intelligence du bâtiment, pour mieux adapter les constructions aux défis imposés par le changement climatique (Košir, 2024).

## VI. Problématique

---

Dans le contexte actuel, où la législation européenne s'oriente vers la promotion des bâtiments intelligents pour améliorer leur efficacité énergétique (Commission européenne, 2024), il devient crucial d'évaluer cette intégration d'intelligence en relation avec les conditions météorologiques changeantes induites par le changement climatique.

Le marché européen des bâtiments intelligents est estimé à 5,27 milliards de dollars en 2023, atteignant 18,59 milliards de dollars d'ici 2050 (Fortune Business Insights, 2024). Bien que la Belgique ne figure pas parmi les leaders européens en matière de projets de bâtiments intelligents, il est impératif d'analyser cette tendance à l'intégration de l'intelligence dans les constructions européennes.

Le changement climatique frappe déjà aux portes de la Belgique, confrontant les nouvelles constructions wallonnes à des phénomènes pour lesquels elles n'ont pas été initialement conçues, négligeant *de facto* souvent les paramètres des conditions météorologiques changeantes.

D'ici 2050, la Wallonie devrait faire face à un climat global plus chaud, caractérisé par des hivers moins rigoureux, mais plus humides, des étés plus chauds et secs, une augmentation des pluies intenses et des événements extrêmes plus fréquents (Born et al., 2016; Agence Wallonne de l'Air et du Climat, 2011). Les inondations dévastatrices de juillet 2021 ont déjà mis en évidence les conséquences du changement climatique sur le paysage bâti wallon.

Selon une étude du World Weather Attribution, les fortes précipitations observées en Europe de l'ouest, particulièrement en Belgique et en Wallonie, sont attribuées au changement climatique. Avec des projections climatiques indiquant une augmentation de la température, la probabilité de tels événements pourrait augmenter de 1,2 à 1,4 et leur intensité de 0,8 à 6% (Tradowsky et al., 2023). Par conséquent, dans un avenir proche ou à tout le moins imminent, la Wallonie devra affronter une augmentation tant en fréquence qu'en intensité de ces phénomènes climatiques changeants.

Cette étude établit un lien entre la montée de l'intégration de l'intelligence dans les bâtiments et les conditions météorologiques variables découlant du changement climatique auxquelles les nouvelles constructions wallonnes doivent faire face. La question de recherche de ce mémoire est ainsi définie :

**« Les bâtiments intelligents renforcent-ils leur résilience face aux conditions météorologiques variables engendrées par le changement climatique ? Évaluation de la résilience thermique d'une nouvelle construction wallonne standard intégrant plusieurs niveaux d'intelligence, par la comparaison de simulations dynamiques utilisant TRNSYS et des données météorologiques actuelles et futures. »**

## VII. L'état de l'art

---

### A. Les bâtiments intelligents

#### 1. Définition

Depuis toujours, les êtres humains ont réfléchi la construction des bâtiments afin de se protéger des éléments extérieurs. Cette démarche ayant pour objectif premier de maintenir le confort et la sécurité des individus. Au fur et à mesure, les bâtiments ont évolué afin d'offrir des performances accrues et un confort optimal pour ses occupants.

*"[...] le rôle premier d'un bâtiment est d'assurer à ses occupants un climat intérieur agréable et peu dépendant des conditions extérieures [...]". (Roulet, 2009)*

Les prémices des bâtiments intelligents sont apparues dans les années 50. Cependant, c'est véritablement dans les années 80 que la notion de bâtiments intelligents s'est développée (Sauce et al., s. d.), en parallèle du développement de la technologie avec notamment la création d'Internet et le développement des appareils électroniques.

En 1989, une première définition des bâtiments intelligents émerge par Cardin en les définissant telle que *"a building which is equipped with fully automated building service control systems"* (Omar, 2018). La traduction signifiant qu'un bâtiment intelligent est équipé de système de contrôle des services entièrement automatisés. À la suite de cette première définition, une bataille à la détermination du terme "bâtiment intelligent" commence et n'a toujours pas cessé aujourd'hui.

En 1988, cette définition est développée par *Intelligent Building Institution* et devient *"one which integrates various systems to effectively manage resources in a coordinated mode to maximize: technical performance, investment and operating cost savings, flexibility"* (Omar, 2018). Dans cette nouvelle définition, le concept de gestion est intégré afin de maximiser au mieux les performances techniques et économiques du bâtiment.

Dans ces deux définitions développées durant le siècle précédent, le bâtiment intelligent était surtout caractérisé par des systèmes technologiques performants permettant d'augmenter l'automatisation de celui-ci. Grâce à ces premières tentatives de définition, c'est en 1989 qu'apparaît le premier édifice caractérisé comme un bâtiment intelligent : le City Place Building au Connecticut aux États-Unis (cf. Figure 4), construit par le bureau d'ingénierie et d'architecture Skidmore, Owings & Merrill LLP (SOM). (Theodoridis, 2020)



Figure 4: The City Place Building (Cahill, s. d.)

La définition du bâtiment intelligent s'étend et intègre à présent un tout autre aspect : les occupants.

En 1999, une nouvelle définition apparaît : *“An Intelligent Building is designed and constructed based on an appropriate selection of quality environment modules to meet the user’s requirements by mapping with the appropriate building facilities to achieve long-term building value”* (Omar, 2018) (So et al., 1999). Dans cette nouvelle perspective, la prise en compte des besoins des occupants s’ajoute à l’aspect technologique.

En 2007, *Building Intelligence Group* développe davantage cet aspect en précisant que *“Intelligent Building is a building that integrates technology and process to create a facility that is safer, more comfortable and productive for its occupants, and more operationally efficient for its owners.[...]”* (Omar, 2018) (Building Intelligence Group, 2007).

Plus récemment, une définition exhaustive des bâtiments intelligents a été développée, prenant en considération les diverses fonctions les composant, à savoir : *“An intelligent building should (1) perceive its environment through indoor environment monitoring system; (2) communicate with occupants and know their needs; (3) make energy-related decisions by its energy management system (EMS); (4) take energy-related actions through its energy management and control systems (EMCS), (5) have a learning capability to improve its performance, and (6) have a proper communication to the grid.”* (Mofidi & Akbari, 2020).

Dans cette définition davantage complète, un bâtiment intelligent doit être capable de subvenir aux besoins de ses occupants et de communiquer avec eux et le réseau. Il doit notamment être réactif en surveillant les données extérieures ce qui lui permet de prendre des décisions liées à l’énergie. Enfin, le bâtiment s’inscrit dans un contexte d’évolution continue puisqu’il doit être doté d’une capacité d’apprentissage afin de s’améliorer.

Suite à la prise de conscience environnementale ayant eu lieu durant les années 70/80, le concept de développement durable s’est vu prendre une place dans de nombreux domaines, notamment dans le domaine des bâtiments.

Les prémices de la construction durable naissent avec la publication en 1962 du livre *“Silent Spring”* de Rachel Carson et soulignaient déjà l’importance de la construction écologique afin de réduire les effets néfastes sur l’environnement. (Rameshwar et al., 2019) Dès lors, les Green Smart Building (GSB) intègrent des technologies intelligentes afin d’optimiser leur fonctionnement et de répondre aux besoins des occupants, tout en minimisant leur impact environnemental en intégrant des concepts de constructions durables.(Kanti Dutta Pramanik et al., s. d.) Ces derniers correspondent à l’intégration d’énergies renouvelables dans le bâtiment, la conception bioclimatique et la mise en place de solutions passives, l’utilisation de matériaux écologiques, et bien d’autres encore.

Dans un contexte où les bâtiments sont une des sources les plus émettrices de CO<sub>2</sub>, le développement durable est un aspect qui s’est fortement développé dans ce domaine. En 2009, l’architecte et professeur anglais Derek Clements-Croome, intègre le développement durable dans la définition des bâtiments intelligents :

*“An intelligent building is one that is responsive to the occupants’ needs, satisfies the aims of an organisation and meets the long term aspirations of society. It is sustainable in terms of energy and water consumption and maintains a minimal impact to the environment in terms of emissions and waste. They are also healthy in terms of well-being for the people living and working within them and are functional according to the user needs.”* (Clements-Croome, 2014)

Les bâtiments intelligents ont toujours pour fonction de subvenir aux besoins des occupants tout en étant performants d’un point de vue énergétique. Les nouveautés apportées dans cette définition sont la gestion performante de l’eau, mais également le fait que ce bâtiment doit avoir un impact environnemental moindre en réduisant ses émissions et sa production de déchets. Celui-ci doit également être durable énergétiquement, cela signifie donc que la consommation énergétique doit être minimale et doit provenir de sources renouvelables telles que, entre autres, la géothermie, le soleil et le vent.

L’intelligence dans un bâtiment peut présenter plusieurs aspects. Elle se caractérise notamment par l’implémentation de technologies intelligentes interconnectées et capables de prendre des décisions autonomes. Outre cet aspect technologique, l’intelligence du bâtiment intègre également un aspect plus structurel se traduisant par une conception intelligente du bâtiment en intégrant, dès les premières réflexions de conception, des principes bioclimatiques visant à tirer parti des paramètres extérieurs.

En conclusion, dans le cadre de ce mémoire, les bâtiments intelligents sont définis tels que des structures bien conçues pouvant intégrer divers niveaux d’intelligences. Sa durabilité en terme de consommation énergétique répond aux aspirations à long terme de la société. Un bâtiment intelligent tire avantage des paramètres extérieurs, répond efficacement aux besoins des occupants et intègre un certain niveau de technologie autonome et interconnecté afin d’analyser et prendre des décisions en fonction relative à son environnement et des facteurs environnementaux.



## 2. Distinction entre les bâtiments intelligents, automatisés et les SMART buildings

L'absence d'une définition claire et précise des bâtiments intelligents conduit souvent à leur assimilation à d'autres termes similaires, notamment les bâtiments qui sont caractérisés comme "automatisés". Tel que le démontre la figure ci-dessous (cf. Figure5), les bâtiments automatisés correspondent aux premières définitions des bâtiments intelligents. En effet, ces bâtiments automatisés peuvent recevoir une rétroaction, consistant en un retour d'informations. *A contrario*, les bâtiments intelligents sont interactifs, ce qui signifie qu'ils peuvent interagir avec plusieurs parties. De plus, les bâtiments intelligents collectent directement les données relatives au confort et à l'efficacité. Dans les bâtiments automatisés, tout peut être considéré comme automatique, ne nécessitant pas l'intervention ou le retour d'expérience des occupants. Les bâtiments intelligents offrent plus de contrôle et d'efficacité aux occupants, améliorant leur confort. (Buckman et al., 2014)

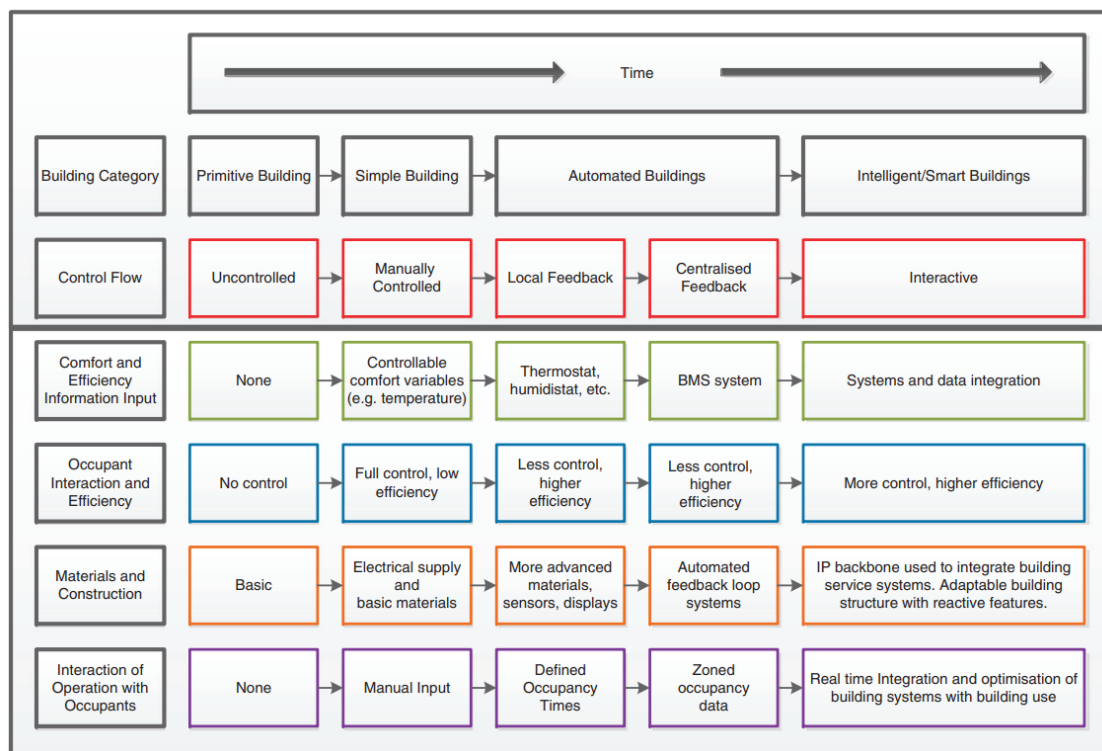


Figure 5: Tableau de distinction entre les termes associés aux bâtiments intelligents (Buckman et al., 2014)

Il est également important de souligner qu'en anglais, une distinction est réalisée entre un "intelligent building" et un "smart building". Un Intelligent Building se rapproche davantage des caractéristiques d'un bâtiment automatisé intégrant beaucoup d'éléments techniques et technologiques relatifs au chauffage, à la climatisation, etc. Un Smart Building intègre une approche plus holistique en intégrant des technologies intelligentes et connectées. Un tel bâtiment possède un aspect interactif et prend en compte les besoins des occupants en offrant un environnement dynamique et réactif. (Rameshwar et al., 2019)

### 3. Les besoins de confort dans le bâtiment

Tel que décrit dans les sections précédentes, un bâtiment intelligent doit être capable de garantir un confort intérieur pour ses occupants en répondant à certains besoins. Cette notion de confort dans le bâtiment peut être caractérisée de différentes manières (Roulet, 2009):

- Aucune plainte d'inconfort ;
- Sensation de bien-être générale ; et
- Conditions sous lesquelles la régulation corporelle est à son niveau d'activité minimale.

Évaluer le confort, étant un aspect assez subjectif et variable selon les individus, peut s'avérer difficile à évaluer. L'échelle de Fanger est un outil d'évaluation du confort des occupants souvent utilisée. Cette échelle, qui va de -3 (très froid) à +3 (très chaud), permet une évaluation quantitative du confort perçu par les occupants.

Une autre approche pour évaluer le confort consiste à calculer le nombre de personnes insatisfaites en utilisant le Predicted Mean Vote (PMV), qui représente la moyenne des votes des occupants dans un espace donné sur une échelle de -3 à +3. Le confort idéal est atteint lorsque ce PMV est de 0. De plus, le Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) reflète la proportion de personnes insatisfaites dans un espace donné.

Le confort est un aspect vaste dans le domaine du bâtiment, englobant divers types de confort. Tout d'abord, il y a le confort relatif à la qualité de l'air. Assurer une bonne qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments est généralement réalisé par le biais de la ventilation. Cependant, ce processus peut être très énergivore et nécessite donc des études spécifiques pour garantir son efficacité totale (Roulet, 2009). Pour assurer la qualité de l'air intérieur tout en minimisant la consommation énergétique, certaines conditions doivent être remplies :

- Réduire l'intensité à la source de pollution : les occupants représentent la seule source de pollution incontournable dans le bâtiment. Ainsi, l'utilisation de toute autre source de pollution doit être évitée au maximum (produits chimiques, produits d'entretien, etc.). Par exemple, l'unité "olf" est utilisée dans le domaine du bâtiment afin de caractériser l'odeur émise par une personne dite "normale". Pour une émission moyenne de 1 olf, une personne va émettre également 18l CO<sup>2</sup>/h, 72g de vapeur d'eau/h et 120W. (Roulet, 2009)
- Contrôle des débits d'air (enveloppe étanche requise): ceux-ci sont généralement réguliers en fonction de la demande. Cette régulation peut se faire de manière autonome (par exemple, par l'ouverture de la fenêtre) ou automatique avec des capteurs de CO<sup>2</sup> ou vapeur d'eau. A titre d'exemple, pour une personne seule un débit de 10 l/s.p est vivement recommandé. (Roulet, 2009)
- Contrôle des mouvements d'air et élimination du polluant à la source : diminuer au maximum l'âge de l'air, c'est-à-dire la période de déplacement d'une molécule depuis son entrée dans le bâtiment. Cette diminution peut notamment être réalisée en amenant l'air neuf à des endroits stratégiques et efficaces. (Roulet, 2009)

Ensuite, il est également souhaitable que le bâtiment prenne en considération un niveau de confort acoustique adéquat, garantissant ainsi un environnement favorable sur le plan du son pour ses occupants. Le confort acoustique équivaut à la façon dont les ondes sonores se propagent à l'intérieur du bâtiment. Ce confort est représenté par le temps de réverbération qui se traduit par le temps requis afin que le niveau sonore baisse de 60dB après extinction de la source sonore. A titre indicatif, le niveau sonore admis dans les chambres est de 30-40dB. Afin d'obtenir celui-ci, une étude d'isolation acoustique peut parfois être nécessaire. (Roulet, 2009)

Pour garantir un environnement visuellement confortable et fonctionnel dans les bâtiments, il est crucial de considérer le confort optique, qui est la perception visuelle par l'œil humain. Cet aspect est souvent évalué à travers l'indicateur d'éclairement, mesurant la quantité de lumière incidente sur une surface et déterminant ainsi le niveau de luminosité. Les normes recommandées, exprimées en lux, fixent des niveaux d'éclairement spécifiques pour différents types de locaux, assurant ainsi des conditions visuelles adaptées et agréables aux occupants (Roulet, 2009). Par exemple : il est recommandé que les couloirs, corridors possèdent un éclairage de 100 lux.

Mais aussi, le confort intérieur peut également être dépendant d'autres éléments moins "scientifiques" (Roulet, 2009) , tel que le volume de la pièce, les proportions, l'agencement intérieur, l'immobilier ou encore la densité d'occupation.

Enfin, le confort considéré dans cette étude concerne principalement le confort thermique dans les bâtiments. Celui-ci se manifeste par l'absence de sensations de froid ou de chaleur excessives, ainsi que par la satisfaction quant à la répartition homogène de la température et du flux de chaleur dans l'environnement ambiant (Roulet, 2009). Malgré les idées préconçues, le confort thermique ne se régule pas seulement en baissant ou augmentant la température. Voici les différents paramètres influençant celui-ci:

- Activité physique de l'occupant : celle-ci peut être caractérisée par l'unité "met" qui correspond au taux de métabolisme pour l'individu. Par exemple, un met correspond à l'activité d'être assis et émet  $58\text{W/m}^2$  de surface du corps. (Roulet, 2009)
- Son habillement: l'habillement permet d'avoir une résistance thermique. Cette dernière peut être déterminée par l'unité "clo". 1 clo représente  $0.155\text{ m}^2\text{K/W}$ , par conséquent une tenue d'hiver fourrée représente approximativement 3 clo, c'est-à-dire  $0.45\text{ m}^2\text{K/W}$ . (Roulet, 2009)
- La température de l'air : généralement mesurée en degrés Celsius.
- La température opérative : celle-ci prend en considération la température de l'air et la température radiante qui correspond "*à la température homogène qu'aurait une pièce imaginaire ayant reçu la même quantité de rayonnement que dans la pièce réelle*".(Roulet, 2009)

- Vitesse de l'air : les mouvements d'air peuvent jouer un rôle dans le confort thermique tant qu'ils ne provoquent pas de sensations d'inconfort. (Roulet, 2009)
- Humidité de l'air : un taux d'humidité trop bas ou trop élevé peut engendrer des sensations d'inconfort (irritation, peau sèche, etc.) (Roulet, 2009)

#### 4. Les technologies des bâtiments intelligents

L'efficacité énergétique est un élément important caractérisant les bâtiments intelligents. Dans un contexte où les bâtiments sont responsables de 30% de la consommation énergétique totale, il est impératif de réduire leur consommation énergétique afin de diminuer leur impact environnemental. (ABB, s. d.)

Les principaux éléments énergivores dans les résidences sont les systèmes de chauffage, d'eau chaude sanitaire, de refroidissement et les appareils électroniques. Le graphique ci-dessous (cf. Figure 6) démontre une augmentation importante de la consommation énergétique des appareils électroniques, résultant de leur développement important au cours des dernières années. En effet, dû à leur évolution, chaque habitation possède davantage d'appareils électroniques, souhaitant offrir un confort plus important à ses occupants. (ABB, s. d.)

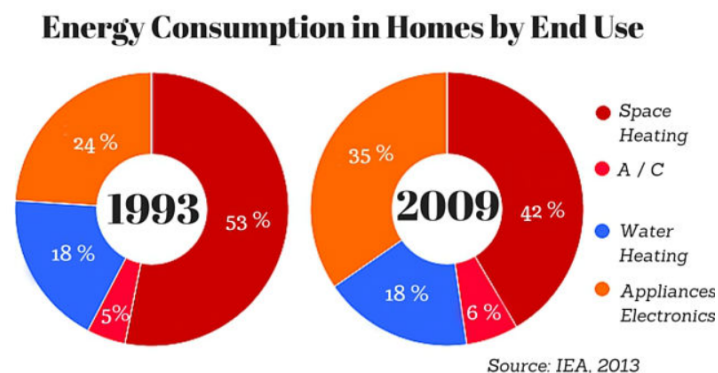


Figure 6: Graphique représentatif de la consommation d'énergie finale dans les ménages (Average US Household Energy Consumption - How Do You Compare ?, 2021)

A l'échelle européenne, les politiques en termes d'efficacité et consommation énergétique des bâtiments se durcissent. Par conséquent, les technologies présentes dans les bâtiments doivent devenir de plus en plus performantes afin de réduire notamment cette consommation énergétique. Les bâtiments intelligents sont principalement conçus pour garantir un confort optimal aux occupants tout en minimisant la consommation énergétique grâce à l'intégration des systèmes optimisés. (ABB, s. d.)

#### a. Les systèmes HVAC : chauffage, ventilation, refroidissement

Les systèmes HVAC correspondent aux équipements relatifs au chauffage, à la ventilation et au refroidissement dans le bâtiment. Leur utilisation intensive d'énergie peut entraîner des coûts économiques importants si les réglages ne sont pas appropriés, se traduisant par des factures énergétiques élevées.

L'une des technologies les plus utilisées dans les bâtiments intelligents est l'utilisation de capteurs. Dans les systèmes de ventilation, une technologie intelligente se rapporte à intégrer un capteur dans les conduites de ventilation afin d'en déterminer la pression statique. Cette dernière correspond aux frottements contre lesquels l'air circulant doit se battre afin de pouvoir continuer son chemin. (Globule, 2023) Au plus cette pression est élevée, au plus l'air ventilé éprouve des difficultés à circuler dans les conduites et par conséquent cela engendre une consommation énergétique supplémentaire. Le capteur situé dans la conduite, envoie un signal électrique indiquant un changement de la pression statique dans les gaines de ventilation. Grâce à ce signal, les systèmes HVAC intelligents peuvent prendre en compte cette information afin d'adapter le débit de ventilation. Cette lecture intelligente de la pression statique est une technologie permettant de réduire la consommation énergétique du bâtiment. Contrairement à ce qu'il pourrait être pensé, ce type de capteur ne revêt pas d'une technologie hors de prix ; aux Etats-Unis en 2014 le premier prix pour ce type de capteur était de 0.60\$. (King & Perry, 2017)

Les débits des ventilations sont déterminés en fonction de la demande. Comme expliqué dans la section relative au confort, le débit de ventilation minimum pour une personne est de 10l/s.p. Les sondes CO<sub>2</sub> sont des outils efficaces afin de quantifier la qualité de l'air. Grâce aux taux de dioxyde de carbone recueilli, il est possible de déterminer le nombre de personnes présentes dans la pièce et par conséquent le débit de ventilation nécessaire afin de maintenir une bonne qualité de l'air. (Linder, 2013)

Une étude réalisée par le *Pacific Northwest National Laboratory* a estimé des économies d'électricité d'environ 50% avec un remboursement sur trois ans pour des unités de toit équipées de ventilateur à vitesse multiple, économiseur et contrôleur de vitesse en fonction de la demande. (King & Perry, 2017)

La ventilation à débit variable (VAV) est une technologie présente dans les bâtiments intelligents possédant plusieurs zones. Ce boîtier permet de réguler le débit d'air de manière indépendante pour les différentes pièces qui composent le bâtiment. (*Le Système de Ventilation À Débit Variable | France Air*, 2023) Ces systèmes, contrairement aux systèmes à débit d'air constant qui sont généralement présents dans les habitations, permettent d'adapter le débit d'air en fonction de l'occupation de la zone et de son besoin hygiénique. Par exemple, lorsque la pièce est inoccupée, ce boîtier réduit automatiquement le débit d'air, tandis que dans le cas contraire, lorsque celle-ci est occupée, le débit est automatiquement adapté en fonction de la demande. (*Le Système de Ventilation À Débit Variable | France Air*, 2023) La régulation du débit d'air au moyen de collecte instantanée d'informations, via notamment l'installation de VAV, permet de réduire la consommation énergétique du bâtiment.

Comme tous les systèmes intégrés dans les bâtiments, les systèmes HVAC diminuent en efficacité au fur et à mesure du temps. Le problème étant que cette dégradation passe inaperçue engendrant une consommation supplémentaire et un gaspillage d'énergie. Par conséquent, les bâtiments intelligents sont équipés de détecteurs, appelés FDD (Fault Detection and Diagnostic), permettant de détecter ces défauts et d'éviter la surconsommation d'énergie. (King & Perry, 2017)

#### b. Les prises intelligentes

A l'intérieur des bâtiments, il existe des consommations énergétiques appelées "des charges fantômes". Ces dernières correspondent à l'électricité qui traverse l'appareil électrique même lorsque celui-ci est éteint. (King & Perry, 2017) Ces charges fantômes peuvent représenter presque 15% de la consommation énergétique finale dans un ménage (Energie, 2023) engendrant des coûts économiques non négligeables. Les prises intelligentes intégrées dans les bâtiments intelligents permettent de réduire ces charges fantômes en agissant directement à la source : au niveau de la prise. En pratique, ces prises sont équipées d'un contrôleur permettant une gestion grâce aux informations reçues par les capteurs d'occupation de ces appareils. Il existe également des multiprises intelligentes, fonctionnant de la même manière qu'une multiprise normale, mais pouvant contrôler individuellement les prises et leur charges fantômes respectives. (King & Perry, 2017)

#### c. L'éclairage

Autrefois, les systèmes d'éclairage intelligents étaient caractérisés par des systèmes intégrant des capteurs de mouvement ou encore intégrant des minuteries. Actuellement, l'éclairage dans les bâtiments intelligents va bien au-delà de ces conceptions. En effet, les bâtiments intelligents intègrent des systèmes lumineux mesurant la quantité de lumière intérieure grâce à des photosensors. (King & Perry, 2017) Cette mesure permet d'ajuster la quantité de lumière artificielle intérieure afin de profiter au maximum de l'apport en lumière naturelle et de réduire la consommation énergétique. Ces éclairages intelligents peuvent être placés dans différentes zones afin de collecter instantanément les données et optimiser l'éclairage artificielle. Via le tableau de bord qui peut éventuellement mis à disposition, les occupants peuvent interagir avec ce système d'éclairage afin de conserver le confort lumineux. (King & Perry, 2017)

#### d. Ombrage

Le confort thermique intérieur est fortement influencé par les gains solaires. En effet, les fenêtres trop exposées au rayonnement solaire pendant une longue période peuvent provoquer le phénomène de surchauffe et engendrer un inconfort thermique pour les occupants. Qui plus est, le phénomène de changement climatique augmente également la durée d'ensoleillement dans nos régions, pouvant être une source d'augmentation de ces

inconforts thermiques ; « [...] Au cours des 30 dernières années, la durée d'ensoleillement a augmenté de 94 heures à Uccle par rapport à la période 1961-1990. » (Theunis, 2021)

Afin de faire face à ces problèmes de surchauffe, les ombrages sont des outils efficaces dans le but de réduire les excès de gains solaires entraînant les phénomènes de surchauffe. L'enjeu des protections solaires concerne le risque de réduction d'apport en lumière naturelle. En effet, les protections solaires sont des dispositifs permettant de réduire les gains solaires thermiques en diminuant le transfert du rayonnement solaire par la fenêtre. Par conséquent, cela entraîne également un blocage de la lumière naturelle dans le bâtiment. Certaines protections solaires sont composées de commandes automatiques permettant d'ajuster l'angle de la protection solaire en fonction de la température intérieure, extérieure et de la position du soleil. Ces stores "adaptatifs" ne nécessitent aucune entrée humaine et permettent de réduire les risques de surchauffe tout en conservant un certain apport en lumière naturelle. Couplés à des rénovations lumineuses, ces outils intelligents peuvent réduire jusqu'à 10% de la consommation énergétique. (King & Perry, 2017)

Le rayonnement solaire est composé de plusieurs longueurs d'ondes, généralement considérées comme des courtes longueurs d'ondes. Dans ce spectre solaire, environ la moitié de celui-ci caractérise la lumière visible, correspondant à une longueur d'onde de 0,4 à 0,8. L'autre partie du spectre du rayonnement solaire est caractérisée par le rayonnement infrarouge, étant responsable de la chaleur ressentie, et l'ultraviolet, pouvant causer des dommages à la peau. (Roulet, 2009)

Le développement des teintes de vitrages est une stratégie intelligente afin de réduire les gains solaires thermiques tout en permettant le passage de la lumière naturelle dans le bâtiment. Sur les fenêtres déjà existantes, des films à double réflexion ou de contrôle solaire peuvent être installés afin d'accueillir un spectre de couleur plus large à travers le verre. (King & Perry, 2017)

Les verres passifs sont des outils présents dans les bâtiments intelligents permettant une efficacité énergétique et un confort lumineux. Les verres photochromique et thermochromique sont des types verres pouvant ajuster leur teinte par rapport à la lumière et à la température.

Le verre thermochromique s'adapte en fonction de la température extérieure ; lorsque la température extérieure augmente, le verre augmente sa teinte afin de limiter le rayonnement solaire thermique. Au contraire, lorsque la température diminue, le verre thermochromique diminue sa teinte afin de laisser entrer davantage de lumière dans le bâtiment. La fenêtre thermochromique "RavenWindow 2.0" existante sur le marché estime qu'elle permet de réaliser une économie de 30% de la consommation énergétique. (King & Perry, 2017)

Le verre photochromique, lui, varie en fonction de lumière solaire reçue sur la surface. Lorsqu'il reçoit directement une grande quantité de lumière, le verre augmente sa teinte et devient plus foncé afin de réduire la quantité de rayonnement solaire entrant. Dans le cas contraire, lorsqu'il ne reçoit pas beaucoup de rayonnement solaire, la teinte reste claire afin de maximiser l'apport en lumière naturelle. (King & Perry, 2017)

Il existe également des verres intelligents actifs qui, contrairement aux verres intelligents passifs, peuvent s'ajuster automatiquement aux caractéristiques externes qu'ils perçoivent.

Les verres électrochimiques déterminent leur teinte de verre via une charge basse tension répondant à l'intensité solaire et à la température ambiante. Les changements de tensions induits par les variations de lumière solaire et de température vont entraîner des changements et un ajustement de la teinte du verre intelligent actif. (King & Perry, 2017) Sur le marché, le verre électrochimique développé par la société SageGlass permettrait de réduire de 20% les coûts d'exploitation et également une diminution de 25% concernant le dimensionnement des systèmes HVAC du bâtiment. (King & Perry, 2017) (SageGlass, 2016)

Les protections solaires dynamiques sont également des systèmes intelligents permettant de maximiser la lumière naturelle et l'apport thermique solaire tout en limitant les risques de surchauffe. Ces systèmes se règlent automatiquement grâce à la réception des données perçues par des capteurs concernant la quantité d'ensoleillement, la température et le vent. (*What Is Dynamic Shading ?*, 2022)

#### e. Système de gestion énergétique

Les systèmes de gestion énergétique intégrés dans les bâtiments intelligents permettent de contrôler et d'optimiser la consommation énergétique de celui-ci grâce à une surveillance très présente. Il existe plusieurs types de systèmes de gestion énergétique, notamment les systèmes d'automatisation des bâtiments (BAS). Le développement des BAS a débuté dans les années 50, en utilisant des systèmes de contrôle à air comprimé. (King & Perry, 2017) Dès lors, les BAS centralisent toutes les commandes électriques afin de pouvoir contrôler l'entièreté des opérations dans le bâtiment. Par exemple, ce système de gestion énergétique centralisé peut réguler les paramètres HVAC tel que la température, la pression, le débit etc. permettant ainsi une efficacité énergétique et une garantie du confort des occupants. (King & Perry, 2017)

Le coût d'installation de ce type de système peut varier de 1,5\$ à 7\$ du mètre carré. (King & Perry, 2017) Par conséquent, ces installations sont plus rentables dans des grands bâtiments. Cependant, l'intérêt de ces systèmes de gestion dans les moyens et petits bâtiments ne cesse de grandir : en 2003, moins de 5% des bâtiments à taille réduite étaient équipés de systèmes d'automatisation du bâtiment. (King & Perry, 2017)

Les systèmes d'information énergétique (EIS) sont également des systèmes de gestion énergétique récoltant des données relatives à l'énergie du bâtiment. Les EIS collectent toutes les données énergétiques du bâtiment grâce notamment au compteur d'électricité, compteur gaz, capteur de température, relevé HVAC, etc. La collection et l'analyse de ces données en instantanée permettent d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment. Cette collecte permet également de mettre en évidence les potentielles surconsommations et problèmes techniques des équipements, évitant ainsi une inefficacité énergétique et des coûts importants. (King & Perry, 2017)

L'optimisation automatique du système (ASO) se différencie des systèmes énergétiques EIS et BAS. En effet, celui-ci peut être considéré comme préventif. Plutôt que de simplement réagir aux conditions externes tel que les systèmes EIS ou BAS, l'ASO récolte et analyse les données afin de prendre une décision stratégique avant que les conditions externes ne se



produisent. Ce système, contrairement aux autres, anticipe les événements avant que ceux-ci ne se réalisent. (King & Perry, 2017)

Un exemple concret souvent utilisé afin d'illustrer la différence de ces systèmes concerne la réaction face à l'augmentation de température. Lorsque la température extérieure augmente, un système BAS va réagir à cette augmentation en, par exemple, augmentant la quantité d'air climatisé dans le bâtiment. En opposition, un système ASO qui lui, a déjà collecté les données météorologiques prévues et peut donc anticiper cette augmentation de température en activant par exemple un refroidissement préventif du bâtiment. (King & Perry, 2017)

#### f. L'internet des objets

Les bâtiments intelligents sont généralement stigmatisés par la présence d'une technologie de pointe. L'évolution technologique générale a notamment permis le développement de systèmes de communications entre les différents objets technologiques. Durant les années 90, divers réseaux ouverts de communication technologique dédiés aux bâtiments se sont développés tels que LonWorks ou EIB/KNX. Depuis lors, ce sont surtout les réseaux IP (Internet Protocole) qui sont de plus en plus répandus dans le domaine de la communication dans le bâtiment. (Bovet & Hennebert, 2013) Le réseau IP fonctionne en envoyant des informations sous forme de "paquets" à un autre appareil possédant une adresse IP, cet autre appareil va rassembler ces paquets afin de former l'information complète qui a été envoyée. *"Dans le cas d'un capteur de présence devant piloter de l'éclairage, des stores ainsi que de la ventilation, tous ces éléments font partie d'un même groupe. Lorsque le capteur détecte la présence d'une personne, il émet un télégramme avec, comme adresse de destination, l'adresse du groupe concerné."* (Bovet & Hennebert, 2013)

Depuis peu, les bâtiments intelligents sont également caractérisés par le développement de l'Internet des Objets (IoT - Internet of Things). Ce nouveau réseau consiste à intégrer les objets de la vie courante au réseau IP dans le bâtiment. Par conséquent, cela permet aux objets de communiquer entre eux, généralement via des protocoles HTTP, de recueillir des données en temps réel et de prendre des décisions basées sur l'analyse de ces données. Dans un cas concret, un thermostat intelligent peut se connecter au réseau IP, qui correspond au réseau de l'internet des objets, afin de communiquer les données qu'il collecte et de les transmettre aux systèmes de chauffage pour adapter celui-ci en fonction de la demande réelle. (Bovet & Hennebert, 2013)

#### g. Intervention humaine

Malgré toutes ces dispositifs technologiques dans un bâtiment intelligent, ce dernier ne peut être qualifié d'intelligent que si l'intervention humaine est également intelligente. Effectivement, la programmation intelligente du bâtiment est avant tout effectuée par l'humain en lui-même, qui détermine les consignes d'alertes et qui interprète les données. Les occupants du bâtiment doivent alors pleinement comprendre et interpréter les données sinon cela correspond seulement à des données brutes sans aucune utilité. Un bâtiment n'est alors considéré comme intelligent lorsque ses occupants sont en mesure de traiter

intelligemment la grande quantité de données que celui-ci est en mesure de recueillir, afin de mettre en place des décisions et des actions intelligentes optimisant automatiquement les systèmes dans le bâtiment. (King & Perry, 2017) (Vanwelde & Vinel, 2024) Par exemple, si un refroidissement automatique se met en place lorsque la température intérieure atteint 35°C, malgré toutes les technologies intégrant cette solution, celle-ci ne peut être qualifiée d'intelligente. Cela démontre la nécessité d'intervention d'une opération humaine intelligente pour déterminer une valeur cohérente.

#### h. Les solutions passives

Tel qu'évoqué dans les définitions énoncées dans le premier chapitre, les bâtiments intelligents intègrent également des solutions dites "passives" dans leur large éventail d'outils technologiques. Les solutions passives peuvent être considérées comme des systèmes ne nécessitant pas un raccordement électrique, et qui tirent avantage des conditions environnementales permettant une réduction énergétique et économique. (Rameshwar et al., 2019) (Chen et al., 2015) Les différentes solutions passives présentées ci-dessous doivent être intégrées dès l'étape de conceptualisation du bâtiment.

Le chauffage passif est une solution passive permettant de tirer avantage des gains solaires afin de subvenir aux besoins thermiques des occupants. La figure ci-dessous (cf.figure7) démontre le processus du chauffage passif. En effet, la lumière solaire qui frappe directement les parois du bâtiment chauffe l'air intérieur par convection et rayonnement. (Rameshwar et al., 2019)

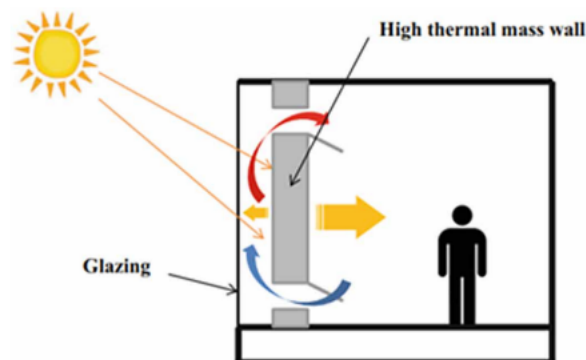


Figure 7: Représentation du phénomène de chauffage passif (Rameshwar et al., 2019)

Le refroidissement passif permet de conserver un environnement intérieur frais et confortable en utilisant les ressources naturelles disponibles. La ventilation naturelle est une méthode de refroidissement passive qui, grâce à la différence de pression entre l'air intérieur et extérieur, permet une circulation d'air dans le bâtiment refroidissant l'intérieur de celui-ci. (Rameshwar et al., 2019)

Le concept d'éclairage passif consiste à tirer avantage de la lumière naturelle disponible en l'orientant le mieux possible dans cet objectif. Effectivement, la lumière naturelle permet de réaliser de grande économie en termes d'éclairage mais elle est également importante pour le métabolisme humain. (Rameshwar et al., 2019)

Dans le cadre de ce mémoire, les technologies du bâtiment qui vont être considérées sont les solutions passives, les capteurs de présence pour les systèmes HVAC, les capteurs d'humidité pour les système de ventilation, les stores dynamiques, les systèmes de programmation anticipée de une heure du système de refroidissement et de chauffage afin que la zone soit directement à la température souhaitée lorsque l'occupant arrive, un système autonome de refroidissement prenant en compte les éléments extérieurs, intérieurs et la présence dans la zone et un système autonome de chauffage prenant en compte la consigne de température souhaitée et la présence dans la pièce.

## 5. Les indicateurs d'intelligence dans les bâtiments

### a. Smart Readiness Indicator (SRI)

En 2017, dans le cadre de la directive de la performance énergétique des bâtiments (2018/844/UE), l'Union européenne a développé un indicateur d'intelligence du bâtiment : le Smart Readiness Indicator (SRI). Le niveau d'intelligence du bâtiment est évalué en fonction de trois fonctionnalités importantes (Commission Européenne, s. d.) :

- Optimisation de l'efficacité énergétique et des performances globales d'utilisation ;
- Adapter leur fonctionnement aux besoins de l'occupant ; et
- S'adapter aux signaux du réseau (par exemple flexibilité énergétique).

Cet indicateur consiste en une évaluation du niveau d'intelligence de neuf domaines techniques : chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, ventilation, éclairage, enveloppe, dynamique du bâtiment, électricité, recharge des véhicules électriques, surveillance et contrôle. (Commission Européenne, s. d.)

En pratique, cet indicateur prend la forme d'une feuille Excel préprogrammée où il suffit d'intégrer les caractéristiques du bâtiment. À la suite de cela, une valeur du potentiel d'intelligence est calculée, allant de 0% (bâtiment pas du tout intelligent) à 100% (bâtiment très intelligent).

Cet outil d'évaluation de l'intelligence des bâtiments, actuellement en phase de test dans de nombreux pays membres, permet de soutenir l'innovation dans le domaine des bâtiments et apporte un certain cadre pour l'étude des bâtiments intelligents.

### b. Ready 2 Services (R2S)

Ce label, développé par *Certivéa*, détermine les niveaux d'exigence attendus pour un bâtiment intelligent tertiaire. (*Cadre de Référence R2S*, s. d.) Le label Ready 2 Services est délivré à un bâtiment pouvant répondre à plusieurs critères tels que la connectivité numérique, l'accessibilité, la qualité de l'environnement intérieur ou encore la gestion des déchets. (*Cadre de Référence R2S*, s. d.)

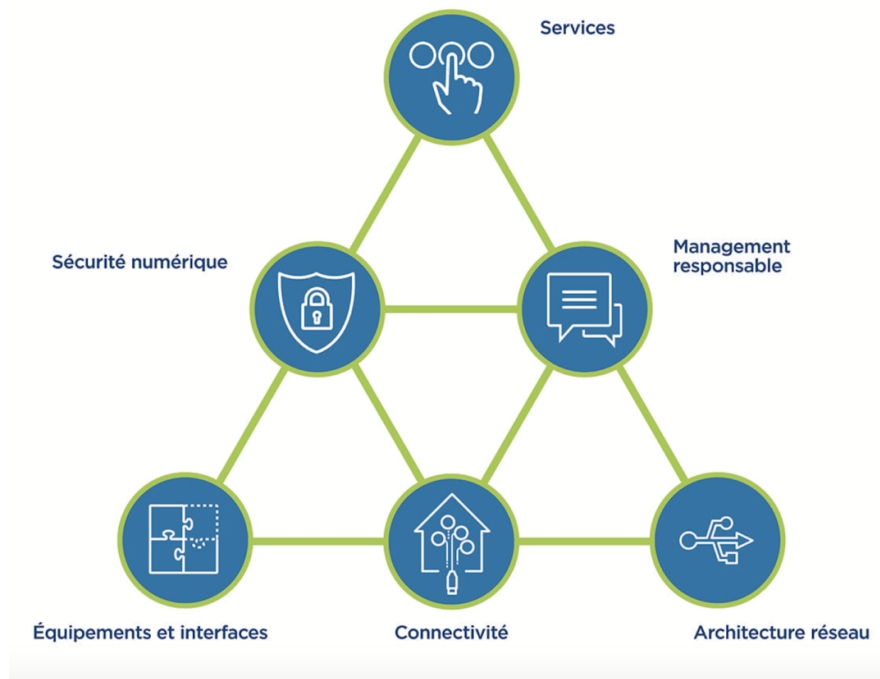


Figure 8: Les six thèmes d'évaluation du label R2S (Cadre de Référence R2S, s. d.)

Tel que la démontre la figure ci-dessus (cf. Figure 8), le label R2S est composé de six thèmes d'évaluation :

1. **Services** : *“Utiliser la capacité de connectivité et de communication du bâtiment pour le développement de services, a minima la mise en place d'une plateforme de suivi énergétique”.* (Cadre de Référence R2S, s. d.)
2. **Management responsable** : *“Optimiser la gestion de projet, le commissionnement, mettre en place un cadre de contractualisation et s'entourer d'acteurs compétents”.* (Cadre de Référence R2S, s. d.)
3. **Sécurité numérique** : *“Sécuriser les systèmes, les interfaces et mettre en place un dispositif permettant la protection des données à caractère personnel”.* (Cadre de Référence R2S, s. d.)
4. **Équipements et interfaces** : *“Mettre en relation les équipements, le réseau et les services grâce à leur interopérabilité. »* (Cadre de Référence R2S, s. d.)
5. **Connectivité** : *“assurer une connectivité performante du bâtiment via un raccordement optimal aux réseaux de communication”.* (Cadre de Référence R2S, s. d.)
6. **Architecture réseau** : *“Assurer la circulation des données à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment en améliorant les caractéristiques des réseaux du bâtiment”.* (Cadre de Référence R2S, s. d.)

Ce label repose également sur 4 grands principes (*Cadre de Référence R2S*, s. d) (Vanwelde & Vinel, 2024) :

1. **Une conception du bâtiment en trois couches** distinctes :
  - a. Couche “applications/services” ;
  - b. Couche “infrastructure de communication” ; et
  - c. Couche “équipements connectés”.
2. **L’interopérabilité des systèmes** : utiliser des interfaces de programmation et des API ouvertes et disponibles. Cela permet aux différents systèmes de fonctionner ensemble même s’ils ont été conceptualisés différemment.
3. **Utilisation de standard IP dans le bâtiment** : également pour développer une communication plus harmonieuse.
4. **Sécurité des données** : le développement de l’utilisation de toutes ces données informatiques nécessite un suivi et une sécurité importante.

c. Intelligent Building Index (IBI)

Développé par l’Institut Asiatique des bâtiments intelligents (AIIB) en Asie, cet indice correspond à une évaluation quantitative pour évaluer l’intelligence des bâtiments. L’IBI est composé de 10 “modules” (Asian Institute of Intelligent Buildings (AIIB), 2024) :

1. Green
2. Space
3. Comfort
4. Working Efficiency
5. Culture
6. E-Services and Technology Provisions
7. Safety and Structure
8. Management Practice and Security
9. Cost Effectiveness
10. Health and Sanitation

Le niveau d’intelligence de chaque module est évalué sur diverses caractéristiques qui le composent comme l’énergie, l’eau, l’air, l’environnement, etc. L’évaluation finale se traduit par l’obtention d’un score allant de 5 à 100 divisé en huit catégories. (Asian Institute of Intelligent Buildings (AIIB), 2024)

## 6. Les avantages des bâtiments intelligents

Les bâtiments intelligents apportent de nombreux avantages aux occupants et propriétaires du bâtiment. L'intégration du caractère d'intelligence aux bâtiments permet d'ajouter une certaine plus-value lors de la vente et de la location de ce type de bien. La sensibilisation à la consommation énergétique des bâtiments continuant de croître, les locataires et propriétaires potentiels sont davantage intéressés par les bâtiments intelligents. (King & Perry, 2017)

Le caractère autonome des bâtiments intelligents permet également un confort supérieur et une réduction de la charge de gestion énergétique généralement supportée par les occupants et propriétaires. (King & Perry, 2017)

D'un point de vue environnemental, les bâtiments intelligents permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre du bâtiment grâce à une surveillance intensive des consommations énergétiques. (Ejidike & Mewomo, 2023) Bien évidemment, l'avantage majeur des bâtiments intelligents réside dans la réduction de la consommation énergétique. Dans l'étude de Ejidike & Mewomo (2023), l'intégration des technologies intelligentes a permis de réaliser une économie énergétique de 34.78%.

Les bâtiments intelligents sont également bien adaptés afin de répondre aux menaces et garantissent un accès sécurisé aux différentes installations du bâtiment. Ces caractéristiques offrent une sécurité plus importante que dans les habitations traditionnelles. (Ejidike & Mewomo, 2023) De plus, la collecte intensive et l'analyse récurrente des données du bâtiment permettent également de réduire les coûts concernant la maintenance des techniques. En effet, grâce à une surveillance précise et quotidienne, les bâtiments intelligents peuvent réduire l'apparition de défaillance et réduire les coûts de maintenance. (Ejidike & Mewomo, 2023) En outre, ces bâtiments se distinguent par leur capacité à fournir un système dynamique et une réponse rapide vis-à-vis des changements auxquels ils peuvent être confrontés. Ainsi, cela permet une amélioration du confort et de la satisfaction pour les occupants. (Ejidike & Mewomo, 2023)

## 7. Les limites des bâtiments intelligents

Malgré les nombreux avantages des bâtiments intelligents cités dans le chapitre précédent, les projets de construction tardent à intégrer les technologies intelligentes dans les bâtiments. La première raison de cette réticence provient du fait que, malgré que le terme de bâtiment intelligent ait émergé depuis les années 80, peu d'acteurs du secteur sont informés concernant ces bâtiments, leurs applications et leurs avantages. (King & Perry, 2017)

L'intégration du caractère intelligent n'est pas une mince affaire. De plus, ces bâtiments récoltent beaucoup de données, ce qui nécessite une compréhension approfondie de ces données sortantes des systèmes de bâtiments ainsi qu'une bonne gestion de celles-ci. Pour certains, ces deux éléments peuvent paraître comme des obstacles, freinant l'expansion des bâtiments intelligents. (King & Perry, 2017)

Malgré les économies énergétiques, les technologies intelligentes peuvent engendrer un coût supplémentaire comparé à la construction de bâtiment plus traditionnel. Le manque de financement et d'incitations fiscales est également une barrière à l'adoption des bâtiments intelligents par la population. (King & Perry, 2017)

Dans les bâtiments intelligents se trouvent beaucoup d'appareils technologiques et connectés qui nécessitent une intercommunication afin d'offrir un système de réponse dynamique. Cependant, la diversité des protocoles de communications entre ces appareils ne rend pas toujours possible cette intercommunication. Effectivement, si le protocole de communication diffère entre deux appareils cela rend la communication difficile entre les deux réduisant la possibilité d'échanger des données. Afin de résoudre ce problème de diversité de protocole, la Open Connectivity Foundation (OCF) développe des normes pour l'Internet des Objets (IoT) afin de standardiser les protocoles ce qui rendrait les appareils intelligents compatibles entre eux. (King & Perry, 2017)

Certains questionnements éthiques émergent concernant la problématique de l'importante collecte des données dans un bâtiment intelligent. En effet, pour que ce dernier fonctionne correctement, celui-ci a besoin de récolter des données relatives aux personnes s'y trouvant à l'intérieur. La question de la violation de la vie privée se pose alors, notamment en ce qui concerne la collecte et l'analyse de données personnelles telles que l'âge, la fréquence de présence, ainsi que les habitudes et préférences des occupants. (Grosdhomme, 2019) Dans ce contexte d'analyse intelligente des données, une autre question éthique concernant le libre arbitre se manifeste. La surveillance omniprésente et l'automatisation dans les bâtiments intelligents peuvent conduire à une diminution du libre arbitre et à la manipulation des comportements des occupants. Effectivement, cette surveillance intense peut entraîner une modification du comportement habituel des occupants. Par conséquent, la surveillance numérique peut être utilisée afin de prévenir des comportements déviants et par extension influencer les comportements des utilisateurs. (Grosdhomme, 2019)

## B. La résilience

### 1. Définition

Le concept de résilience est un concept assez difficile à définir. Afin d'obtenir une vision plus précise et compréhensible de ce terme assez populaire dans beaucoup de disciplines ; il est intéressant de revenir à son sens premier. L'étymologie du mot résilience provient de "resilio, resilire" qui permet la création de deux termes distincts. Tout d'abord, la première signification se réfère au verbe de renoncer, de se dédire, dont le verbe se résilier découle de ces deux termes. (Lhomme et al., 2010)

La deuxième signification se rapporte au fait de sauter en arrière, de rebondir qui se traduit en anglais par le terme "bouncing back". Cette signification se rapporte davantage au sens du mot résilience qui est utilisé aujourd'hui. (Lhomme et al., 2010)

La première apparition du terme résilience dans le domaine scientifique provient des études de matériaux, notamment dans les travaux de Charpy. En effet, le test de Charpy consistait à casser un matériau à l'aide d'un mouton-pendule<sup>1</sup>. Ce type de test permettait de déterminer la résistance du matériau face à un choc et sa capacité à s'en remettre par la suite. Dans ce contexte, l'introduction du terme "résilience" ne semble pas apporter de nouveauté significative, car il peut être comparé à la signification du terme "résistance". (Lhomme et al., 2010)

Le terme de résilience se développe et apparaît dans le domaine de l'écologie ; un domaine scientifique étudiant les relations entre l'Homme et la nature. À la suite de l'introduction du terme de résilience, les écosystèmes ne sont plus étudiés de manière isolée, mais sont, au contraire, étudiés en tenant compte des systèmes sociaux. (Lhomme et al., 2010)

La première définition de résilience dans le domaine de l'écologie est introduite par Crawford Stanley Holling, un écologue canadien. Ce dernier définit alors la résilience dans l'écologie telle que *"the measure of the persistence of systems and their ability to absorb change and disturbance and still maintain the same relationships between populations or state variables"*. (Holling, 1973) La signification française de cette définition définit que la résilience est la mesure de la persistance des systèmes et de leur capacité à absorber le changement et les perturbations tout en maintenant les mêmes relations entre les populations ou les variables d'état. Dans cette définition, le concept de retourner à un état initial afin que le système soit caractérisé comme "stable" n'est pas intégré. Holling met donc en lien la résilience et la persistance d'un système, c'est-à-dire sa capacité à continuer d'exister dans son ensemble, sans pour autant subir des changements majeurs. Cependant, cette définition émet une sorte de contradiction, puisque si le système continue d'exister tout en changeant presque complètement de structure, il n'est alors plus considéré comme un système résilient. (Lhomme et al., 2010)

Par la suite, Holling va alors réexaminer sa définition : *"resilience is a buffer capacity or ability of a system to absorb perturbation, or the magnitude of the disturbance that can be absorbed"*

---

<sup>1</sup> Outil permettant de mesurer la résistance d'un matériau.



*before a system changes its structure by changing the variables and processes that control behavior”* (Holling et al., 1995) Cette nouvelle définition définit que la résilience est une capacité tampon ou la capacité d’un système à absorber une perturbation, ou la magnitude de la perturbation qui peut être absorbée avant qu’un système ne change sa structure en modifiant les variables et les processus qui contrôlent son comportement. Dans cette deuxième définition plus précise, la structure fondamentale du système ne change pas. Ce sont davantage les variables qui le caractérisent qui vont changer, permettant à celui-ci de s’adapter. (Lhomme et al., 2010) Cette seconde définition s’aligne davantage sur la notion de *“engineering resilience”* mettant plutôt en avant un *“retour à l’équilibre”*, ce qui correspond à ne pas avoir de changements majeurs au niveau de la structure fondamentale. (Lhomme et al., 2010)

## 2. Distinction entre résilience, résistance, adaptabilité et ductilité

Comme développé plus haut, la première définition de résilience a pu être liée au terme de résistance. Cependant, l’évolution dans les études des matériaux a permis de mettre en opposition le terme de ductilité, qui correspond à la capacité du matériau à se déformer, et la fragilité de celui-ci, c’est-à-dire à se rompre. Les capacités de ductilité sont alors liées au terme de résilience, démontrant la capacité des propriétés du matériau à changer sans pour autant modifier sa structure fondamentale. Toutefois, les capacités de résistances sont importantes pour évaluer la résilience d’un système. Or, un système trop résistant et rigide ne pourra pas s’adapter par rapport aux perturbations qu’il subit et par conséquent être résilient. (Lhomme et al., 2010)

Le terme de résilience est également fortement mis en liaison avec l’adaptabilité. Cette dernière étant caractérisée comme la capacité du système à s’adapter au changement et à faire face à des perturbations. . (Lhomme et al., 2010) Cependant, la résilience se différencie de l’adaptabilité par le fait que la résilience possède des capacités d’absorption, qui correspondent à des capacités de réponse, afin de se remettre de ces perturbations. La résilience est également un concept qui prendra en compte les précédentes perturbations, afin de développer des capacités de réponses les plus prometteuses permettant une adaptation des variables du système sans perturber intégralement sa structure fondamentale. Bien évidemment, l’adaptabilité fait partie du concept de résilience sans pour autant en définir sa totalité. (Lhomme et al., 2010)

## 3. La résilience climatique

Le changement climatique est un phénomène naturel accentué par les activités humaines accompagnées de l’émission intensive de gaz à effet de serre dans l’atmosphère. Cette augmentation en concentration de gaz dans l’atmosphère provoque, de manière générale, une hausse des températures. Mais aussi, le changement climatique altère la variabilité et l’intensité des phénomènes naturels tels que les inondations, les orages, les cyclones, la montée des eaux, et encore bien d’autres.

Face à ces perturbations, le terme de résilience climatique est né. Ce dernier est défini comme *“la capacité d’un système socioécologique à absorber les tensions et à maintenir sa fonction*

malgré les tensions externes imposées par le changement climatique et à s'adapter, se réorganiser et évoluer vers des configurations plus souhaitables qui améliorent la durabilité du système, le laissant mieux préparé aux impacts futurs du changement climatique." (Menna Allah SALAH Refai Mahmoud, 2023) La résilience climatique caractérise donc une réponse dynamique et efficace face au changement climatique en permettant de conserver des conditions de vie favorables.

L'organisation de coopération et de développement économique (OCDE) a identifié quatre dimensions de résilience climatique (Menna Allah SALAH Refai Mahmoud, 2023), représentées dans la figure ci-dessous (cf. Figure 9) :

1. Dimension économique
2. Dimension sociale
3. Dimension environnementale
4. Dimension institutionnelle

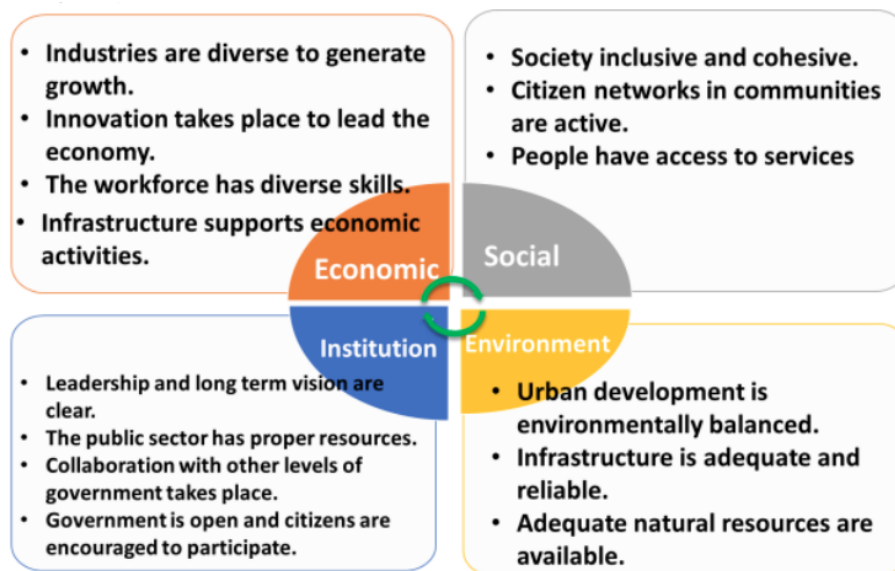


Figure 9: Représentation des quatre dimensions de la résilience climatique (Menna Allah SALAH Refai Mahmoud, 2023)

La résilience climatique peut également considérer cinq piliers essentiels (De Graaf-Van Dinther & Ovink, 2020) :

1. Threshold capacity (capacité de seuil): correspond à la capacité de prévenir des dommages en mettant en place un seuil permettant de faire face aux variations environnementales.
2. Coping capacity (capacité de gestion): c'est la capacité d'un système (quartier, ville, pays) à faire face aux conditions environnementales extrêmes et de réduire les conséquences de ces conditions lorsqu'elles se produisent.
3. Recovery capacity (capacité de rétablissement): c'est la capacité de revenir à un état normal, ou un état meilleur, qu'avant les conditions environnementales extrêmes.

4. Adaptive capacity (capacité d'adaptation): capacité de la société à prévoir et anticiper les conditions futures incertaines.
5. Transformative capacity (capacité de transformation): la capacité de développer un environnement favorable, en renforçant les capacités, tout en mettant en place des actions qui favorisent une transition vers une société plus résiliente climatiquement.

#### 4. La résilience dans les bâtiments

Les bâtiments sont extrêmement vulnérables face aux conséquences du changement climatique. À titre d'exemple, Miami souvent considéré comme "la ville magique" est l'une des villes dont les bâtiments sont les plus exposés face aux variations du changement climatique. Dans un seul périmètre urbain, les constructions de cette ville sont confrontées à la montée des eaux, l'augmentation des inondations, l'exposition accrue aux ouragans et l'augmentation de la température moyenne. (Bouramdane, 2024)

La résilience dans les bâtiments est un terme vaste qui nécessite d'être clarifié et ciblé afin d'acquérir une compréhension adéquate. En effet, il existe plusieurs sortes de résilience telles que la résilience structurelle, la résilience face aux inondations et à la montée des eaux, la résilience au feu, la résilience sismique ou encore la résilience climatique. Selon l'U.S Green Building Council (USGBC) et ses partenaires, la résilience des bâtiments correspond à "*the ability to prepare and plan for, absorb, recover from, and more successfully adapt to adverse events.*" (U.S Green Building Council, 2018) Cette définition définit donc qu'un bâtiment doit posséder la capacité de se préparer, de planifier à absorber, de se remettre et de s'adapter de manière efficace aux événements défavorables produits par le phénomène de changement climatique. USGBC clarifie davantage ce terme de résilience de bâtiment en définissant certains critères pour celle-ci:

- Conception, planification et construction proactive pour minimiser les dommages causés par les catastrophes naturelles raisonnablement prévues. (U.S Green Building Council, 2018)
- Création et exécution d'un plan de développement du site qui favorise une végétation saine, des sols et des écosystèmes aquatiques pour fournir des services écosystémiques tels que le contrôle des inondations. (U.S Green Building Council, 2018)
- Conception, construction et entretien du site du projet et des paysages adjacents pour réduire le risque d'incendie de forêt. (U.S Green Building Council, 2018)
- Soutien à la récupération communautaire lors d'événements catastrophiques et de pannes prolongées du réseau électrique en permettant l'îlotage et la fiabilité de l'alimentation en électricité pour les services essentiels et la survie passive dans les structures construites. (U.S Green Building Council, 2018)

À l'heure actuelle, il existe plusieurs procédures de certification qui prennent en compte le concept de résilience dans les bâtiments. LEED, une des premières certifications durables des bâtiments, intègre un outil d'évaluation de la résilience climatique qui évalue le potentiel de résilience de chaque "crédit" de la certification. (U.S Green Building Council, 2018) PEER, est un système de certification durable des bâtiments évaluant leurs systèmes électriques. Cette certification travaille actuellement sur l'intégration du concept de résilience afin de garantir une livraison résiliente et fiable à l'électricité dans les infrastructures. (U.S Green Building Council, 2018)

RELi est un nouveau système d'évaluation de résilience pour les bâtiments et quartiers. Cette certification nécessite une évaluation et planification des risques du changement climatique et également des plans de préparations afin de pouvoir atténuer l'exposition à ces risques. RELi exige notamment que les infrastructures déterminées comme résilientes puissent fournir un accès fondamental aux premiers secours, à l'eau, la nourriture ou encore les systèmes de communication. De plus, les bâtiments et quartiers doivent développer une gestion innovante et résiliente face aux événements météorologiques se déroulant à cause du changement climatique. (U.S Green Building Council, 2018)

## 5. La résilience thermique des bâtiments

L'étude de ce mémoire se concentre sur la résilience thermique du bâtiment, qui est définie telle que *"a building's ability to maintain a comfortable and safe indoor thermal environment for its occupants throughout its lifetime; particularly during extreme weather events arising from climate change or building system disruptions due to technical failure or power outages."* (Hong et al., 2023). Cette définition de la résilience thermique met en évidence que le bâtiment doit être capable de garantir un confort thermique intérieur répondant aux besoins de ses occupants durant toute sa durée d'occupation, et précisément lorsque celui-ci fait face à des événements météorologiques extrêmes provoqués par le changement climatique.

Durant les dernières décennies, lors de la prise de conscience des conséquences météorologiques liées au changement climatique, plusieurs études se sont penchées sur la résilience thermique des bâtiments. Les chercheurs de *l'International Energy Annex 80* (Agence International de l'énergie) se sont concentrés sur le développement de systèmes de refroidissement à faible consommation et faible émission de carbone afin de renforcer la résilience thermique des bâtiments. (Hong et al., 2023). Mais aussi, les chercheurs Homaei et Hamdy (2021) ont eu pour objectif de quantifier la résilience thermique du bâtiment en proposant une méthodologie basée sur des courbes représentant la résilience thermique du bâtiment face à des cas particuliers temporaires (tel que des coupures d'électricité en hiver). Les courbes de résilience proposées dans leur travail représentent la réaction du bâtiment face à cet événement et permettent de déterminer comment les bâtiments peuvent conserver un confort thermique stable malgré ces événements perturbateurs. (Hong et al., 2023)

La résilience thermique est un aspect du bâtiment pris en considération par les différentes parties prenantes durant tout le cycle de vie du bâtiment. L'intégration d'une étude de la

résilience thermique permet aux architectes et ingénieurs d'améliorer les performances et le confort des occupants durant la phase de conception. Cette considération apporte notamment un avantage au promoteur immobilier, en augmentant la valeur du bien. Les propriétaires et occupants peuvent jouir d'un confort thermique constant et cela, peu importe les événements météorologiques extrêmes qui peuvent se dérouler. (Hong et al., 2023)

Tel que le démontre la figure ci-dessous (cf. Figure 10), il existe différents facteurs qui affectent la résilience thermique des bâtiments, ces derniers peuvent être répartis en plusieurs catégories (Hong et al., 2023):

1. L'environnement extérieur : le confort thermique intérieur d'un bâtiment est fortement influencé par les conditions météorologiques extérieures. En fonction de l'emplacement de celui-ci, que ce soit dans un climat chaud, froid ou tempéré, il devra faire face à des conditions météorologiques extrêmes qui peuvent se contredire. Mais aussi, la localisation urbaine ou rurale du bâtiment va également influencer la résilience thermique puisque cette différence de localisation peut, par exemple, engendrer des effets d'îlots de chaleur urbains. (Hong et al., 2023)
2. Les propriétés du bâtiment : bien évidemment, les attributs structurels et physiques du bâtiment exercent une influence sur la résilience thermique de celui-ci. Effectivement, son orientation, son enveloppe, ses matériaux, le positionnement des vitrages et des protections solaires jouent un rôle important dans la résilience thermique. Par exemple, une structure lourde composée de matériaux dits "lourds" possède une inertie plus importante, apportant un temps de réponse plus long et une diminution des variations des températures. (Hong et al., 2023)
3. Les caractéristiques des occupants : le confort est une caractéristique variant en fonction des personnes, du sexe, de l'âge et des préférences des occupants. En fonction des caractéristiques des occupants du bâtiment, la résilience thermique de celui-ci sera différente. Effectivement, la résilience thermique dans une maison de repos comportera différents facteurs que dans un internat pour adolescents. (Hong et al., 2023)
4. Aspects du réseau électrique : la résilience du bâtiment est liée à la fiabilité et la résilience du réseau électrique, c'est-à-dire à sa capacité à supporter et surmonter les perturbations. Cette capacité est notamment possible grâce à l'intégration des sources d'énergies renouvelables dans le réseau électrique. (Hong et al., 2023)

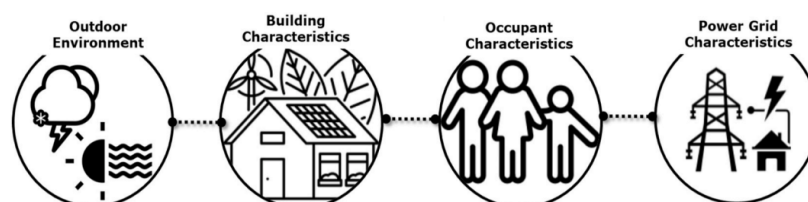


Figure 10: Les facteurs influençant la résilience thermique des bâtiments (Hong et al., 2023)

#### a. L'évaluation de la résilience thermique du bâtiment

À l'heure actuelle, il n'existe pas d'indicateur normé pour évaluer la résilience thermique des bâtiments. Dans leurs recherches, Homaei et Hamdy (2021) se sont penchés sur la problématique proposant un indicateur permettant de quantifier la résilience climatique. Le WUMTP est l'indicateur représentant la performance thermique du bâtiment sur plusieurs zones. Celui-ci a la particularité d'intégrer les capacités d'absorption et d'adaptation pendant l'événement météorologique perturbateur et la capacité de récupération après celui-ci. Cet indicateur est calculé en déterminant l'écart de performances thermiques par rapport aux consignes de température lors de la durée d'occupation. Cela signifie qu'un bâtiment possédant un WUMTP bas aura une résilience thermique importante. (Homaei & Hamdy, 2021)

Certaines études de résilience thermique de bâtiment se sont basées sur d'autres indicateurs tels que (Homaei & Hamdy, 2021):

- Le risque de surchauffe : évaluation de l'exposition du bâtiment aux phénomènes de surchauffe lors de phénomènes météorologiques perturbateurs ;
- L'indice de chaleur : c'est un dictateur développé aux USA prenant en compte la température et l'humidité relative de la zone afin d'évaluer la conservation du confort thermique lors des événements déstabilisants ;
- La survie passive : évaluation de la capacité du bâtiment à conserver un confort thermique intérieur sans recourir à des solutions actives, telles que la climatisation, durant ces événements ; et
- L'autonomie thermique : évaluation de la capacité du bâtiment à conserver son confort thermique lors des phénomènes perturbateurs sans dépendre du réseau externe.

#### b. L'intégration de la résilience thermique dans le bâtiment

Lors de la conception du bâtiment, la mise en place de stratégies passives efficaces permet d'améliorer la résilience thermique du bâtiment. Effectivement, l'isolation efficace, la réduction des gains de chaleur en été et la réduction des pertes thermiques en hiver permettent de participer à la conservation d'un confort thermique intérieur, et ce malgré l'apparition de phénomènes météorologiques extrêmes. Les solutions dites passives, telles que des toits réfléchissants, permettent de réduire considérablement les gains de chaleur indésirables en été. Cependant, cela peut être défavorable en hiver lors de période de froid où les apports solaires sont les bienvenus. Pour pallier cette problématique, des revêtements dynamiques sont étudiés permettant d'adapter l'apport de gain de chaleur en fonction des saisons et des besoins thermiques internes. (Homaei & Hamdy, 2021)

L'intégration de la ventilation naturelle dans la conception du bâtiment permet également d'augmenter sa résilience thermique en profitant d'un refroidissement lorsque

l'environnement extérieur possède une température plus basse que l'environnement intérieur du bâtiment. Ces solutions passives ne sont pas dépendantes d'une alimentation électrique. Cette particularité permet aux bâtiments d'être plus résilients thermiquement puisque ceux-ci peuvent continuer à subvenir à leurs besoins thermiques même lorsqu'une coupure d'alimentation électrique survient lors d'événements météorologiques extrêmes. (Homaei & Hamdy, 2021)

D'autres solutions, dites "actives" permettent également d'intégrer la résilience thermique dans le bâtiment. Les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (HVAC) permettent de conserver un environnement intérieur confortable en fournissant de l'air frais, un apport ou une réduction de température, un contrôle d'humidité et une circulation d'air. Cependant, ces systèmes sont reliés au réseau électrique et nécessitent par conséquent un couplage avec un système de secours ou des batteries afin de pouvoir continuer à fonctionner lors de coupure d'électricité. De plus, ces systèmes sont très énergivores et nécessitent une maintenance régulière. (Homaei & Hamdy, 2021) Néanmoins, des solutions actives telles que la programmation anticipée d'une heure du système de refroidissement qui consiste à refroidir le bâtiment en avance à l'apparition de la vague de chaleur permettent à celui-ci de faire face et de rebondir après un phénomène perturbateur. (Homaei & Hamdy, 2021)

L'intégration de la résilience thermique dépend également du comportement de l'occupant. En effet, des actions telles que réduire sa température de confort ou adapter ses couches de vêtements sont des solutions adaptatives permettant de contribuer au développement de la résilience thermique du bâtiment. (Homaei & Hamdy, 2021)

## VIII. Méthodologie

La méthodologie adoptée dans cette étude, représentée par la figure ci-dessous (cf. Figure 11), vise à évaluer la résilience des bâtiments intelligents face aux variations du changement climatique. Dans cette perspective, un modèle de référence a été validé, représentant essentiellement une nouvelle construction en Région Wallonne. Ensuite, conformément aux réflexions exposées dans l'état de l'art, les divers aspects de l'intelligence dans un bâtiment ont été représentés sous plusieurs niveaux. Ces niveaux d'intelligence distincts ont été intégrés dans les logiciels SketchUp, TRNBuild et TRNSYS afin de procéder à des simulations. Ces simulations ont généré des données précises, incluant le temps de surchauffe, la demande en chauffage et en refroidissement, ainsi que les variations de température et d'humidité à l'intérieur du bâtiment. Pour évaluer la résilience des différents niveaux d'intelligence ainsi modélisés, un indicateur de résilience, combinant le temps de surchauffe et l'indice de chaleur, a été développé. Dans un premier temps, les simulations sont générées avec les données météorologiques actuelles. Dans un second temps, afin de pouvoir évaluer ces bâtiments intelligents face au changement climatique, les simulations sont générées avec des données météorologiques incluant le changement climatique pour les années 2040 à 2060 dans la région d'Arlon. Enfin, ces résultats seront comparés afin de déterminer des conclusions significatives.

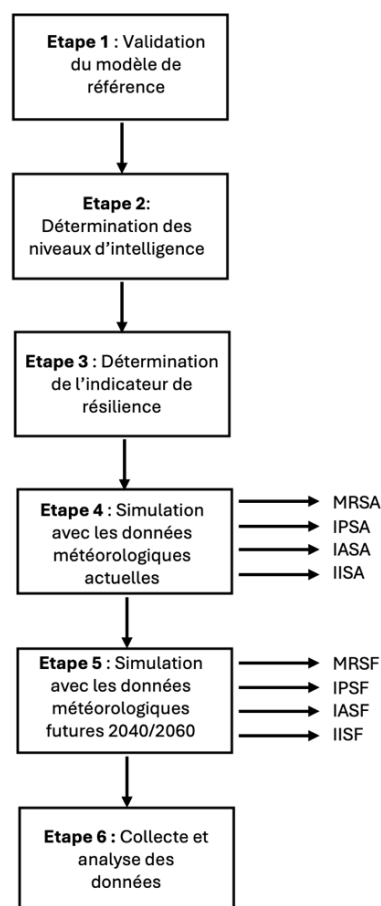


Figure 11: Représentation de la méthodologie



## A. Validation du modèle de référence

Le bâtiment de référence choisi pour cette étude correspond à une maison à énergie positive construite récemment dans la vallée d'Attert (Arlon) faisant partie du projet transfrontalier VallEnergie. La caractéristique d'une maison à énergie positive correspond au fait que celle-ci produit davantage d'énergie qu'elle n'en consomme sur une année complète. Selon la nouvelle Directive européenne 2010/31/UE relative à la performance énergétique des bâtiments, toutes les nouvelles constructions doivent être zéro énergie (nZEB : « nearly Zero Energy Building »). La maison VallEnergie correspond à un bon modèle de référence puisqu'il répond aux critères énergétiques imposés par l'Union européenne qui doivent être respectés dès l'année 2020.

Selon *Embuild*, la surface habitable moyenne des constructions a réduit de 150 m<sup>2</sup> à 125m<sup>2</sup> sur une période de 20 ans. (Verpoorten, 2023) La maison VallEnergie possède un plancher chauffé de 150m<sup>2</sup>, celle-ci rentre donc dans la fourchette haute.

Le modèle de référence est une habitation trois façades abritant un ménage de quatre personnes. En 2021, 1828 maisons trois façades ont été construites en Wallonie, ce qui représente pratiquement 30% des nouvelles constructions. (Spw, s. d.) De plus, avec de moins en moins d'espaces disponibles pour de nouvelles constructions, les constructions quatre façades deviendront de moins en moins courantes, ce qui favorise les constructions trois façades. (Gadisseux, 2023) Une analyse détaillée des nouvelles constructions au Luxembourg confirme également une forte augmentation des constructions trois façades. (STATEC, s. d.)

L'habitation déterminée comme modèle de référence possède une structure dite légère, ce qui correspond à une habitation en ossature bois. En Wallonie, 80% des maisons en structure légère possèdent une ossature bois. (Thijs, 2023) Cette tendance rejoint les objectifs de la Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments, qui vise à réduire l'empreinte environnementale des nouvelles constructions. À l'avenir, des outils tels que le Bilan Carbone seront employés pour évaluer l'impact environnemental des bâtiments et atteindre les objectifs environnementaux de l'Union européenne.

En conclusion, les recherches menées sur les tendances du marché de la construction en Wallonie confirment que le modèle de référence représente fidèlement une nouvelle construction moyenne dans la région. Celui-ci constitue ainsi un choix approprié pour servir de référence à l'ensemble des nouvelles constructions en Wallonie. À la suite des simulations et des comparaisons effectuées, l'utilisation de ce modèle permettra de déduire des conclusions générales pour l'ensemble du parc immobilier des nouvelles constructions en Wallonie.

## B. Détermination des niveaux d'intelligence

Les recherches menées sur les bâtiments intelligents dans l'état de l'art permettent de faire ressortir différents niveaux d'intelligence dans un bâtiment. Dans le cadre de ce mémoire, trois niveaux d'intelligence, représentés dans la figure ci-dessous (cf. Figure 12) vont être considérés afin de pouvoir les simuler dans le logiciel de simulation dynamique TRNSYS.

Le premier niveau d'intelligence correspond à "l'intelligence passive". Dans ce niveau, l'intelligence est dite passive, car elle réside dans les structures et la conception du bâtiment. En effet, tel que développé dans les définitions, un bâtiment intelligent correspond avant tout à une structure intelligente et bien réfléchi qui permet de subvenir aux besoins de confort des occupants. Dans ce niveau, s'y retrouvent notamment les techniques de conception passives telles que les ombrages passifs, l'orientation du bâtiment, le refroidissement passif, etc.

Le deuxième niveau est caractérisé comme "l'intelligence active". Ce dernier comprend des systèmes automatisés permettant une réaction davantage dynamique aux nécessités de confort interne. Les technologies comme les lumières à détecteur de présence, les prises intelligentes ou encore les ombrages dynamiques sont considérées dans ce deuxième niveau d'intelligence.

Le troisième niveau d'intelligence considéré dans cette étude correspond à "l'intelligence interactive". Celui-ci correspond au niveau d'intelligence le plus avancé. Il comporte notamment des systèmes de gestion énergétique, qui sont des systèmes préventifs et interactifs avec les données récoltées en instantanés. Dans ce troisième niveau, s'y retrouve également le concept d'Internet des objets permettant des échanges d'informations instantanées entre les différentes technologies composant le bâtiment. De plus, ce type d'intelligence est également interactif avec les occupants. Cela signifie que les préférences et besoins instantanés sont récoltés et analysés par les technologies du bâtiment. Dans ce troisième niveau, les systèmes du bâtiment sont capables de prendre en compte différents paramètres intérieurs et extérieurs afin de produire une réponse dynamique et adaptée au confort souhaité.

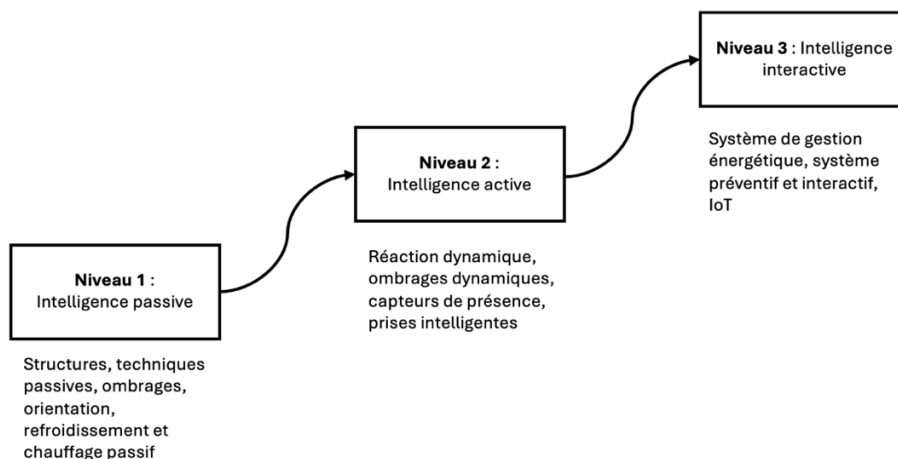


Figure 12: Représentation des différents niveaux d'intelligence considérés dans cette étude

## C. Détermination de l'indicateur de résilience thermique

Dans le cadre de cette étude, un indicateur est développé afin de pouvoir évaluer la résilience thermique des différents niveaux d'intelligence du bâtiment face aux variations du changement climatique. Dans cet indicateur s'y retrouvent deux paramètres :

- **Le temps de surchauffe** : le pourcentage de temps de surchauffe est évalué sur l'année lors de la présence des occupants. Le modèle de référence devant répondre aux critères d'une maison passive, le phénomène de surchauffe est présent lorsque la température intérieure est plus grande que 25°C. Afin d'assurer la précision des données, le calcul du pourcentage de surchauffe global du bâtiment se base sur la détermination de la température pondérée en fonction du volume des différentes zones. L'équation de la température pondérée est la suivante :

$$\frac{(T^{\circ}Zone1 \times VolumeZone1) + (T^{\circ}Zone2 \times VolumeZone2) + \dots + (T^{\circ}Zone i \times VolumeZone i)}{Volume\ total}$$

- **L'indice de chaleur** : ce dernier développé aux États-Unis correspond à la température ressentie lorsque la température intérieure de l'air est combinée à l'humidité relative. Cet indicateur représente une plage de température possédant différents niveaux de vigilance (The University of North Carolina, 2023) :
  - **Prudence : 80-90°F**. Des symptômes de fatigue peuvent être présents en cas d'exposition prolongée.
  - **Extrême prudence : 91°-103°F**. Des coups de chaleur, des crampes ou des symptômes d'épuisement sont visibles en cas d'exposition prolongée.
  - **Danger : 104-124°F**. Coup de chaleur et crampes beaucoup plus importantes.
  - **Danger extrême : >125°F**. Nécessiter de stopper toute activité ou travail.

Les différentes catégories de vigilances sont reprises dans le tableau ci-dessous (cf. Figure 13) :

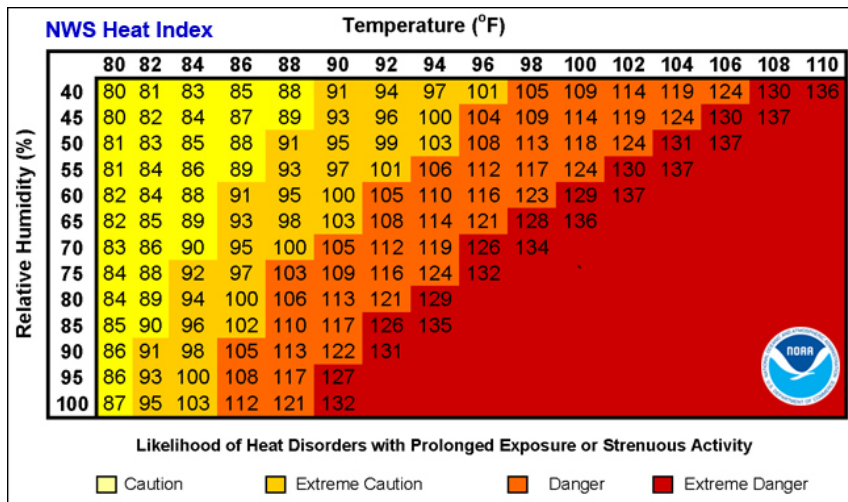


Figure 13: Heat Index (NOAA's National Weather Service, s. d.)

L'indice de chaleur, également appelé le Heat Index, peut-être calculé en degré Celsius. Cependant, pour des raisons de certitude concernant l'équation de calcul, l'indice de chaleur est calculé en degré Fahrenheit dans le cadre de cette étude. L'équation étant la suivante :

$$\text{Heat Index (HI)} = c_1 + c_2T + c_3R + c_4TR + c_5T^2 + c_6R^2 + c_7T^2R + c_8TR^2 + c_9T2R^2$$

$T$  = température en Fahrenheit

$R$  = l'humidité relative

$C_1 = -42,3790000000$

$C_2 = 2,04901523$

$C_3 = 10,14333127$

$C_4 = -0,22475541$

$C_5 = -0,0068378300$

$C_6 = -0,0548171700$

$C_7 = 0,0012287400$

$C_8 = 0,0008528200$

$C_9 = -0,0000019900$

Dans toutes les simulations et pour chaque pièce de vie du bâtiment, le pourcentage de surchauffe et la moyenne annuelle de l'indice de chaleur seront évalués afin d'en déterminer la résilience thermique du bâtiment.

## D. Simulation avec les données actuelles

Les simulations dynamiques sont réalisées avec le logiciel TRNSYS (TraNsient System Simulation tool). Ce dernier correspond à un logiciel permettant de simuler les comportements des systèmes qui le composent. Pour chaque simulation, la structure utilisée reste plus ou moins similaire puisque les mêmes paramètres sont évalués pour les différentes simulations.

L'environnement de simulation est caractérisé par des liens entre les différents types de TRNSYS, tels que le démontre la figure ci-dessous (cf. Figure 14). Ces différents types correspondent à des boîtes noires, dont il est possible d'en ouvrir le contenu afin de modifier certaines variables. Voici l'environnement de simulation général produit pour chaque simulation :

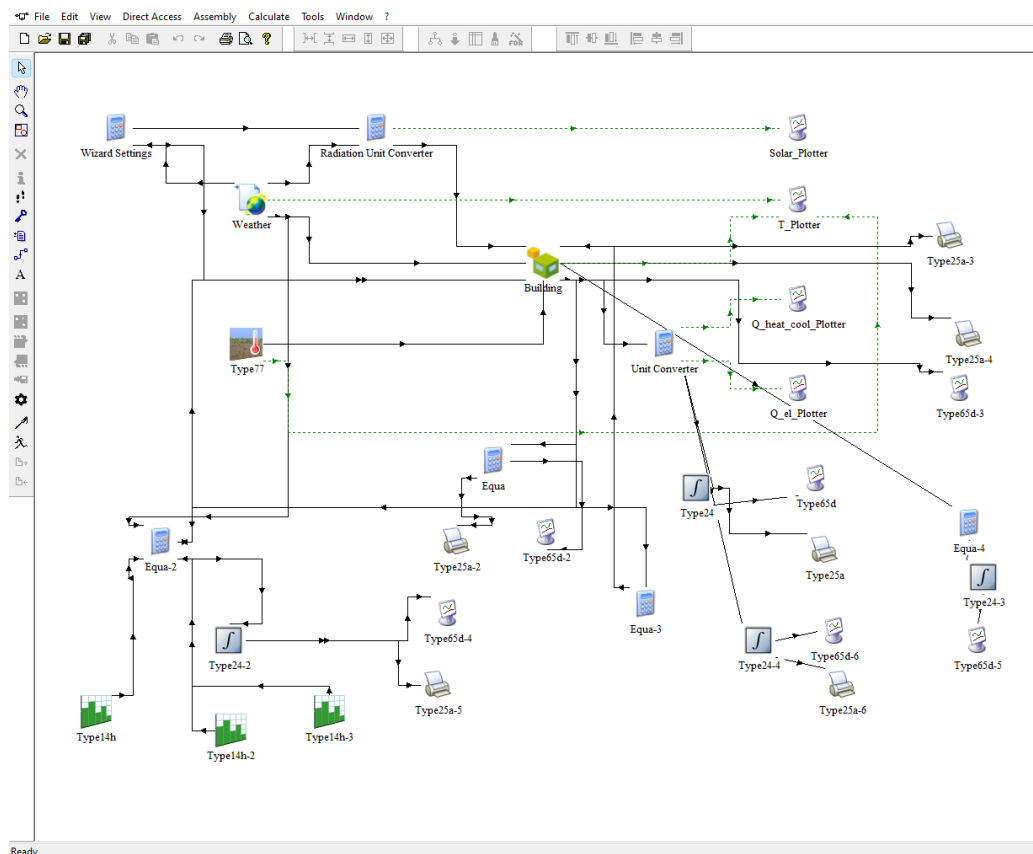


Figure 14: Représentation de l'environnement de simulation général TRNSYS

Tel qu'expliqué précédemment, chaque type possède un rôle bien précis :

- Type 56 : correspond aux données du bâtiment encodé dans l'extension TRNBuild, en lien avec le logiciel TRNSYS.
- Calcuette : celle-ci permet de réaliser les différentes équations en utilisant des fonctions telles que Greater Than (pour la surchauffe) et AND (pour accumuler plusieurs conditions).

- Type 24 : qui correspond à un intégrateur et intègre donc les données sur une année complète.
- Type 65 : « Online Plotter » qui permet de créer une représentation graphique des données analysées.
- Type 25 : « Printer » qui selon l'extension qu'on lui impose (.xls, .txt ou autre), permet de créer un nouveau document regroupant les données sélectionnées sous le format voulu.
- Type 16c/Weather: permet de lier les données relatives à l'environnement : ensoleillement, humidité, température, etc.
- Type 77 : permet de sortir les données relatives à la température du sol.
- Type 14 « Forcing function » : dans ce contexte-ci, ils ont permis de construire des horaires de présence afin d'intégrer ces informations dans des équations.

Toutes les simulations sont réalisées sur une année complète représentant 8760 heures. Le pas de temps est d'une heure. Cela détermine que la simulation calculera les paramètres demandés toutes les heures.

## E. Simulation avec les données du changement climatique

Les données utilisées afin de simuler l'environnement météorologique futur dans TRNSYS sont celles qui ont été développées et étudiées par Doutreloup et al. (2022). Ces données météorologiques ont été élaborées à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional (MAR), adapté pour la Belgique par le laboratoire de climatologie de l'université de Liège, sous la direction de Monsieur Fettweis, fournissant ainsi des données à haute résolution spécifiques aux différentes régions du pays. Les données produites par ce modèle MAR ont ensuite été forcées par la réanalyse ERA5, qui représente de manière très précise le climat réel grâce à une reconstitution des conditions météorologiques antérieures. (Doutreloup et al., 2022) Ce modèle MAR a également été forcé via trois modèles spécifiques du Modèle de Système Terrestre (ESM) : BCC-CSM2-MR, MPI-ESM1.2, MIROC6. Ces forçages permettent au modèle MAR de produire des simulations climatiques qui tiennent compte à la fois des conditions réelles passées (ERA5) et des projections futures basées sur différents scénarios climatiques (modèles ESM). (Doutreloup et al., 2022)

Les données générées via les forçages du modèle MAR suivent des protocoles distincts. Premièrement, les fichiers Année Météorologiques Typiques (TMY) sont produits afin de créer une année climatique typique qui reflète les conditions moyennes projetées. Ensuite, les fichiers Année Météorologique Extrême (XMY) se concentrent sur les conditions extrêmes futures en sélectionnant les mois les plus extrêmes pour des périodes spécifiques. Enfin, les données relatives aux fichiers Événements Caniculaires (HWE) permettent de classer les événements de canicule selon trois critères : leur intensité, la durée et leur température maximale. (Doutreloup et al., 2022)

Dans le cadre de cette étude, seules les données provenant du fichier Années Météorologiques Typiques (TMY) ont été considérées pour la période définie de 2040 à 2060. Ces données ont été choisies afin de pouvoir évaluer la résilience thermique des bâtiments intelligents dans un avenir plus ou moins proche. De plus, les données relatives aux années météorologiques typiques ont été choisies afin de fournir une représentation moyenne précise des projections attendues, en excluant délibérément la prise en compte des événements extrêmes envisageables pouvant altérer l'évaluation moyenne de la résilience thermique des bâtiments intelligents.

Les données météorologiques projetées dans le fichier Années Météorologiques Typiques combinent les données relatives à la température, l'humidité relative, le rayonnement diffus/direct/global, la direction et la vitesse du vent, la température de rosée, la nébulosité, la température du ciel, l'humidité spécifique et les précipitations.

Le graphique ci-dessous (cf. Figure 15) représente une comparaison entre les données météorologiques relatives à la température actuelle et de celles prévues pour une année typique dans la période 2040-2060. Le modèle ESM utilisé pour projeter les conditions météorologiques futures est le modèle BCC-CSM2-MR. Il intègre les paramètres climatiques futurs tels que la température, l'humidité, les précipitations, ainsi que le rayonnement global, diffus et direct, et la vitesse du vent. Les données relatives aux températures actuelles sont obtenues à partir du logiciel TRNSYS via un fichier TM2 de METEONORM qui exploite les

données météorologiques de la ville de Trèves, sélectionnée pour ses conditions climatiques les plus similaires à celles d'Arlon.

Ce graphique (cf. Figure15) met en évidence une augmentation significative de la température lors de la période estivale, comme représenté par la ligne orange approximativement au milieu du graphique. Cette illustration expose également que la « période estivale » dura plus longtemps, avec des mois de septembre et d'octobre beaucoup plus chauds qu'actuels. La température moyenne passe ainsi de 9,14°C pour les données actuelles à 10,96°C pour les prévisions, ce qui équivaut à une hausse de près de deux degrés en l'espace de 16 ans.

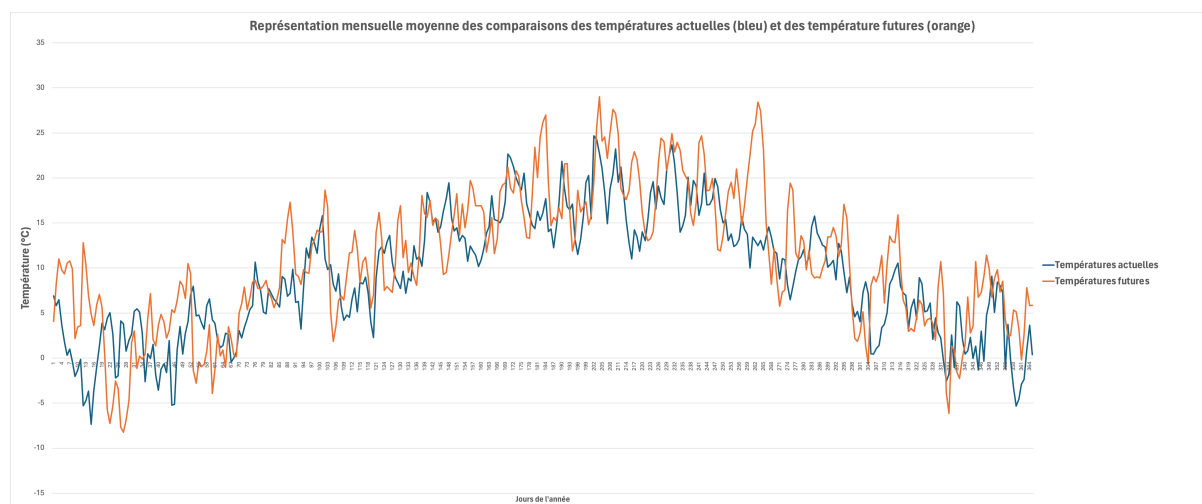


Figure 15: Graphique illustrant la comparaison des températures actuelles et celles prédites pour une année typique entre 2040 et 2060

Le deuxième graphique ci-dessous (cf. Figure16) permet d'obtenir une autre représentation de la différence entre les données météorologiques actuelles et futures. Celui-ci illustre la comparaison entre l'humidité relative actuelle et celle projetée pour une année typique dans la période 2040-2060. Une certaine augmentation de l'humidité relative future peut être soulignée pour la période hivernale, surtout pour les mois de février, mars, avril.

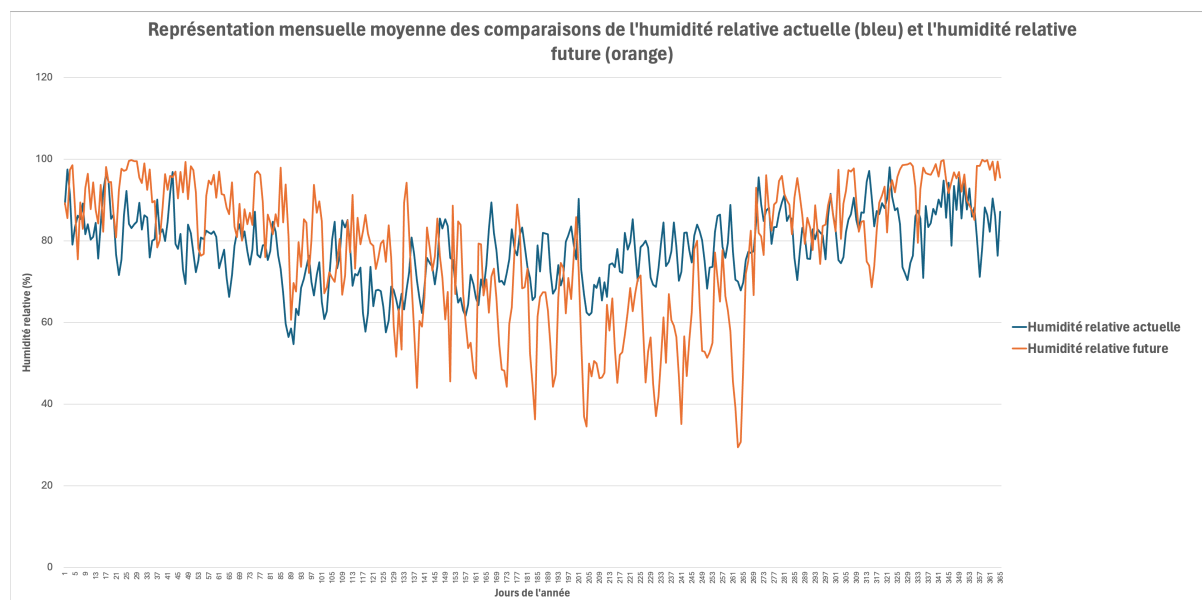


Figure 16: Graphique illustrant la comparaison des données d'humidité actuelles et celles prédites pour une année typique entre 2040 et 2060





## F. Collecte de données et analyse

Pour chaque simulation, les données relatives à la demande énergétique en chauffage et en refroidissement seront présentées pour chaque pièce de vie du bâtiment. Les données relatives au temps de surchauffe et à l'indice de chaleur seront également présentées afin de pouvoir identifier la résilience thermique du bâtiment.

## G. Présentation du bâtiment de référence

### 1. Plans et zonage

Les plans de coupes suivants possèdent une échelle de 1/50.

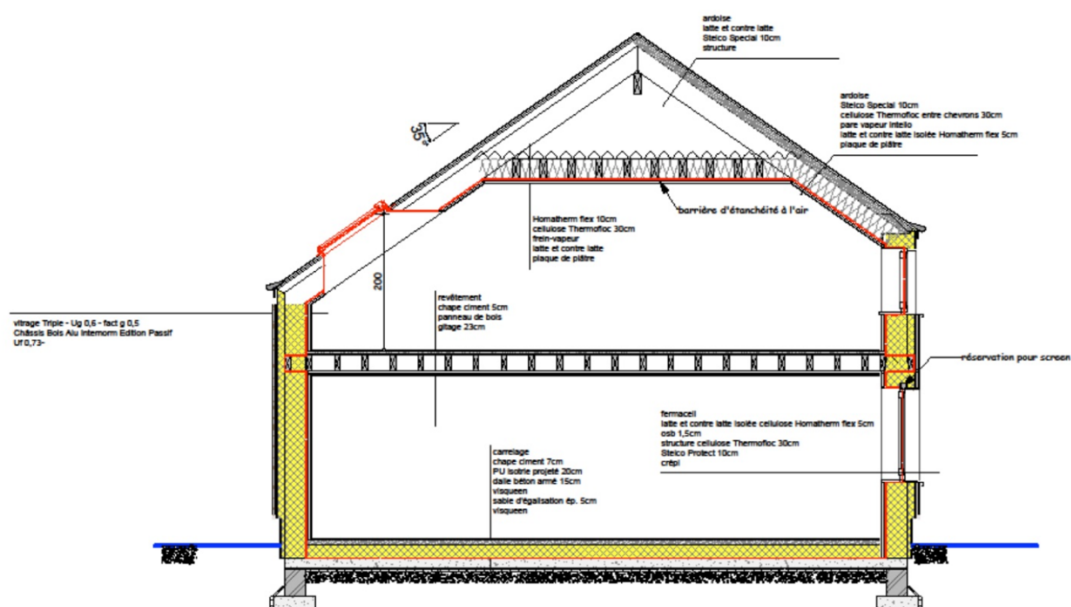


Figure 18: Plan de coupe 1 du bâtiment de référence



Figure 19: Plan du bâtiment référence - exposition Nord

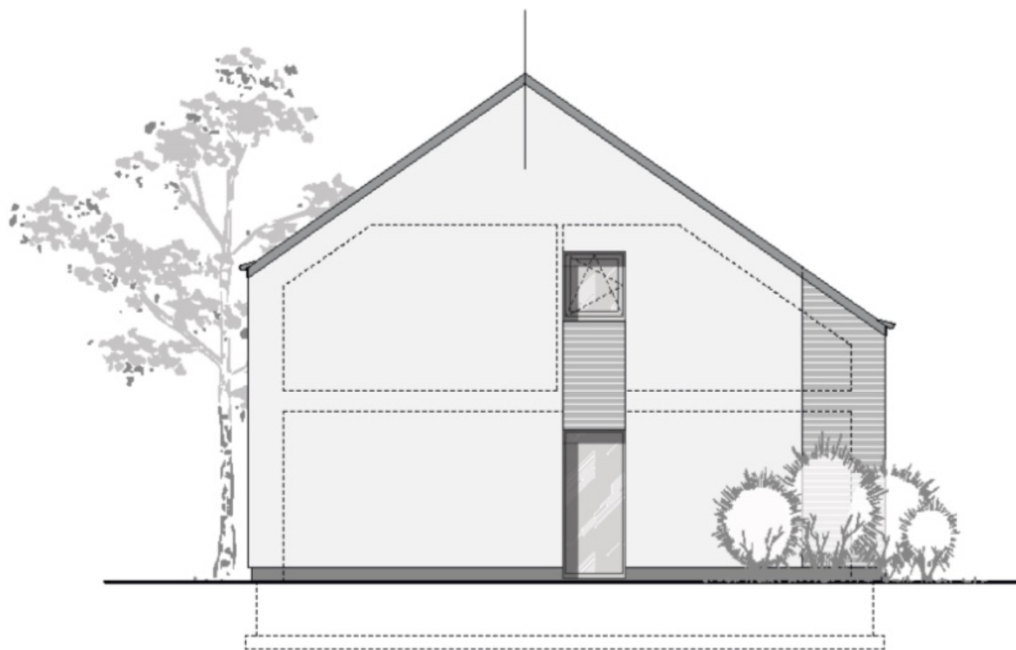


Figure 20: Plan de coupe 2 du bâtiment de référence



Figure 21: Plan du bâtiment de référence - exposition Sud

Le zonage du bâtiment est effectué comme le démontrent respectivement les figures 22 et 23 :

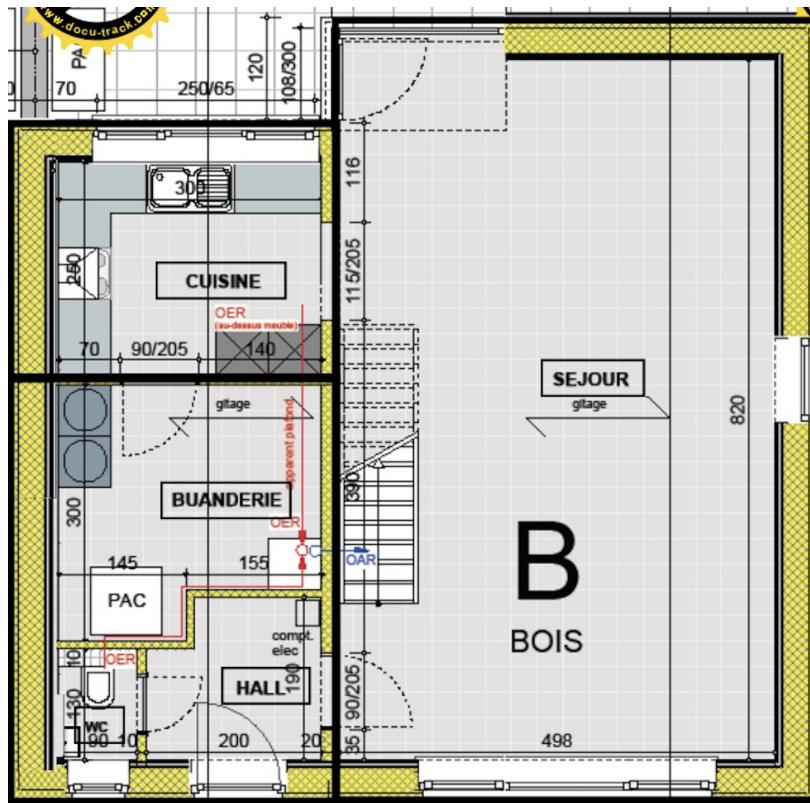


Figure 22: Zonage du rez-de-chaussée du bâtiment de référence

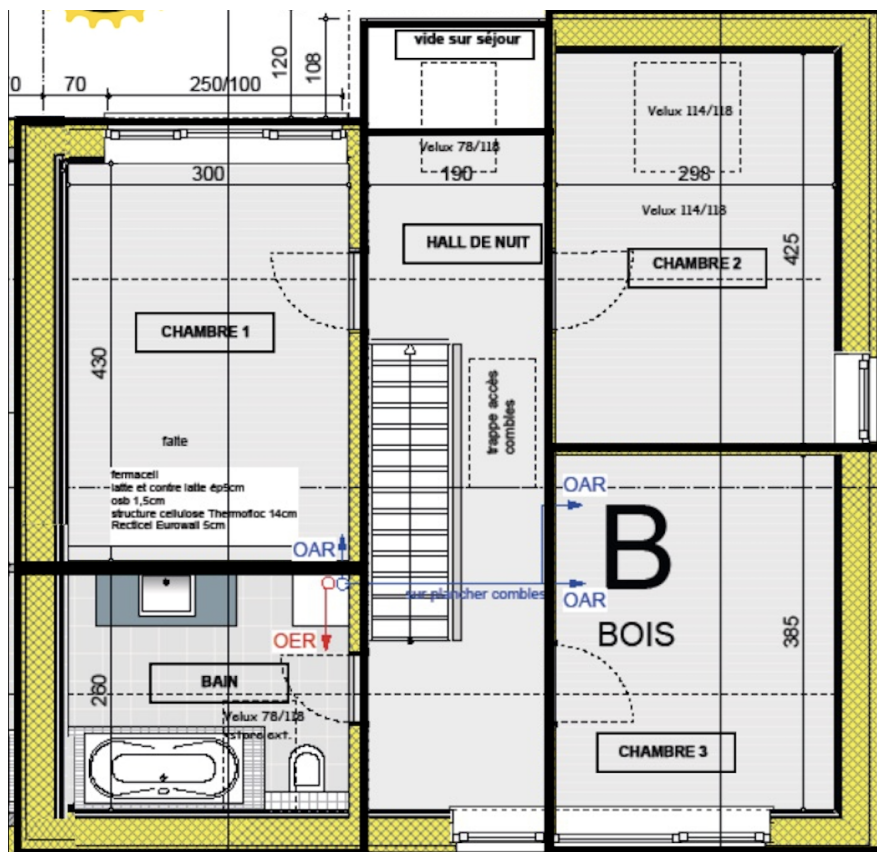


Figure 23: Zonage de l'étage du bâtiment de référence

La maison est composée de 10 zones dont 6 sont des pièces de vie chauffées/refroidies :

- Zone 1 : Buanderie\_Hall\_Wc
- Zone 2 : Cuisine
- Zone 3 : Séjour
- Zone 4 : Salle de bains
- Zone 5 : Chambre 1
- Zone 6 : Chambre 2
- Zone 7 : Chambre 3
- Zone 8 : Hall\_Nuit
- Zone 9 : Vide\_sur\_séjour
- Zone 10 : Grenier

La zone 9, appelée "Vide sur séjour", est caractérisée par la présence de "surfaces virtuelles". Cette zone est entièrement ouverte, reliant directement le séjour situé en dessous et le hall de nuit situé au-dessus. De plus, ses parois extérieures sont entièrement vitrées. (cf. annexe 2)

## 1. Systèmes

**Chauffage** : Le modèle de référence possède un système de chauffage de 3 kW avec un rendement de 10%.

**Ventilation** : Le modèle de référence possède une ventilation double flux.

**Eau chaude sanitaire** : Pas considéré dans cette étude.

**Système photovoltaïque** : Sur plans, le modèle de référence possède une installation photovoltaïque sur la pente de toiture exposée au sud (façade entrée). Cependant, dans le cadre de cette étude, l'installation photovoltaïque n'est pas considérée.

## 2. Modélisation Sketchup

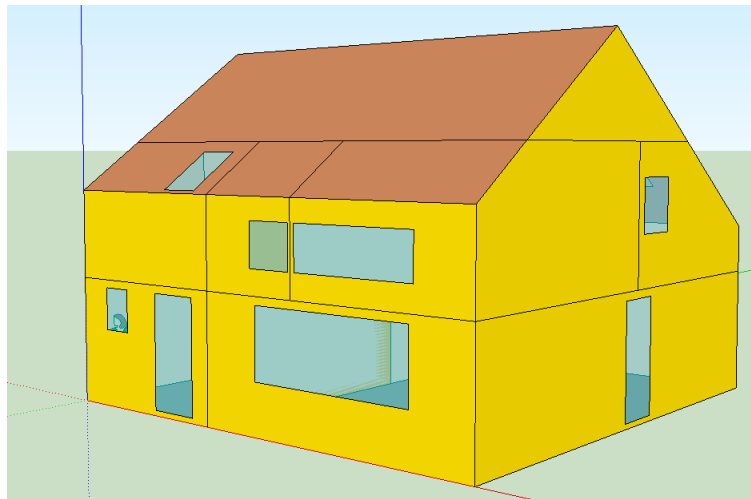


Figure 24: Modélisation Sketchup des façades sud et Est du modèle de référence

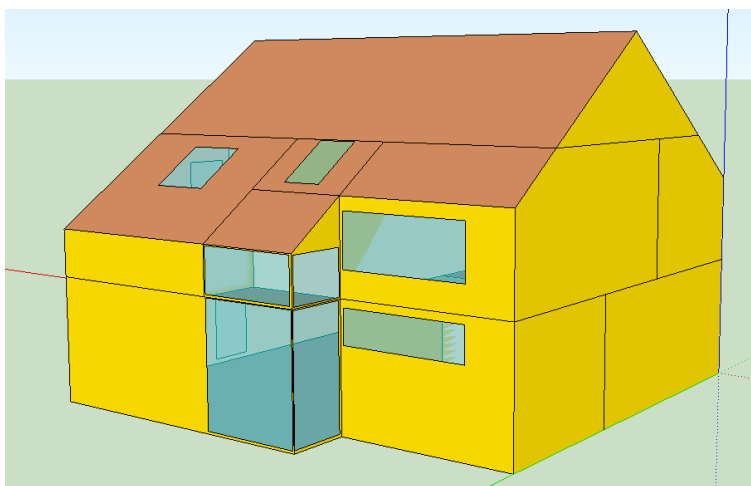


Figure 25: Modélisation Sketchup des façades nord et ouest du modèle de référence

## 3. Encodage TRNBuild

À la suite de la modélisation 3D Sketchup, le modèle a été intégré dans le logiciel TRNBuild afin d'y encoder les différents paramètres spécifiques du bâtiment de référence.

### a. Les parois

Les parois du bâtiment sont constituées de plusieurs "layers" définis dans le logiciel. Chaque layer doit être référencé en termes de conductivité, de capacité et de densité. Les layers représentent les différentes compositions des parois du bâtiment. Ces compositions peuvent inclure des isolants, des pare-vapeur et des "Massless Layer", qui correspondent à des couches sans masse, ainsi que des éléments structuraux tels que la charpente ou les dalles en béton. Le modèle de référence intègre des couches d'air peu ventilé et fortement ventilé. De plus, il inclut une structure en ossature bois ainsi que des matériaux d'isolation naturels tels que l'ISOFLOC ou le Steicoprotect. (cf. Annexe 1: Tableau des compositions de parois)

Conformément aux documentations relatives au modèle de référence, celui-ci comporte également quatre « parois composées ». Ces parois sont en fait des parois préassemblées constituées de plusieurs matériaux, tels que définis dans la fiche de projet (cf. Annexe 8). Ces compositions peuvent comprendre, par exemple, 15% de bois de charpente en feuillus durs et résineux, et 85% d'ISOFLOC. (cf. Annexe 2 : Tableau des compositions des parois composées)

L'intégration des données de composition des parois dans le logiciel TRNBuild consiste à former les murs, planchers et plafonds du bâtiment. Le tableau ci-dessous (cf. Tableau 1) offre une visualisation simplifiée de cet encodage. Seuls trois principaux composants structurels y sont représentés, le tableau complet étant disponible en annexe. (cf. Annexe 3 : Représentation des murs, planchers et plafonds encodés dans TRNBuild).

*Tableau 1 : Représentation des murs, planchers et plafonds encodés dans TRNBuild*

Walls, floors, ceilings, roofs			
Nom	Composition [inside/back]	Épaisseur [m]	U-value [W/m <sup>2</sup> K ]
EXT_WallEnduit	PlaqueDePlatre AirNonVentile 2ParoiComposée PanneauOSB 1ParoiComposée SteicoProtect Mortier	0,474	0,106
EXT_Roof	PlaqueDePlatre AirNonVentile Homatherm PareVapeur 4ParoiComposée SteicoProtect AirFortementVentile Ardoise	0,286	0,149
EXT_Floor	AirFortementVentile BetonLourdArme IsotrieGroep	0,402	0,244



	BoisDeCharpente PanneauOSB		
--	-------------------------------	--	--

### b. Les surfaces vitrées

Le bâtiment de référence est composé de 15 surfaces vitrées réparties sur toutes les expositions du bâtiment. Les fenêtres sont équipées de double vitrage avec un g-value d'environ 0,5. Le g-value, également appelé le facteur de transmission solaire, indique la quantité de lumière incidente traversant la surface vitrée. Plus le g-value se rapproche de 1, plus cela signifie que la fenêtre laisse passer une grande quantité de lumière solaire, ce qui pourrait entraîner un phénomène de surchauffe. (Roulet, 2009) (cf. annexe 4 : Tableau des surfaces vitrées)

### c. Horaires d'occupation

Les figures ci-dessous (cf. Figures 26, 27, 28, 29, 30, 31) illustrent les temps d'occupation des différentes zones du bâtiment. Sur ces graphiques, une valeur de 1 indique la présence dans la zone correspondante, tandis qu'une valeur de 0 indique l'absence de présence à cette heure précise de la journée. Une distinction a été faite entre les zones de séjour et de cuisine pour les jours de semaine et les week-ends, en raison des schémas d'occupation différents observés selon les jours de la semaine.

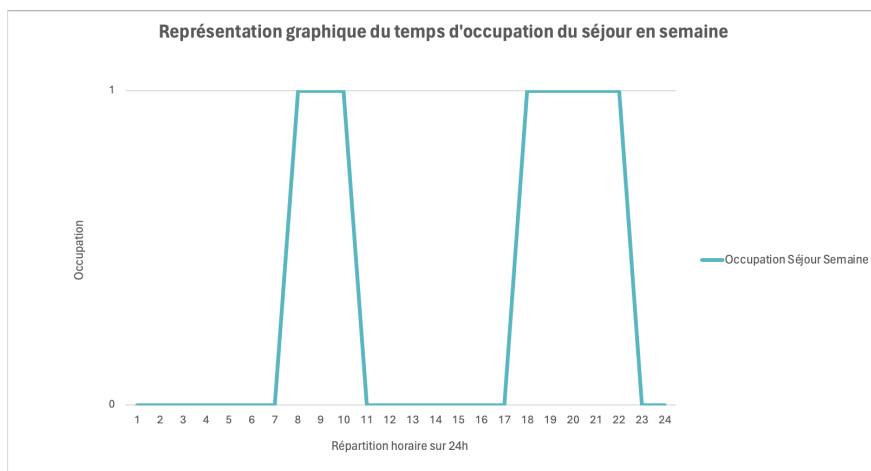


Figure 26: Représentation graphique du temps d'occupation du séjour en semaine

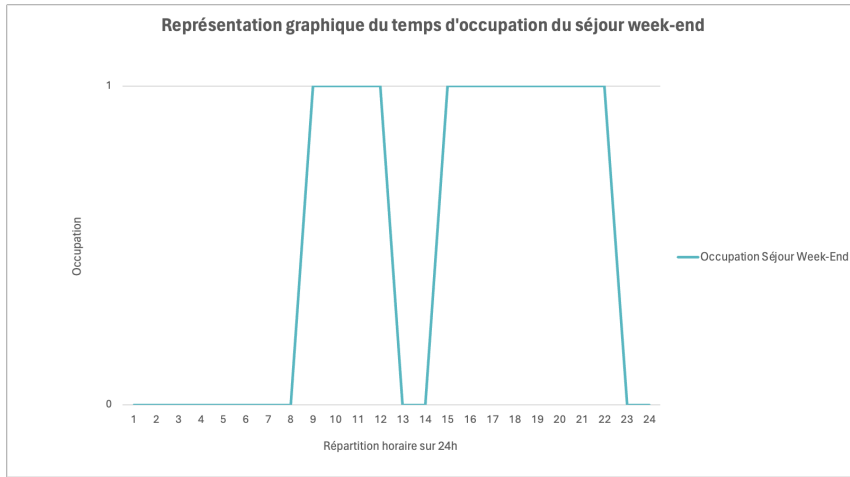


Figure 27: Représentation graphique du temps d'occupation du séjour le week-end

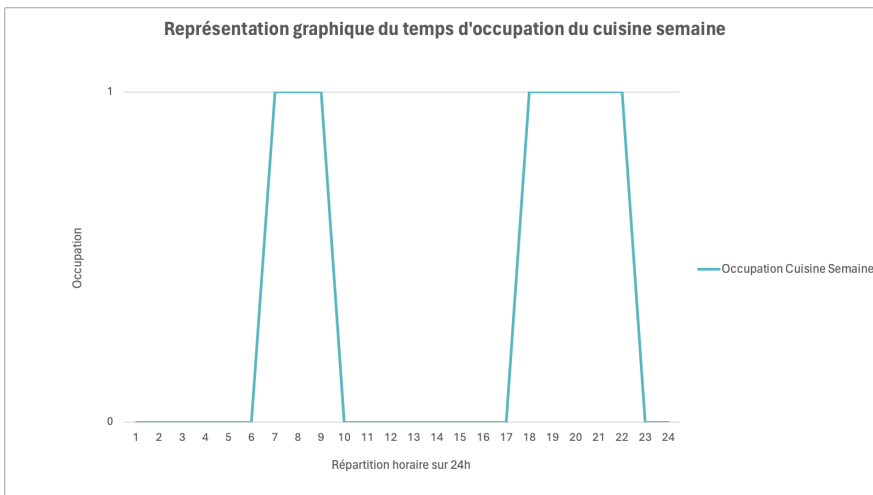


Figure 28 : Représentation graphique du temps d'occupation de la cuisine en semaine

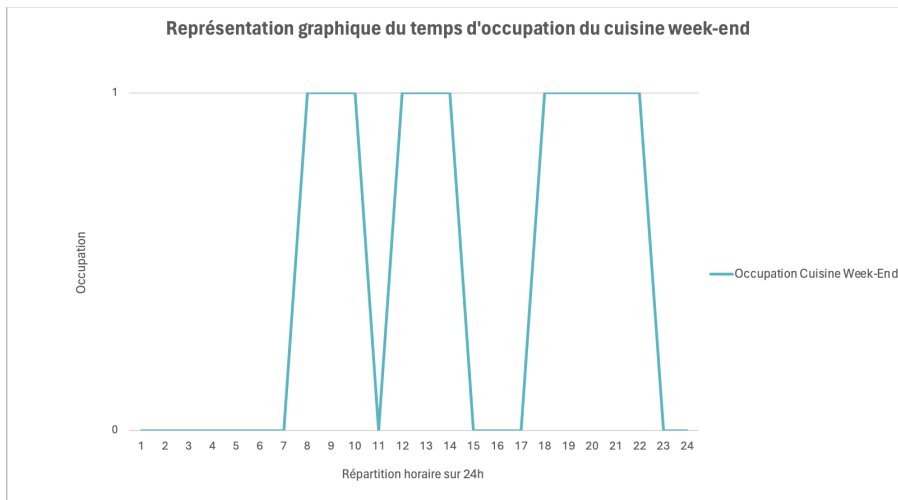


Figure 29: Représentation graphique du temps d'occupation de la cuisine le week-end

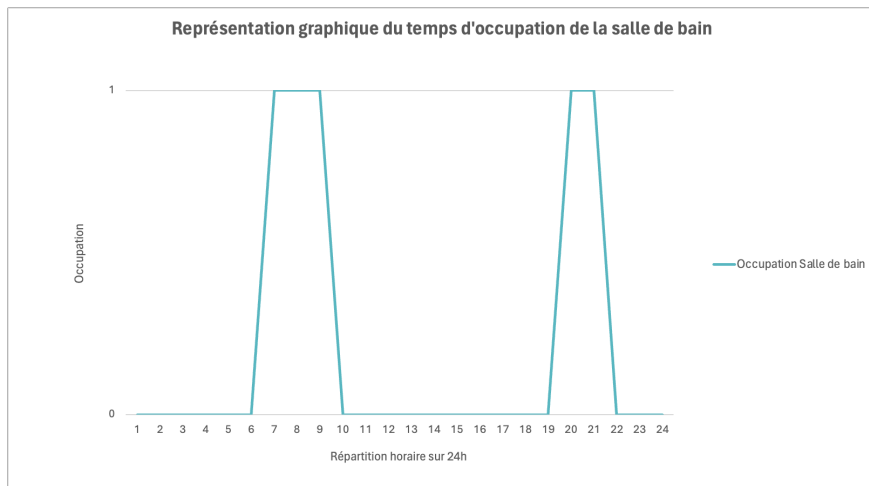


Figure 30: Représentation graphique du temps d'occupation de la salle de bain

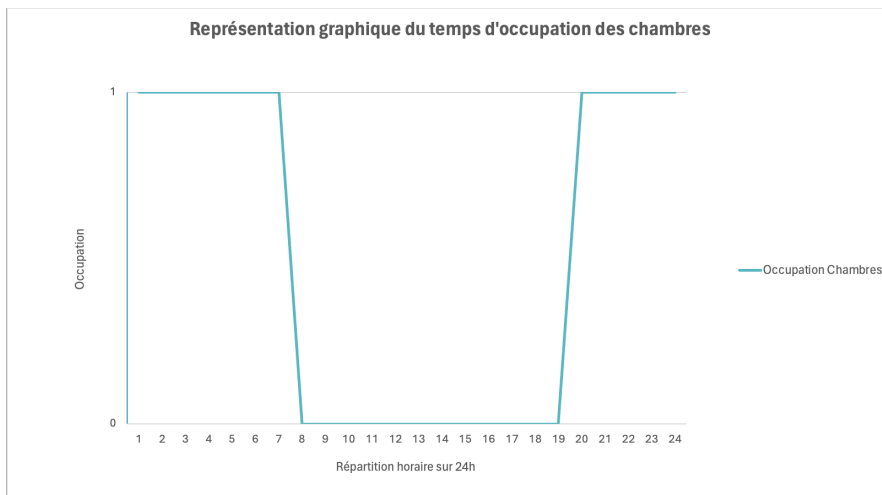


Figure 31: Représentation graphique du temps d'occupation des chambres

#### d. Ventilation

Hypothétiquement, dans le modèle de référence, la ventilation est uniforme pour chaque zone du bâtiment, avec un débit spécifique de  $3,6 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  pour chaque zone.

#### e. Chauffage

Tableau 2: Les consignes de chauffage par zone

Zones	Consigne de température [lorsque présence]
Séjour	20°C
Cuisine	
Salle de bains	22°C
Chambres 1, 2 & 3	19°C

#### f. Refroidissement

Non présent dans le modèle de référence.

#### g. Les gains internes

Il est essentiel de prendre en compte les gains internes lors de l'étude thermique d'un bâtiment, car ces derniers peuvent avoir un impact significatif sur les conditions thermiques à l'intérieur de celui-ci. En fonction de l'utilisation des zones du bâtiment, les gains de chaleur dus à la présence humaine, aux équipements électriques et les gains d'humidité ont été pris en considération. (cf. Annexe 5 : Tableau des gains internes).

### 4. Évaluation du niveau d'intelligence du bâtiment de référence

Afin d'évaluer le niveau d'intelligence du bâtiment de référence, l'outil *Smart Readiness Indicator* a été utilisé. Dans ce calcul, plusieurs hypothèses ont été prises en compte pour l'encodage : le bâtiment est équipé de systèmes de régulation d'émission (chauffage, ventilation), de stockage thermique et de régulation de la température. Cependant, il ne dispose pas de système de refroidissement, de remontée d'informations techniques, de possibilité de flexibilité avec le réseau, ni de commandes intégrées en fonction de la présence ou de la demande instantanée.

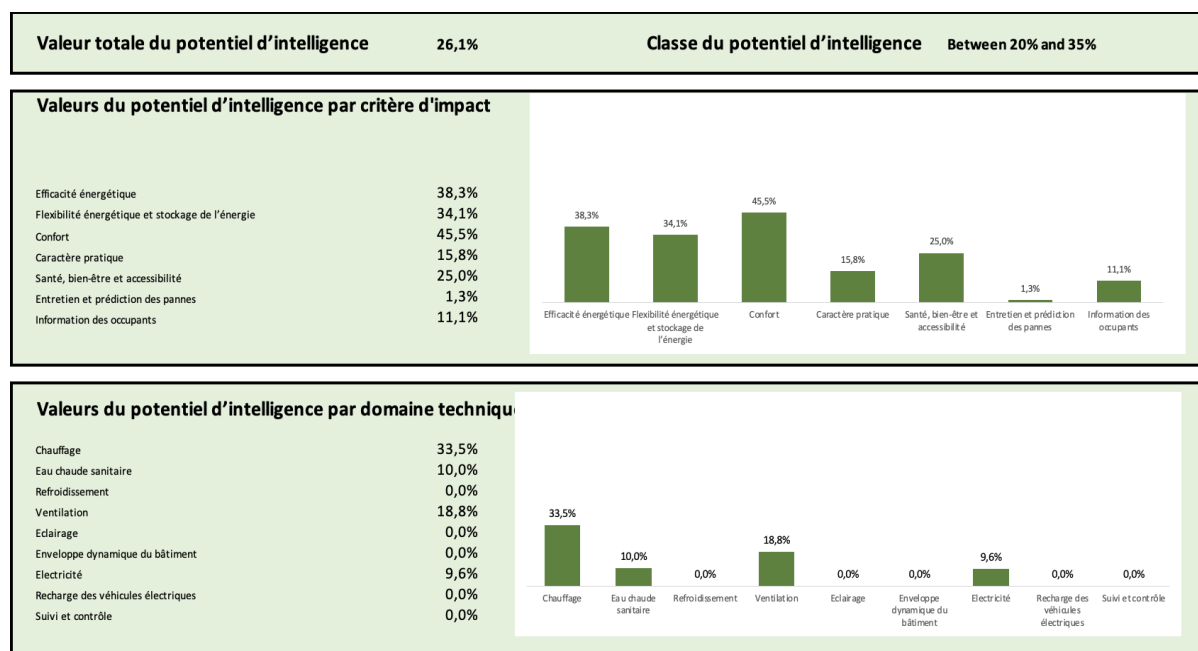


Figure 32: Niveau d'intelligence du bâtiment de référence

Selon l'outil d'évaluation SRI, le potentiel d'intelligence du bâtiment de référence est de **26,1%**. Ce résultat (cf. Figure32) démontre que le modèle de référence possède un faible niveau d'intelligence qui peut, tout de même, être considéré comme de l'intelligence passive. L'intelligence de ce bâtiment réside surtout dans son efficacité énergétique relative au chauffage, ECS et à la ventilation.

## IX. Exposition des paramètres des simulations

---

### 1. Modèle de référence simulation actuelle (MRSA) – Modèle de référence simulation future (MRSF)

La première simulation **MRSA** a pour objectif d'évaluer la performance de la résilience thermique du bâtiment de référence et de déterminer ses consommations énergétiques. Toutes les caractéristiques relatives au modèle de référence ont été développées dans la section précédente VII,G.

La simulation **MRSF** est effectuée afin d'évaluer le bâtiment de référence dans des conditions météorologiques futures. Les caractéristiques techniques et structurelles restent identiques à celles présentées précédemment pour le modèle de référence.

### 2. Intelligence passive simulation actuelle (IPSA) – Intelligence passive simulation future (IPSF)

Tel que décrit précédemment, le modèle de référence possède un faible niveau d'intelligence qui peut correspondre à de l'intelligence passive. La simulation **IPSA** a pour objectif principal d'augmenter cette intelligence passive.

Pour ce faire, voici les modifications qui ont été apportées dans cette première simulation :

- **Orientation du bâtiment** : à l'origine, le bâtiment de référence possède une orientation nord-est pour la façade jardin. Dans cette première simulation, l'orientation a été modifiée pour être nord-ouest. L'objectif de ce changement est d'exposer la façade la moins vitrée au sud. Théoriquement, cela devrait réduire la surchauffe, car la façade la moins vitrée serait ainsi exposée au rayonnement solaire le plus intense. L'objectif est de vérifier si cette modification, théoriquement valable, est efficace dans des conditions réelles.
- **Surface des vitrages** :
  - Réduction de 50% de la surface des vitrages pour les zones de Séjour et de Vide Sur Séjour
  - Réduction de 20% de surface des vitrages pour la zone Chambre 2.
- **Ombfrage** : des casquettes de 15cm de hauteur et 50cm de dépassement ont été rajoutés pour tous les vitrages du bâtiment, excepté les fenêtres de toit.

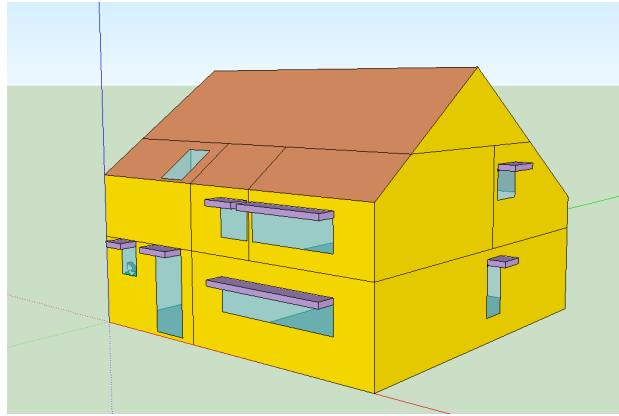


Figure 33: Modélisation Sketchup des façades sud et est du premier niveau d'intelligence

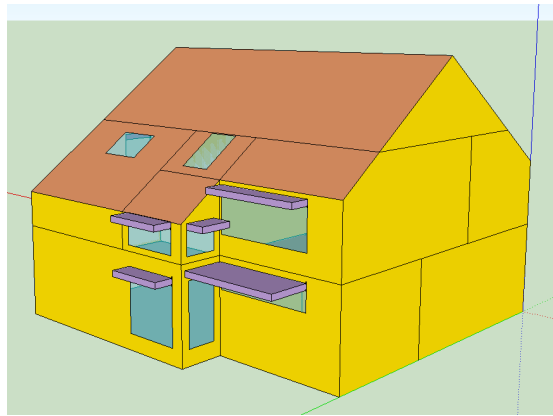


Figure 34: Modélisation Sketchup des façades nord et ouest du premier niveau d'intelligence

La simulation IPSF simule ce deuxième niveau d'intelligence avec les mêmes modifications, mais dans des conditions météorologiques futures, incluant notamment une augmentation de la température moyenne annuelle.

### 3. Intelligence active simulation actuelle (IASA) – Intelligence active simulation future (IASF)

Dans ce deuxième niveau d'intelligence, aucun changement physique n'est apporté par rapport au bâtiment de référence : celui-ci possède les mêmes propriétés d'orientations et techniques que le bâtiment de référence. L'objectif de la simulation **IASA** est d'atteindre un second niveau d'intelligence qui peut être caractérisé comme de l'intelligence « active ». Voici les paramètres intégrés et/ou modifiés afin d'atteindre ce niveau d'intelligence :

- **Chauffage :**
  - Régulation par zones : le chauffage peut répondre de manière active à toutes les demandes en chauffage, donc les zones possèdent des températures de consigne différentes. De plus, la température de consigne de base, c'est-à-dire même lorsqu'il n'y a pas de présence, est de 16°C.

- Régulation de nuit : la température de consigne de nuit se met automatiquement en route à partir de 22h et s'arrête à 5h du matin.

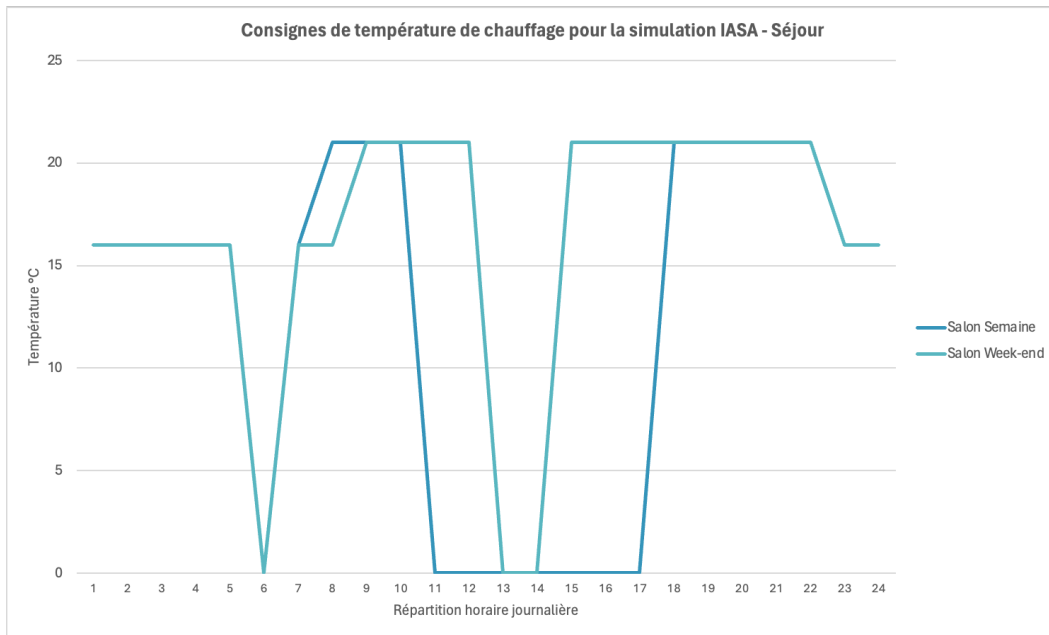


Figure 35: Consignes de température de chauffage pour la simulation IASA-IASF - séjour

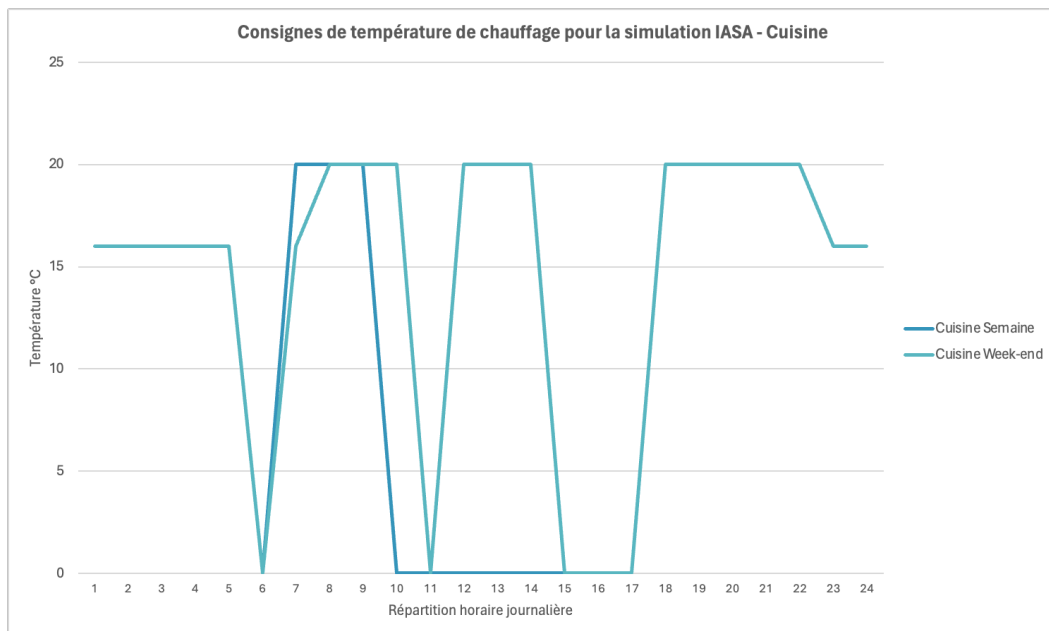


Figure 36 : Consignes de température de chauffage pour la simulation IASA-IASF - cuisine

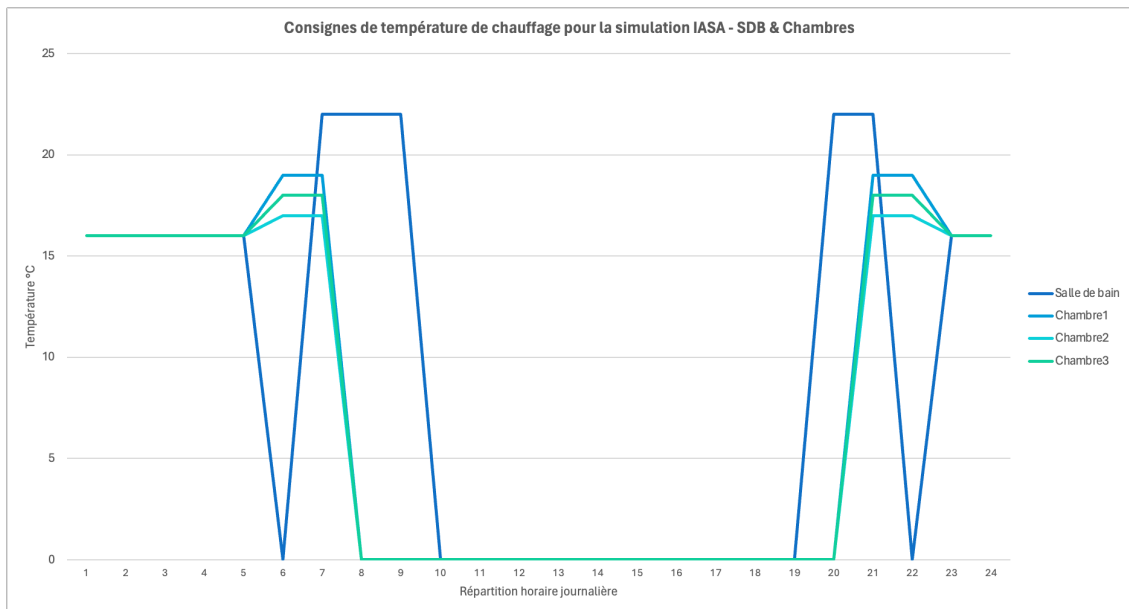


Figure 37: Consignes de température de chauffage pour la simulation IASA-IASF - SDB & chambres

- **Refroidissement** : le système de refroidissement se met en place automatiquement lorsque la température interne de la zone dépasse 25°C et lorsqu'il y a de la présence dans la zone.
- **Ventilation** : le système de ventilation est équipé de capteurs CO<sub>2</sub> permettant de réguler la demande en débit :
  - Chambre 2&3 : 25m<sup>3</sup>/h
  - Chambre 1 : 50 m<sup>3</sup>/h
  - Séjour : 200 m<sup>3</sup>/h
  - Cuisine : 200 m<sup>3</sup>/h
  - Salle de bain : 40 m<sup>3</sup>/h
- **Ombre** : des protections solaires internes se mettent automatiquement en route en fonction de l'orientation des surfaces vitrées lors de la période estivale (c.-à-d. lorsque la température extérieure >16°C). La protection solaire interne possède un coefficient d'ombrage de 0,6, celle-ci est référencée dans les données des produits PEB (EPBD data) : *Lecluyse T092\_0952 A2 Technic 2107\_I*
  - Orientation Nord : protections solaires descendent de 6h à 9h lorsque t° extérieure >16°C
  - Orientation Est : protections solaires descendent de 9h à 12h lorsque t° extérieure >16°C
  - Orientation Sud : protections solaires descendent de 12h à 16h lorsque t° extérieure >16°C.



#### 4. Intelligence interactive simulation actuelle (IISA) – Intelligence interactive simulation future (IISF)

Cette troisième simulation a pour objectif d'intégrer le plus grand niveau d'intelligence dans le bâtiment ; l'intelligence interactive. Cela signifie donc que le bâtiment est capable de prendre en compte instantanément les données des paramètres extérieurs et intérieurs tels que la température extérieure, des capteurs de présence ou encore d'humidité. Voici les paramètres du bâtiment qui ont été modifiés pour cette troisième simulation :

- **Chauffage :**
  - Régulation par zones et par besoin spécifique.
  - Programmation anticipée de l'augmentation de la consigne de température: à 1°C supplémentaire que la température de confort afin que la pièce soit confortable dès l'arrivée de l'occupant.
  - Température de consigne de nuit, 16°C est mis automatiquement entre 22h et 5h.

Les programmations anticipées de l'augmentation de la consigne de température du système de chauffage sont représentées par des pics de température dans les graphiques ci-dessous (cf. Figures 38,39,40). Ces pics sont entourés dans le premier graphique (cf. Figure 39) pour une meilleure visualisation.

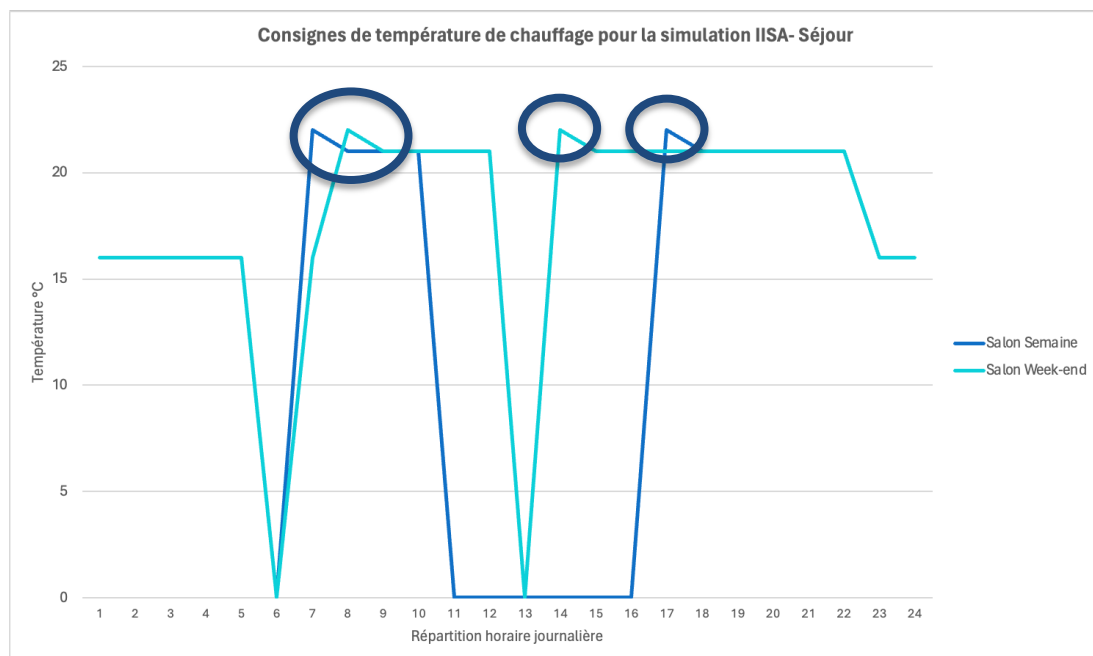


Figure 38: Consignes de température de chauffage pour la simulation IISA-IISF - séjour

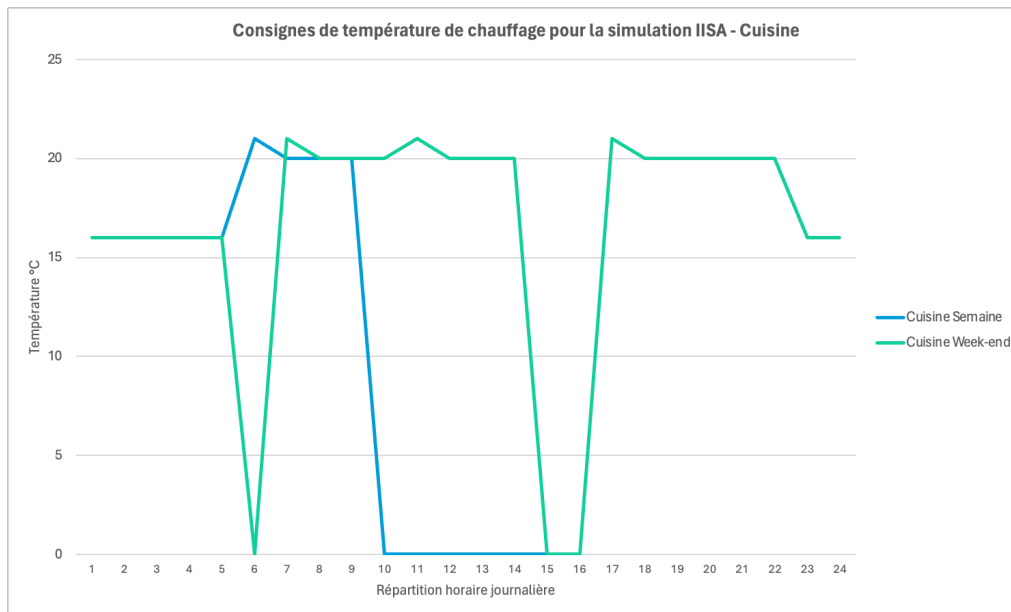


Figure 39: Consignes de température de chauffage pour la simulation IISA-IISF - cuisine

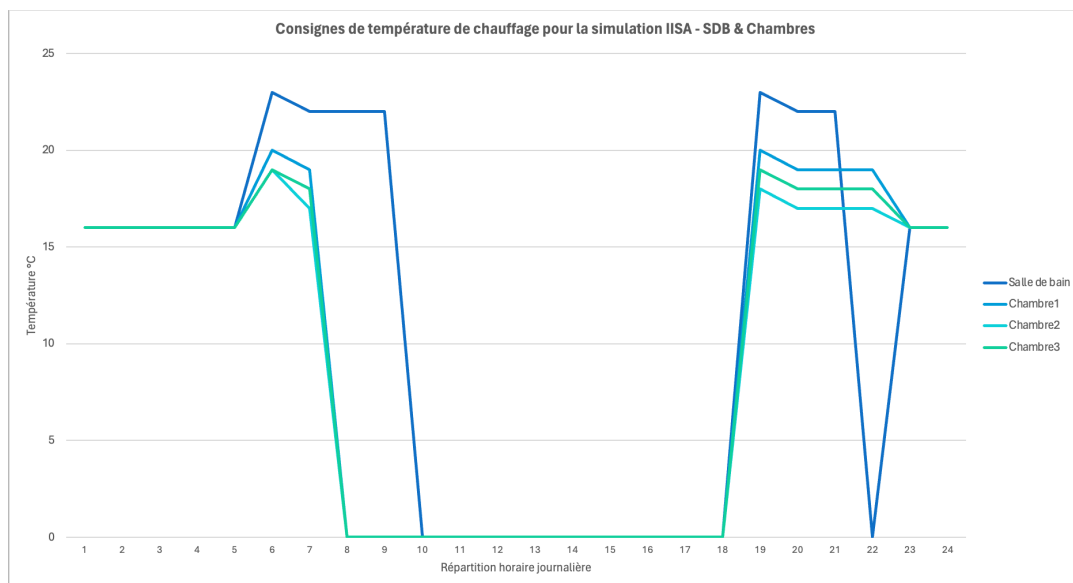


Figure 40: Consignes de température de chauffage pour la simulation IISA-IISF - SDB & chambres

- **Refroidissement** : le refroidissement se met en place lorsque la température de la zone est plus grande que 25°C, lorsqu'il y a de la présence et lorsque la température extérieure est plus grande que 27°C.
- **Ventilation** : la ventilation possède des capteurs de CO<sub>2</sub> permettant de se mettre en route lorsqu'il y a de la présence et de fournir une ventilation adaptée à la présence de la zone. Le système de ventilation est également équipé d'un récupérateur de chaleur, permettant une température de 16°C pour l'air soufflé. De plus, les zones humides telles que la cuisine et la salle de bain sont équipées de capteurs d'humidité. Cela signifie que la ventilation se met en route automatiquement lorsque l'humidité de la zone dépasse 50% et lorsqu'il y a de la présence.

Tableau 3: Consigne de ventilation pour les débits de ventilation de la simulation IISA

Zones	Débit de ventilation	Présence
Salon	200m <sup>3</sup> /h	Semaine : 8h-10h/18h-22h Week-end: 9h-12h/15h-22h
Cuisine	Puissance maximale lorsque l'humidité >50%	Semaine : 7h-9h/18h-22h Week-end : 8h-10h/12h-14h/18h-22h
Salle de bain	Puissance maximale lorsque l'humidité >50%	7h-9/20h-21h
Chambre 1	50 m <sup>3</sup> /h	21h-7h
Chambre 2	25 m <sup>3</sup> /h	21h-7h
Chambre 3	25 m <sup>3</sup> /h	21h-7h

- **Ombrage** : toutes les fenêtres sont équipées d'ombiage automatique. Le store extérieur descend directement lorsque la radiation totale est plus grande que 720 kJ/hm<sup>2</sup>, ce qui correspond à 200 Wh/m<sup>2</sup>.

La simulation **IISF** simule également les mêmes caractéristiques définissant le troisième niveau d'intelligence, mais cette fois dans des conditions météorologiques futures. Les mêmes caractéristiques techniques et programmations sont donc appliquées, permettant d'analyser la performance du bâtiment face à des scénarios climatiques prévus pour une année typique entre 2040 et 2060.

## X. Exposition des résultats globaux des simulations

RÉSILIENCE THERMIQUE	PARAMÈTRE ÉTUDIÉ	ZONES	MRSA	IPSA	IASA	IISA	MRSF	IPSF	IASF	IISF	
	Surchauffe	Séjour		7%	5%	19%	17%	23%	13%	39%	40%
		Cuisine		2%	10%	5%	24%	24%	12%	26%	51%
		Vide sur séjour		40%	75%	43%	40%	50%	65%	55%	54%
		Salle de bain		3%	6%	14%	19%	15%	22%	26%	34%
		Chambre1		1%	9%	6%	4%	18%	11%	30%	30%
		Chambre2		4%	8%	21%	18%	24%	21%	49%	47%
		Chambre3		2%	4%	8%	17%	11%	12%	18%	20%
		<b>T° pondérée moyenne annuelle du bâtiment</b>		17°C	18°C	20°C	20°C	19°C	18°C	21°C	21°C
	<b>Pourcentage de surchauffe total</b>		<b>5%</b>	<b>6%</b>	<b>13%</b>	<b>14%</b>	<b>21%</b>	<b>14%</b>	<b>33%</b>	<b>38%</b>	
Moyenne annuelle des Heat Index	Séjour		80	79	79	79	81	80	80	81	
	Cuisine		78	81	78	81	84	81	80	95	
	Vide sur séjour		93	135	92	90	97	114	98	98	
	Salle de bain		80	80	80	81	81	83	82	85	
	Chambre1		78	80	79	79	80	80	80	80	
	Chambre2		80	80	80	80	82	81	82	83	
	Chambre3		79	80	79	79	80	80	79	79	
	<b>Moyenne annuelle du bâtiment</b>		<b>81</b>	<b>88</b>	<b>81</b>	<b>81</b>	<b>83</b>	<b>85</b>	<b>83</b>	<b>86</b>	

CONSUMMATION ÉNERGÉTIQUE	PARAMÈTRE ÉTUDIÉ	ZONES	MRSA		IPSA		IASA		IISA		MRSF		IPSF		IASF		IISF	
			kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh/m <sup>2</sup>	kWh
	Demande annuelle en chauffage	Séjour		89	4742	85	4444	77	4065	65	3447	81	4254	76	3987	72	3775	61
Cuisine			90	966	74	873	197	2026	46	473	79	809	75	769	168	1724	39	395
Vide sur séjour			72	152	25	48	1057	2113	1092	2184	73	45	24	49	1015	2030	1044	2088
Salle de bain			68	779	64	639	88	939	76	810	64	681	52	548	81	865	73	773
Chambre1			138	2473	109	1873	75	1288	67	1159	120	2060	100	1727	61	1058	56	973
Chambre2			122	1967	101	1699	45	711	39	621	102	1620	90	1423	35	556	30	470
Chambre3			129	2440	113	1989	52	942	49	881	120	2172	97	1768	49	887	45	825
<b>Total</b>			<b>90</b>	<b>13520</b>	<b>78</b>	<b>11664</b>	<b>81</b>	<b>12084</b>	<b>64</b>	<b>9575</b>	<b>78</b>	<b>11641</b>	<b>69</b>	<b>10271</b>	<b>73</b>	<b>10895</b>	<b>58</b>	<b>8724</b>
Demande annuelle en refroidissement	Séjour		/	/	/	/	3,33	175	0,399	27	/	/	/	/	10	504	1	40
	Cuisine		/	/	/	/	0,860	9	0,309	3	/	/	/	/	7	73	1	12
	Vide sur séjour		/	/	/	/	10,23	21	6,31	13	/	/	/	/	31	62	5	10
	Salle de bain		/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	Chambre1		/	/	/	/	0,097	2	0,003	0,1	/	/	/	/	4	70	0,1	1
	Chambre2		/	/	/	/	0,892	15	0,091	2	/	/	/	/	8	127	0,2	3
	Chambre3		/	/	/	/	0,279	3	0,032	1	/	/	/	/	1	19	0,0	1
	<b>Total</b>		<b>/</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>2</b>	<b>225</b>	<b>0,3</b>	<b>46</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>6</b>	<b>855</b>	<b>1</b>	<b>67</b>

## XI. Analyse et interprétation des résultats

### A. Première interprétation

La section précédente avait pour objectif de présenter les résultats globaux des différentes simulations réalisées. Dans cette section, le tableau récapitulatif ci-dessous (cf. Tableau4) permet de réaliser l'analyse et une première interprétation de ces résultats.

Tableau 4: Tableau comparatif de tous les résultats des simulations

Simulation	Pourcentage annuel moyen de surchauffe	Moyenne annuelle des Heat Index	Demande annuelle de chauffage (kWh)	Demande annuelle en refroidissement (kWh)
MRSA	5%	81	13 520	/
IPSA	6%	88	11 664	/
IASA	13%	81	12 084	225
IISA	14%	81	9 575	46
MRSF	21%	83	11 641	/
IPSF	14%	85	10 271	/
IASF	33%	83	10 895	855
IISF	38%	86	8 724	67

Le tableau récapitulatif ci-dessus (cf. Tableau4) révèle une diminution générale de la demande en chauffage. Cette diminution générale peut s'expliquer dans le contexte de l'utilisation des données météorologiques futures utilisées dans le cadre des simulations MRSF, IPSF, IASF et IISF. Tel que développé dans la section VIII,E, les données météorologiques d'une année typique dans la période 2040-2060 démontrent une hausse de la température durant la période estivale, faisant augmenter de près de deux degrés la température moyenne annuelle par rapport à celle d'aujourd'hui.

Concernant l'aspect de la résilience thermique des simulations, ce tableau récapitulatif met en évidence une augmentation moyenne des pourcentages de surchauffe et des Heat Index annuels. Cependant, une question persiste toujours concernant le pourcentage annuel de surchauffe. L'augmentation de ce paramètre dans les simulations sans système de refroidissement (MRSF, IPSF) peut s'expliquer par une hausse trop importante de la température moyenne extérieure, rendant les systèmes passifs mis en place dans ce contexte-ci, insuffisants pour atténuer ce phénomène. Concernant les simulations possédant un système de refroidissement (IASA, IISA, IASF, IISF), un premier raisonnement émerge. En effet, le système de refroidissement actuellement simulé peut s'avérer insuffisant face aux températures plus élevées auxquelles il devrait faire face dans le futur. De plus, ces systèmes sont programmés pour se mettre en fonctionnement en présence d'occupants et possèdent

une programmation anticipée de l'augmentation de la température de consigne du système de refroidissement. Par conséquent, avec l'augmentation importante des températures, ces systèmes ne parviennent pas à réduire rapidement la température à un niveau confortable, ce qui entraîne une surchauffe persistante pendant plusieurs heures. De plus, les simulations intègrent des dispositifs d'ombrage solaire qui, dans certains cas, peuvent aggraver le problème en emprisonnant la chaleur.

Dans le même raisonnement que le paragraphe précédent, l'augmentation de la température moyenne annuelle permet d'évoquer une première explication quant à l'augmentation générale de la demande en refroidissement. Effectivement, des températures plus élevées sur une période plus longue peuvent engendrer des besoins en refroidissement plus importants.

## B. Analyse des différentes simulations

### 1. MRSA

Tableau 5: Résultats simulation MRSA

Simulation	Pourcentage annuel moyen de surchauffe	Moyenne annuelle des Heat Index	Demande annuelle de chauffage (kWh)	Demande annuelle de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> )	Demande annuelle en refroidissement (kWh)
MRSA	5%	81	13 520	90	/

Cette première simulation permet de présenter les paramètres du bâtiment de référence. Effectivement, le bâtiment possède un pourcentage annuel de surchauffe de **5%**, respectant la norme passive. Cette première simulation met directement en évidence la problématique de la zone « vide sur séjour ». Effectivement, cette zone de 2m<sup>2</sup>, composée essentiellement de surfaces vitrées, possède un pourcentage annuel de surchauffe de **40%**. Malgré ce pourcentage de surchauffe important dans cette zone, celle-ci ne représente que 1% du volume total du bâtiment. Par conséquent, cette zone, bien qu'en lien avec la zone de séjour et de hall de nuit, n'augmente pas significativement la moyenne annuelle de pourcentage de surchauffe du bâtiment.

Le Heat Index moyen est évalué à **81**, ce qui le situe dans le début de la catégorie « prudence », pouvant engendrer des maux de tête à cause de la chaleur. La demande en chauffage est estimée à **13 520 kWh**, ce qui semble cohérent pour une maison avec une classe énergétique d'un niveau supérieur, répondant aux ambitions européennes en termes d'efficacité énergétique. La demande spécifique de chauffage annuel est évaluée à **90 kWh/m<sup>2</sup>**, ce qui positionne le bâtiment dans la classe énergétique B selon le Passeport Énergétique du Bâtiment (PEB). (cf. Annexe 6)

Cette première simulation permet d'émettre une première conclusion ; avec les conditions météorologiques actuelles, le bâtiment de référence possède une résilience thermique

satisfaisante. Effectivement, possédant un pourcentage de surchauffe annuel et un Heat Index moyen relativement bas, ce bâtiment est en mesure de garantir le confort thermique et des conditions saines à ses occupants durant la majorité de l'année, peu importe les conditions extérieures.

## 2. IPSA

Tableau 6: Résultats simulation IPSA

Simulation	Pourcentage annuel moyen de surchauffe	Moyenne annuelle des Heat Index	Demande annuelle de chauffage (kWh)	Demande annuelle de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> )	Demande annuelle en refroidissement (kWh)
IPSA	6%	88	11 664	78	/

La simulation IPSA a intégré des modifications ayant pour objectif d'augmenter l'intelligence passive dans le bâtiment. Effectivement, dans cette simulation, l'orientation du bâtiment a été modifiée, la surface des vitrages a été réduite et des casquettes au-dessus des fenêtres ont été mises en place.

Les ajustements visant à accroître l'intelligence passive du bâtiment ont entraîné une légère augmentation de **1%** du pourcentage annuel moyen de surchauffe. Malheureusement, malgré les développements exposés dans la section IX,2, le changement d'orientation prévu pour exposer la façade la moins vitrée au sud n'a pas produit les résultats escomptés en ce qui concerne la surchauffe. Ce changement peut également expliquer l'augmentation du Heat Index moyen, qui élève la température dans certaines zones, faisant grimper le Heat Index jusqu'à **88**.

Cependant, cette simulation révèle une réduction significative de **1 856 kWh** de la demande de chauffage par rapport au bâtiment de référence. Cette baisse pourrait s'expliquer par l'exposition accrue des zones du bâtiment au rayonnement solaire, augmentant ainsi les gains solaires thermiques. Cette diminution de la demande totale en chauffage entraîne naturellement une réduction de la demande spécifique du bâtiment, le plaçant dans la classe énergétique A du PEB, avec une demande spécifique de **78 kWh/m<sup>2</sup>**.

## 3. IASA

Tableau 7: Résultats IASA

Simulation	Pourcentage annuel moyen de surchauffe	Moyenne annuelle des Heat Index	Demande annuelle de chauffage (kWh)	Demande annuelle de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> )	Demande annuelle en refroidissement (kWh)
IASA	13%	81	12 084	81	225



La simulation IASA simule le deuxième niveau d'intelligence, considéré comme de l'intelligence active, dans le logiciel de simulation dynamique TRNSYS. Dans ce niveau d'intelligence, les systèmes techniques composant le bâtiment sont capables de prendre en compte l'évolution des paramètres intérieurs du bâtiment. Cela se traduit par l'installation de capteurs de présence, de CO<sub>2</sub> ou encore par l'implémentation des températures de consigne de nuit. Théoriquement, ce bâtiment intelligent possède la capacité de prendre des décisions en autonomie afin de respecter le confort intérieur souhaité par les occupants.

Le pourcentage annuel de surchauffe atteint **17%**, ce qui dépasse largement la norme passive (<5 %). L'augmentation significative de ce phénomène de surchauffe dans le bâtiment est difficile à expliquer, même avec l'installation d'un système de refroidissement. Cependant, cette hausse pourrait indiquer un problème potentiel lié aux consignes de température. Bien que ces consignes soient établies pour assurer le confort thermique, il est possible que les systèmes de programmation anticipée de la consigne de température du système de chauffage et les consignes de température nocturne ne soient pas toujours optimales à certaines périodes de l'année. Malgré cet accroissement du phénomène de surchauffe, le Heat Index moyen reste similaire à celui de la simulation MRSA : **81**.

Par ailleurs, ce deuxième niveau d'intelligence génère une réduction de **1 434 kWh** de demande en chauffage par rapport au bâtiment de référence. Ce résultat peut se justifier par l'application d'une consigne de température nocturne et en l'absence de présence, assurant ainsi une stabilité du confort thermique interne et réduisant la nécessité d'une puissance excessive de chauffage lors du retour des occupants en hiver pour atteindre une température de confort. Cette réduction générale permet au bâtiment d'atteindre une demande spécifique de **81 kWh/m<sup>2</sup>**, se traduisant par la classe énergétique A du PEB. Néanmoins, ce bâtiment demande un besoin de refroidissement annuel de **225 kWh**, s'expliquant par des températures importantes provoquant le phénomène de surchauffe à l'intérieur du bâtiment.

#### 4. IISA

Tableau 8: Résultats simulation IISA

Simulation	Pourcentage annuel moyen de surchauffe	Moyenne annuelle des Heat Index	Demande annuelle de chauffage (kWh)	Demande annuelle de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> )	Demande annuelle en refroidissement (kWh)
IISA	14%	81	9 575	64	46

Cette dernière simulation exploitant les données météorologiques actuelles intègre le niveau d'intelligence le plus élevé, considéré tel que de l'intelligence interactive. Cela signifie que les techniques du bâtiment analysent les paramètres intérieurs et extérieurs, leur permettant de prendre des décisions autonomes pour garantir le confort intérieur souhaité. Le chauffage est réglé en fonction des zones, de la présence, il possède également une consigne de température nocturne et un système de programmation anticipée de l'augmentation de la consigne de température du système de chauffage. Le système de refroidissement s'active en fonction de la présence ainsi que des températures intérieures et extérieures. Le système de

ventilation est équipé de capteur de CO<sub>2</sub>, de capteur d'humidité et de récupérateur de chaleur. Les systèmes d'ombrages sont des systèmes performants se mettant en fonctionnement lorsque le rayonnement est supérieur à 200 Wh/m<sup>2</sup>.

La simulation IISA dévoile le plus grand pourcentage de surchauffe annuel, s'élevant à **14%**. Ce pourcentage de surchauffe annuel élevé peut s'expliquer par les mêmes hypothèses que soumises dans la section précédente (cf. section XI,B,3). De plus, la mise en place d'un récupérateur de chaleur, pourrait également entraîner certains désagréments au niveau du confort thermique des occupants durant une certaine période de l'année. Malgré cette augmentation du phénomène de surchauffe, le Heat Index moyen annuel reste stable et est similaire aux simulations MRSA et IASA, soit **81**, indiquant ainsi que celui-ci subit moins de fortes poussées de température dans les zones de vie.

Cette simulation, qui intègre l'intelligence interactive, entraîne néanmoins une réduction de **3 945 kWh** de la demande en chauffage par rapport au bâtiment de référence. Cette diminution peut s'expliquer par l'efficacité résultant de la récupération de chaleur de la ventilation, ainsi que par l'application d'une consigne de température nocturne, comme expliquée dans la simulation précédente. Cela permet au bâtiment de posséder une demande spécifique en chauffage de **64 kWh/m<sup>2</sup>**, le rapprochant de la classe énergétique A<sup>+</sup> du PEB. Cette simulation engendre également une réduction de **186 kWh** de demande en refroidissement. Cette diminution importante peut résulter de l'installation d'ombrage dynamique efficace, prenant instantanément en considération les paramètres extérieurs.

## 5. MRSF

Tableau 9: Résultats simulation MRSF

Simulation	Pourcentage annuel moyen de surchauffe	Moyenne annuelle des Heat Index	Demande annuelle de chauffage (kWh)	Demande annuelle de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> )	Demande annuelle en refroidissement (kWh)
MRSF	21%	83	11 641	78	/

La simulation MRSF a été effectuée dans le but d'exposer d'éventuels changements des paramètres du bâtiment de référence dans un contexte de changement climatique. Afin d'analyser ces résultats, il est important de garder en mémoire cette augmentation de la température annuelle moyenne et l'allongement de la période estivale estimée pour une année typique pour la période de 2040-2060.

Cette simulation démontre un pourcentage de surchauffe annuel de **21%**, c'est-à-dire quatre fois supérieur au pourcentage de surchauffe du bâtiment de référence dans des conditions météorologiques actuelles. L'augmentation moyenne de la température extérieure augmentant le phénomène de surchauffe dans le bâtiment peut également expliquer l'accroissement du Heat Index moyen. À **83**, celui-ci reste néanmoins dans la catégorie « prudence », avec un impact limité sur les occupants.

Le même raisonnement peut être appliqué à la demande annuelle en chauffage. En effet, celle-ci a diminué de 1 879 kWh par rapport au bâtiment de référence simulé dans des conditions météorologiques actuelles, atteignant ainsi une demande finale annuelle de **11 641 kWh**. Cette diminution de la demande en chauffage, qui peut également être attribuée à l'augmentation de la température moyenne annuelle, conduit à une demande spécifique de chauffage de **78 kWh/m<sup>2</sup>**.

## 6. IPSF

Tableau 10: Résultats IPSF

Simulation	Pourcentage annuel moyen de surchauffe	Moyenne annuelle des Heat Index	Demande annuelle de chauffage (kWh)	Demande annuelle de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> )	Demande annuelle en refroidissement (kWh)
IPSF	14%	85	10 271	69	/

Cette simulation a pour objectif de simuler l'augmentation de l'intelligence passive dans des conditions météorologiques futures. Pour ce faire, la simulation IPSF possède les mêmes caractéristiques physiques que la simulation IPSA ; casquettes, changement d'orientation et réduction de la surface des vitrages.

Ces modifications se révèlent efficaces dans des conditions météorologiques futures engendrant une augmentation de la température moyenne annuelle. Effectivement, le pourcentage annuel de surchauffe a diminué de 7% par rapport à la simulation MRSF, atteignant **14%** de surchauffe par an. Malgré la diminution du pourcentage annuel moyen de surchauffe, une augmentation du Heat Index moyen est constatée, atteignant **85**. Cette hausse se traduit par une élévation du Heat Index dans la zone de vide sur séjour, atteignant 114. Bien que cette zone ne représente que 1% du volume total, elle est sujette à des pics de température considérables.

La demande annuelle en chauffage de ce niveau d'intelligence passive dans un contexte de changement climatique s'élève à **10 271 kWh**. Ce résultat montre une diminution de 1 370 kWh par rapport à la simulation MRSF. Cette réduction peut s'expliquer par l'efficacité des modifications apportées pour réduire la surchauffe, tout en permettant un apport accru de gains solaires thermiques, qui sont, dans ce contexte, amplifiés par le changement climatique. La demande annuelle en chauffage diminue également de 1 393 kWh par rapport au même niveau d'intelligence dans des conditions météorologiques actuelles (IPSA), cette réduction s'expliquant par les mêmes raisons évoquées précédemment. La simulation IPSF parvient à une demande spécifique en chauffage de **69 kWh/m<sup>2</sup>**, soit une réduction de 9 kWh/m<sup>2</sup> par rapport aux simulations IPSA et MRSF.

## 7. IASF

Tableau 11: Résultats simulation IASF

Simulation	Pourcentage annuel moyen de surchauffe	Moyenne annuelle des Heat Index	Demande annuelle de chauffage (kWh)	Demande annuelle de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> )	Demande annuelle en refroidissement (kWh)
IASF	33%	83	10 895	73	855

La simulation IASF simule le deuxième niveau d'intelligence, considérée comme de l'intelligence active, dans un contexte de changement climatique pour une année typique entre 2040 et 2060.

Le pourcentage annuel moyen de surchauffe qui ressort de cette simulation s'élève à **33%**, démontrant une augmentation significative par rapport à toutes les autres simulations précédentes. Bien évidemment, l'augmentation de la température moyenne et l'allongement de la période estivale sont en partie responsables de l'accroissement du phénomène de surchauffe dans le bâtiment. Cette augmentation peut également s'expliquer par des ombrages peu efficaces face à ces événements.

Le Heat Index moyen est à hauteur de **83**, restant toujours dans la catégorie prudence. Il est similaire au bâtiment de référence dans le contexte du réchauffement climatique.

La demande en chauffage de ce deuxième niveau d'intelligence correspond à **10 895 kWh**, représentant une faible diminution par rapport aux simulations MRSF et IPSF. Cependant, il est pertinent de noter que ce résultat révèle une légère augmentation de la demande en chauffage par rapport au deuxième niveau d'intelligence simulé dans des conditions météorologiques actuelles (IASA). Cette augmentation peut s'expliquer par le fonctionnement d'ombrages, qui intercepte une grande partie des gains solaires thermiques, entraînant ainsi une demande en chauffage légèrement plus élevée. La demande spécifique en chauffage de cette simulation atteint **73 kWh/m<sup>2</sup>**.

Dans des conditions météorologiques futures, le deuxième niveau d'intelligence nécessite une demande en refroidissement plus importante qu'avec les conditions météorologiques actuelles. En effet, la demande en refroidissement atteint **855 kWh**, soit près de quatre fois plus élevée que la simulation IASA.

## 8. IISF

Tableau 12: Résultats simulation IISF

Simulation	Pourcentage annuel moyen de surchauffe	Moyenne annuelle des Heat Index	Demande annuelle de chauffage (kWh)	Demande annuelle de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> )	Demande annuelle en refroidissement (kWh)
IISF	38%	86	8 724	58	67

La dernière simulation de cette étude présente le troisième niveau d'intelligence, défini tel que de l'intelligence interactive, simulée dans des conditions météorologiques futures.

La simulation IISF possède le plus haut pourcentage de surchauffe annuel, s'élevant à **38%**. Ce résultat se reflète par une augmentation générale du phénomène de surchauffe dans toutes les zones qui composent le bâtiment. Cette donnée de surchauffe peut s'expliquer par une récupération de chaleur dans le système de ventilation trop importante, voire non pertinente pour des conditions météorologiques futures représentant une hausse moyenne de la température annuelle.

Le Heat Index moyen annuel de cette dernière simulation est également celui le plus élevé ; **86**. Tel que pour le phénomène de surchauffe, l'augmentation du Heat Index se révèle également dans toutes les zones du bâtiment.

Cependant, la demande en chauffage est la plus petite de toutes les simulations, s'élevant à **8 724 kWh** par an. Cette demande moindre peut s'expliquer par la consigne de température de nuit, la récupération de chaleur dans le système de ventilation, ainsi que par la programmation anticipée de l'augmentation de la consigne de température du système de chauffage en place dans ce troisième niveau d'intelligence, mais également par l'accroissement de la température annuelle et de l'apport en gains solaires thermiques. Cette réduction significative de la demande annuelle en chauffage permet d'atteindre une demande spécifique en chauffage de **58 kWh/m<sup>2</sup>**, la plus basse de toutes les simulations. Ce résultat classe le bâtiment dans la classe énergétique A, le plaçant à seulement 12 kWh/m<sup>2</sup> de la classe énergétique A<sup>+</sup> du PEB.

En ce qui concerne la demande en refroidissement annuelle, elle atteint **67 kWh**, ce qui représente environ le double de la simulation du troisième niveau d'intelligence dans des conditions météorologiques actuelles (IISA). Malgré l'augmentation des températures, la demande en refroidissement reste inférieure à celle de la simulation IASF, ce qui suggère une efficacité du système d'ombrage et du système de programmation anticipée d'une heure du système de refroidissement mis en place dans ce troisième niveau d'intelligence.

## C. Analyse critique de la méthodologie et des résultats

Suite à l'analyse des résultats présentés ci-dessus, certaines critiques peuvent apparaître. Tout d'abord, il est important de garder en mémoire que les données météorologiques futures utilisées afin d'illustrer le contexte du changement climatique ne sont qu'une représentation parmi une grande variété. En effet, dans le cadre de cette étude, les données météorologiques qui ont été choisies représentent une année typique durant la période 2040 à 2060. Dans ces données, les conditions extrêmes telles que les vagues de chaleur sont exclues. Par conséquent, les résultats des différentes simulations ne fournissent pas une représentation définitive de l'impact du changement climatique sur les bâtiments intelligents, étant donné que ce phénomène est sujet à des variations de ses caractéristiques.

Ensuite, étant donné la complexité du domaine des bâtiments intelligents et de la diversité de leurs caractéristiques, une approche a été adoptée consistant à définir trois niveaux distincts d'intelligence. Cette démarche permet leur modélisation dans le logiciel de simulation dynamique TRNSYS, une initiative qui, à ce jour, n'a encore jamais été entreprise. Bien que cette approche soit novatrice, les critères de sélection sont basés sur les recherches effectuées dans l'état de l'art de cette étude. Par conséquent, il est possible que d'autres niveaux d'intelligence soient envisagés, voire que de nouveaux niveaux émergent à l'avenir. Ainsi, il convient de souligner que les niveaux d'intelligence établis dans le cadre de cette étude ne sont pas figés et pourraient faire l'objet d'ajustements ultérieurs.

Enfin, le choix d'utiliser le logiciel de simulation dynamique TRNSYS s'est fondé sur son exposition lors des cours théoriques du Master intégrant ce mémoire. Toutefois, au cours de cette étude, il a été constaté à plusieurs reprises que TRNSYS pourrait ne pas être le logiciel de simulation dynamique le plus approprié pour modéliser les niveaux d'intelligence du bâtiment. Par exemple, pour intégrer pleinement le niveau d'intelligence interactive et le simuler de manière exhaustive dans TRNSYS, il aurait été nécessaire d'intégrer le comportement humain et donc d'incorporer des systèmes algorithmiques devant être exécutés par d'autres logiciels.

## XII. Discussion des résultats

La méthodologie de cette étude définit l'évaluation de la résilience thermique des bâtiments intelligents dans un contexte de réchauffement climatique. Dans un premier temps, un bâtiment résidentiel de référence illustrant la tendance des nouvelles constructions wallonnes est simulé en intégrant divers niveaux d'intelligence exploitant des données météorologiques représentant les conditions actuelles. Ensuite, ce même bâtiment est simulé avec ces divers niveaux d'intelligence en exploitant des données météorologiques futures dans un contexte de changement climatique, représentant une année typique pour la période 2040 à 2060. Pour chacune des simulations, les paramètres de demande de refroidissement, de chauffage, de pourcentage de surchauffe et de Heat Index sont documentés.

### A. Évolution de la demande en refroidissement

La comparaison des données de demande en refroidissement permet de révéler que les simulations utilisant les données météorologiques futures, représentées par la ligne verte, présentent une augmentation significative de la demande en refroidissement par rapport à celles utilisant les données météorologiques actuelles, représentées par la ligne bleue. Cette hausse est due notamment à l'élévation de la température moyenne, comme le montre la Figure 15. En effet, cette augmentation de la température nécessite un refroidissement accru du bâtiment afin de maintenir une température intérieure en dessous de 25°C, évitant ainsi le phénomène de surchauffe.

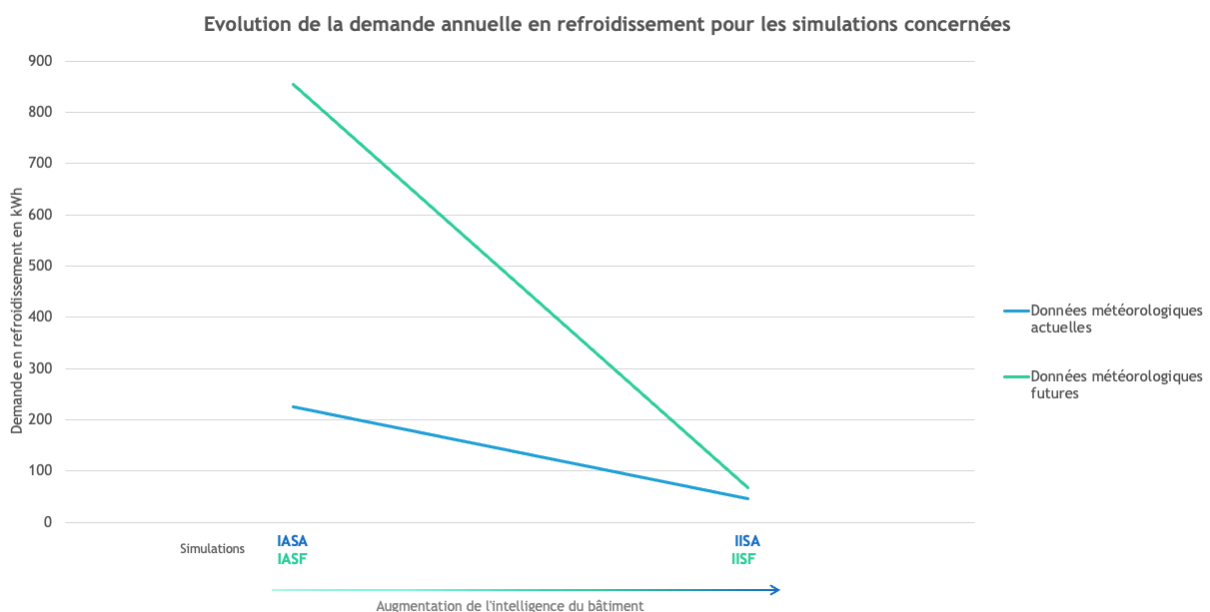


Figure 41: Graphique représentant l'évolution de la demande annuelle en refroidissement pour les simulations concernées

Le graphique ci-dessus (cf. Figure41) démontre également une diminution de la demande en refroidissement entre le deuxième et le troisième niveau d'intelligence. Cette diminution s'explique par l'intégration de protections solaires plus efficaces et par la mise en place d'une

programmation anticipée d'une heure du système de refroidissement améliorant l'efficacité énergétique.

Les résultats pour la demande en refroidissement présentés dans cette section permettent d'affirmer que l'intelligence des bâtiments réduit leur consommation énergétique, comme développé dans l'état de l'art (cf. section VII,A,4) De plus, ce graphique confirme que les bâtiments intelligents conservent leur capacité de réduire la consommation énergétique, même dans un contexte de changement climatique.

## B. Évolution de la demande en chauffage

Le graphique ci-dessous (cf. Figure42) présente les résultats obtenus concernant la demande annuelle en chauffage pour toutes les simulations. Cette représentation permet d'illustrer la tendance à la réduction de la demande de chauffage à mesure que le niveau d'intelligence augmente. En effet, il semblerait que plus le niveau d'intelligence est élevé, plus la demande en chauffage diminue. Par conséquent, l'affirmation évoquée dans la section précédente est à nouveau confirmée : les bâtiments intelligents permettent de réduire la consommation énergétique, peu importe le contexte météorologique.

Il est important de noter que le premier niveau d'intelligence passive se révèle être performant afin de réduire la demande énergétique dans les deux scénarios météorologiques : actuels et futurs. Cette observation souligne que les mesures passives demeurent des stratégies efficaces pour maintenir le confort thermique des occupants dans le bâtiment. Par conséquent, l'intelligence passive pourrait servir de fondement solide lors du processus d'intégration d'intelligence dans le bâtiment.

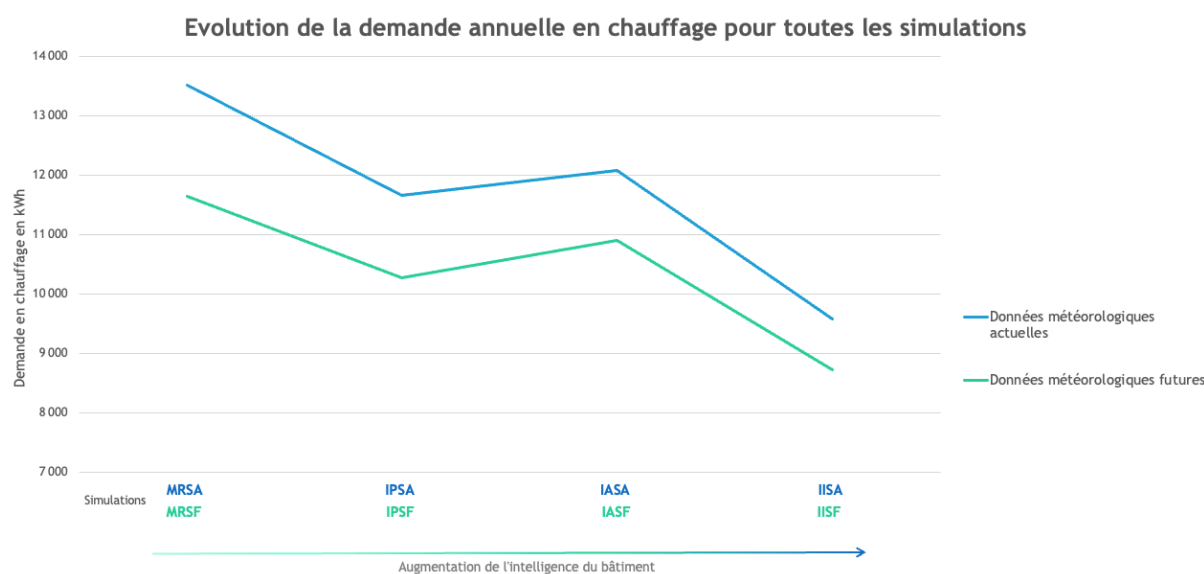


Figure 42: Graphique représentant la demande annuelle en chauffage pour toutes les simulations

Ce graphique met également en évidence la réduction globale de la demande en chauffage dans les simulations utilisant les données météorologiques futures. Cette réduction s'explique par l'augmentation de la température moyenne annuelle prévue dans ce scénario futur. En



effet, avec une température extérieure moyenne plus élevée, le besoin de chauffage diminue, car les bâtiments nécessitent moins de production de chaleur pour maintenir une température intérieure confortable.

### C. Évaluation de la résilience thermique

La représentation de l'évolution du pourcentage annuel moyen de surchauffe dans toutes les simulations de cette étude (cf. Figure 43) fait ressortir une augmentation générale du phénomène de surchauffe dans le bâtiment. En effet, à mesure que le niveau d'intelligence augmente dans les simulations utilisant les données météorologiques actuelles (ligne bleue), le pourcentage de surchauffe augmente également. Cette tendance est similaire pour les simulations utilisant les données météorologiques futures (ligne verte).

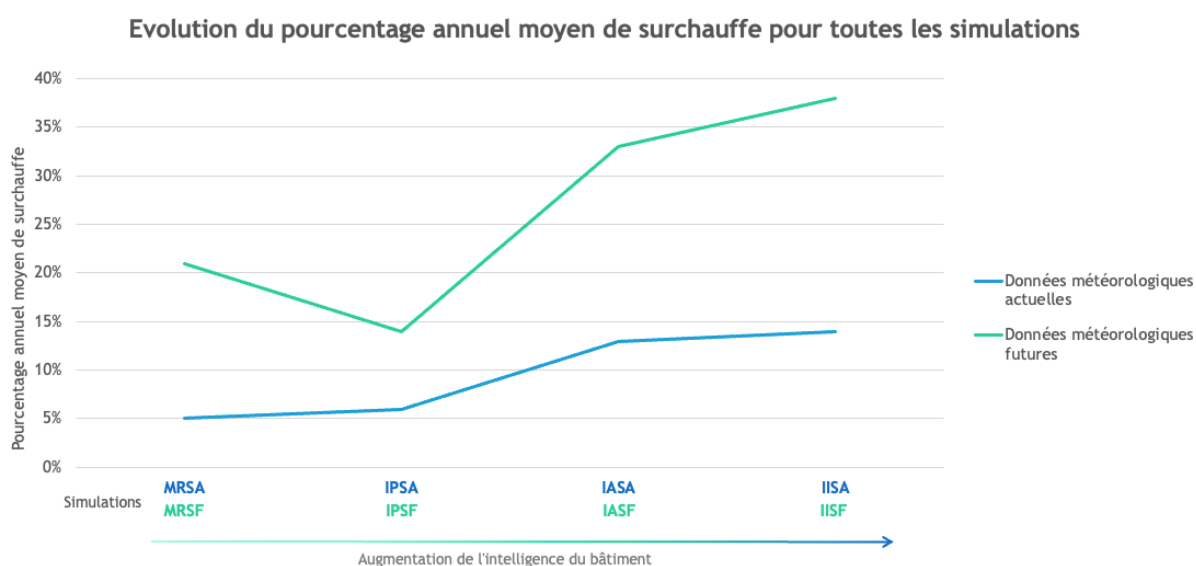


Figure 43: Graphique représentant l'évolution du pourcentage annuel moyen de surchauffe pour toutes les simulations

Le bâtiment de référence ainsi que le premier niveau d'intelligence passive (MRSA et IPSA) dans des conditions météorologiques actuelles présentent des pourcentages annuels de surchauffe satisfaisants, garantissant un confort thermique intérieur. Malheureusement, les deux niveaux d'intelligence supérieurs dans le bâtiment semblent incapables de réduire ce phénomène, compromettant ainsi la résilience thermique du bâtiment.

Cependant, en ce qui concerne les conditions météorologiques futures, le premier niveau d'intelligence passive (IPSF) se distingue de manière significative des autres simulations. En effet, cette simulation affiche le plus faible pourcentage de surchauffe, bien qu'il soit relativement élevé par rapport à la norme passive. Néanmoins, il parvient à maintenir une certaine résilience thermique par rapport au bâtiment de référence et aux niveaux d'intelligence supérieurs. Cette observation souligne également l'efficacité des mesures passives pour atténuer le phénomène inconfortable de surchauffe dans les bâtiments.

Les simulations utilisant les données météorologiques futures révèlent une augmentation moyenne de plus de 15% du phénomène de surchauffe par rapport aux simulations utilisant

les données météorologiques actuelles. Cette augmentation du phénomène de surchauffe peut être expliquée par l'élévation de la température moyenne prévue pour une année typique entre 2040 et 2060. Cependant, il est surprenant de constater l'inefficacité de l'intelligence actuelle des bâtiments à réduire ce phénomène d'inconfort thermique.

Le graphique ci-dessous (cf. Figure44) représente l'évolution du Heat Index moyen annuel calculé pour toutes les simulations de cette étude. Les courbes en lignes continues représentent les données de calcul du Heat Index obtenu par les différentes simulations. Afin de visualiser davantage les tendances d'évolution de ces Heat Index, les lignes pointillées sur le graphique représentent les tendances d'évolution du Heat Index pour les simulations utilisant les données météorologiques présentes et futures.

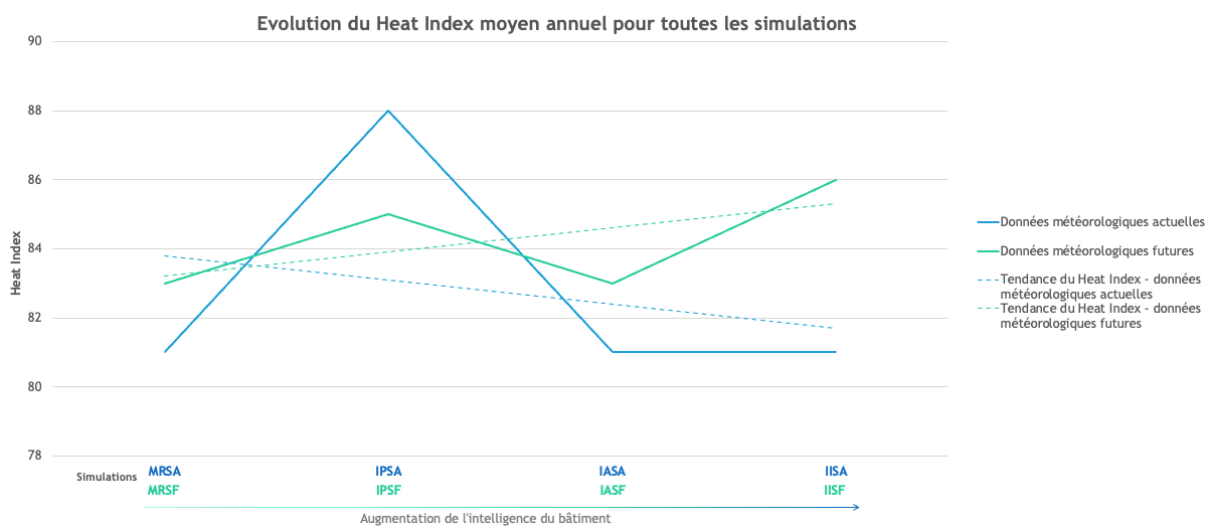


Figure 44: Graphique représentant l'évolution du Heat Index moyen pour toutes les simulations

Cette représentation met en évidence la tendance de diminution du Heat Index pour les simulations avec les données météorologiques actuelles. Effectivement, cette courbe en pointillé souligne le fait qu'au plus le bâtiment possède un niveau d'intelligence élevé, au plus celui-ci réduit le Heat Index moyen annuel, permettant de garantir un meilleur confort thermique intérieur aux occupants. Malheureusement, cette tendance s'inverse pour les résultats des simulations avec les données météorologiques futures. La courbe en pointillée relatives à ces résultats démontrent une tendance à l'augmentation du Heat Index moyen, provoquant un inconfort thermique intérieur et notamment des répercussions sur les occupants telles que des maux de tête ou des crampes dues aux coups de chaleur. Cette augmentation du Heat Index peut également être expliquée par l'augmentation de l'humidité relative dans les données météorologiques futures, comme démontré dans la Figure 16. Effectivement, en se référant au tableau du Heat Index (cf. Figure 13), il est évident que celui-ci démontre qu'une augmentation de l'humidité relative accompagnée à une augmentation de la température entraîne davantage d'inconfort et de problèmes sur la santé humaine.

Cependant, le premier niveau d'intelligence passive affiche le Heat Index le plus élevé, aussi bien dans les conditions météorologiques actuelles que futures. Dans la simulation IPSA, le Heat Index de cette zone atteint 135, tandis que dans la simulation IPSF, il est de 114, des valeurs largement supérieures à celles observées dans les autres simulations (cf. Tableau 4). L'analyse de ce tableau démontre que l'augmentation du Heat Index dans cette petite zone de vide sur séjour fait grimper le calcul moyen du Heat Index pour l'ensemble du bâtiment. Ce calcul, qui ne pondère pas les résultats du Heat Index en fonction des volumes des zones, est donc fortement influencé par cette zone de vide sur séjour.

Données de simulations sans modifications

	MRSA	IPSA	IASA	IISA	MRSF	IPSF	IASF	IISF
Séjour	80	79	79	79	81	80	80	81
Cuisine	78	81	78	81	84	81	80	95
Vide sur séjour	93	135	92	90	97	114	98	98
Salle de bain	80	80	80	81	81	83	82	85
Chambre1	78	80	79	79	80	80	80	80
Chambre2	80	80	80	80	82	81	82	83
Chambre3	79	80	79	79	80	80	79	79
<b>Moyenne annuelle du bâtiment</b>	<b>81</b>	<b>88</b>	<b>81</b>	<b>81</b>	<b>84</b>	<b>86</b>	<b>83</b>	<b>86</b>

Données de simulations avec modifications

	MRSA	IPSA	IASA	IISA	MRSF	IPSF	IASF	IISF
Séjour	80	79	79	79	81	80	80	81
Cuisine	78	81	78	81	84	81	80	95
Vide sur séjour	93	95	92	90	97	95	98	98
Salle de bain	80	80	80	81	81	83	82	85
Chambre1	78	80	79	79	80	80	80	80
Chambre2	80	80	80	80	82	81	82	83
Chambre3	79	80	79	79	80	80	79	79
<b>Moyenne annuelle du bâtiment</b>	<b>81</b>	<b>82</b>	<b>81</b>	<b>81</b>	<b>84</b>	<b>83</b>	<b>83</b>	<b>86</b>

Figure 45: Tableaux de comparaison des données du Heat Index avec et sans modifications de la zone vide sur séjour

Afin d'obtenir une visualisation plus représentative des résultats globaux du bâtiment, il est intéressant d'ajuster les résultats du vide sur séjour à une moyenne représentative telle qu'observée dans les autres simulations. Le tableau ci-dessus (cf. Figure 45) illustre le calcul du Heat Index moyen total si la zone de vide sur séjour maintenait un Heat Index similaire à la moyenne des autres simulations. Comme le montrent les résultats en bleu dans ce tableau, avec des Heat Index moyens pour la zone de vide sur séjour, le Heat Index global du deuxième niveau d'intelligence diminue considérablement, permettant ainsi de maintenir une meilleure résilience thermique globale. Ce calcul a été réalisé afin d'essayer de déterminer la véritable performance de la résilience thermique des niveaux d'intelligence en minimisant l'influence disproportionnée de la zone de vide sur séjour sur les résultats globaux.

## 1. Résumé et évaluation de la résilience thermique des simulations présentées

La section précédente met en évidence les résultats obtenus concernant la résilience thermique des bâtiments intelligents. La discussion de ces résultats révèle une augmentation générale du pourcentage de surchauffe pour les bâtiments intelligents, qu'ils soient confrontés à des conditions météorologiques actuelles ou futures. En ce qui concerne l'indice de chaleur, les bâtiments intelligents parviennent à le réduire dans des conditions actuelles. Cependant, face aux conditions météorologiques futures, les différents niveaux d'intelligence semblent inefficaces et entraînent une augmentation du Heat Index moyen.

La discussion de ces résultats met également en lumière l'efficacité du niveau d'intelligence passive. En effet, en ce qui concerne la surchauffe, ce niveau parvient à réduire le pourcentage annuel de ce phénomène, indépendamment des conditions extérieures ou des impacts du changement climatique sur le bâtiment. Quant à l'évaluation du Heat Index, la figure 45 présente de nouveaux résultats significatifs pour le deuxième niveau d'intelligence passive. En proportionnant correctement l'influence de la zone de vide sur séjour sur le calcul final du Heat Index, il est à noter que le niveau d'intelligence passive parvient à réduire ce dernier et à le maintenir dans une plage de valeurs supportables.

L'analyse de ces résultats révèle que les niveaux élevés d'intelligence des bâtiments ne parviennent pas à offrir une meilleure résilience thermique que les bâtiments actuellement construits. En effet, cette tendance à l'augmentation générale des phénomènes de surchauffe et des Heat Index entraîne une hausse de l'inconfort thermique et, par conséquent, une diminution de la résilience thermique. À l'inverse, les simulations du niveau d'intelligence passive démontrent une performance notable, permettant de maintenir une résilience thermique.

## XIII. Conclusion

---

En conclusion, ce mémoire conduit à contempler une vérité fondamentale : l'intelligence passive est l'un des piliers indispensables pour ériger des bâtiments résilients face aux défis croissants posés par le changement climatique.

Cette démarche a nécessité une analyse approfondie des trois niveaux d'intelligence – passif, actif et interactif – impliqués dans ces bâtiments, ainsi que le développement d'un indice de résilience thermique complet, incluant l'évaluation du phénomène de surchauffe et du Heat Index intérieur.

Grâce aux simulations générées par le logiciel de simulation dynamique TRNSYS, des résultats éclairants ont été obtenus sur la consommation énergétique et la capacité des bâtiments à maintenir un confort thermique optimal, aussi bien dans les conditions météorologiques actuelles que dans les scénarios futurs projetés.

Premièrement, conformément aux recherches antérieures exposées dans l'État de l'art, les simulations confirment que l'intégration de l'intelligence dans les bâtiments contribue efficacement à réduire leur consommation énergétique.

Toutefois, les résultats révèlent une réalité plus nuancée : les niveaux d'intelligence les plus élevés ne constituent pas nécessairement une solution miracle pour garantir une résilience thermique optimale face aux aléas climatiques. En effet, ces niveaux d'intelligence entraînent souvent une augmentation des phénomènes de surchauffe et des Heat Index, augmentant ainsi l'inconfort thermique et diminuant la résilience thermique globale des bâtiments.

C'est dans cette perspective que l'intelligence passive émerge comme un élément clé dans la conception de bâtiments résilients. Les simulations démontrent que le premier niveau d'intelligence dans le bâtiment, nommé l'intelligence passive, est plus performant en termes de résilience thermique que les hauts niveaux d'intelligence, offrant une réponse plus adaptée aux conditions météorologiques induites par le changement climatique tout en préservant une efficacité énergétique notable.

Cependant, l'étude présente des limites qu'il convient de souligner.

Tout d'abord, elle ne peut fournir des conclusions générales sur la résilience thermique des bâtiments intelligents face au changement climatique, car elle ne considère qu'une année typique entre 2040 et 2060, excluant ainsi les conditions extrêmes telles que les vagues de chaleur et les sécheresses. Pour obtenir une perspective plus exhaustive, il aurait été nécessaire d'effectuer un plus grand nombre de simulations, intégrant ainsi tous les éventuels scénarios du changement climatique.

De plus, le bâtiment étudié présente une zone de vide sur le séjour, qui s'est avérée problématique dès la première simulation. Bien que cette zone ne représente que 1 % du volume total, elle influe considérablement sur le calcul du Heat Index global du bâtiment. Une température pondérée en fonction du volume des zones a été utilisée pour les calculs de

surchauffe, mais cela n'a pas été le cas pour le Heat Index. Pour améliorer la qualité des résultats de cette étude, il serait envisageable de convenir d'une équation proportionnelle en fonction du volume de la zone de l'indice de chaleur, afin d'obtenir des résultats finaux moins influencés par cette zone problématique.

Ensuite, bien que cette étude ait défini et simulé trois niveaux distincts d'intelligence dans les bâtiments, il est important de noter que la représentation de l'intelligence dans un bâtiment peut prendre de multiples formes. L'intégration de systèmes tels que le stockage d'énergie, la flexibilité du réseau ou la gestion des données des bâtiments pourrait enrichir l'analyse. L'introduction de niveaux d'intelligence supérieurs pourrait être bénéfique pour approfondir cette étude.

Pour conclure, cette recherche expose l'inefficacité des bâtiments intelligents en matière de résilience thermique. Elle révèle toutefois que l'intelligence passive se démarque par sa performance et émerge comme un pilier fondamental dans la conception des bâtiments. Cette découverte souligne la nécessité impérieuse d'intégrer directement l'intelligence passive et d'examiner en profondeur ses contributions. Les perspectives de recherche qui découlent de ce mémoire pointent vers une nouvelle définition de l'intelligence dans les bâtiments, tenant pleinement compte des défis posés par le changement climatique.

Les résultats obtenus révèlent que l'intelligence, telle qu'elle est actuellement conceptualisée, peut contribuer à la réduction de la consommation énergétique, mais qu'elle ne garantit pas nécessairement une résilience thermique suffisante, ce qui est essentiel face au changement climatique.

Il devient crucial d'inscrire les enjeux climatiques au cœur de la conception des bâtiments, redéfinissant ainsi le concept même d'intelligence dans ce domaine. Cette intégration est essentielle pour garantir que les constructions à venir ne se contentent pas seulement d'être écoénergétiques, mais qu'elles acquièrent également une résilience thermique, assurant le bien-être de leurs occupants dans un environnement climatique en constante mutation.

Ainsi, se pose la question : peut-on réellement qualifier d'intelligente une approche qui échoue à répondre aux défis du changement climatique ?

## XIV. Bibliographie

---

ABB. (s. d.). Energy efficiency of smart buildings - Towards zero consumption and beyond.

Dans *ABB*. Consulté le 21 mai 2024, à l'adresse

[https://www.energyefficiencymovement.com/wp-](https://www.energyefficiencymovement.com/wp-content/uploads/2021/05/ABB_EE_WhitePaper_Smart-buildings_final-1.pdf)

[content/uploads/2021/05/ABB\\_EE\\_WhitePaper\\_Smart-buildings\\_final-1.pdf](https://www.energyefficiencymovement.com/wp-content/uploads/2021/05/ABB_EE_WhitePaper_Smart-buildings_final-1.pdf)

Agence Wallonne de l'air et du climat. (2011). *L'adaptation au changement climatique en région wallonne*. Consulté le 29 mai 2024, à l'adresse

[https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/113405/1/rapport\\_adptation\\_changement\\_climatique\\_wallonie\\_final.pdf](https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/113405/1/rapport_adptation_changement_climatique_wallonie_final.pdf)

Asian Institute of Intelligent Buildings (AIIB). (2024). The intelligent building index manual.

Dans *Asian Institute Of Intelligent Buildings (AIIB)*. Consulté le 21 mai 2024, à l'adresse

[https://www.aiib.net/\\_files/ugd/080162\\_1ea06082e41849fe857fd9b532ccf2a4.pdf?index=true](https://www.aiib.net/_files/ugd/080162_1ea06082e41849fe857fd9b532ccf2a4.pdf?index=true)

*Average US household energy consumption - how do you compare ?* (2021, 11 novembre).

[callmepower.com. https://callmepower.com/useful-information/average-energy-consumption](https://callmepower.com/useful-information/average-energy-consumption)

Batiweb. (2023, 30 mars). Construction bois en Belgique : la croissance se poursuit mais des

défis persistent. *Batiweb*. [https://www.batiweb.com/actualites/vie-des-](https://www.batiweb.com/actualites/vie-des-societes/construction-bois-en-belgique-la-croissance-se-poursuit-mais-des-defis-persistent-41967#:~:text=En%202022%2C%202020%20maisons,un%20peu%20plus%20de%206%20%25.)

[societes/construction-bois-en-belgique-la-croissance-se-poursuit-mais-des-defis-persistent-](https://www.batiweb.com/actualites/vie-des-societes/construction-bois-en-belgique-la-croissance-se-poursuit-mais-des-defis-persistent-41967#:~:text=En%202022%2C%202020%20maisons,un%20peu%20plus%20de%206%20%25.)

[41967#:~:text=En%202022%2C%202020%20maisons,un%20peu%20plus%20de%206%20%25.](https://www.batiweb.com/actualites/vie-des-societes/construction-bois-en-belgique-la-croissance-se-poursuit-mais-des-defis-persistent-41967#:~:text=En%202022%2C%202020%20maisons,un%20peu%20plus%20de%206%20%25.)

- Born, C.-H., Brouhns, I.-S., & Misonne, D. (2016). Le changement climatique en Belgique – Avant-propos. *Doctrine - Université Catholique de Louvain*.  
[https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal%3A227421/datastream/PDF\\_01/view](https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal%3A227421/datastream/PDF_01/view)
- Bouramdane, A. (2024). Shaping resilient buildings and cities : Climate change impacts, metrics, and strategies for mitigation and adaptation. *Information System And Smart City*, 3(1). <https://doi.org/10.59400/issc.v3i1.190>
- Bovet, G., & Hennebert, J. (2013). *Le Web des objets à la conquête des bâtiments intelligents*. Consulté le 21 mai 2024, à l'adresse <https://hal.science/hal-00800508>
- Buckman, A., Mayfield, M., & Beck, S. B. (2014). What is a Smart Building ? *Smart And Sustainable Built Environment*, 3(2), 92-109. <https://doi.org/10.1108/sasbe-01-2014-0003>
- Building Intelligence Group. (2007). *Intelligent Building Dictionary*.
- Cadre de référence R2S. (s. d.). Smart Buildings Alliance For Smart Cities. Consulté le 21 mai 2024, à l'adresse <https://www.smartbuildingsalliance.org/project/cadre-de-reference-r2s>
- Cahill, J. W. (s. d.). *City Place I - the Skyscraper Center*. Consulté le 28 mai 2024, à l'adresse <https://www.skyscrapercenter.com/building/city-place-i/3170>
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barret, K., Blanco, G., Cheung, W. W., Connors, S. L., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., . . . Ha, M. (2023). *IPCC, 2023 : Climate Change 2023 : Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee*



and J. Romero (eds.)). IPCC, Geneva, Switzerland. (p. 1-34).

<https://doi.org/10.59327/ipcc/ar6-9789291691647.001>

Chen, X., Yang, H., & Lu, L. (2015). A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 50, 1425-1436.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.003>

Clements-Croome, D. J. (2014). Intelligent Buildings : An Introduction. *ResearchGate*.

[https://www.researchgate.net/publication/344233663\\_Intelligent\\_Buildings\\_An\\_Introduction](https://www.researchgate.net/publication/344233663_Intelligent_Buildings_An_Introduction)

Commission Européenne. (s. d.). *Smart readiness indicator*. Energy. Consulté le 21 mai 2024, à l'adresse [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-indicator_en#:~:text=The%20SRI%20rates%20the%20smart,grid%20(for%20example%20energy%20flexibility))

[indicator\\_en#:~:text=The%20SRI%20rates%20the%20smart,grid%20\(for%20example%20energy%20flexibility\)](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-indicator_en#:~:text=The%20SRI%20rates%20the%20smart,grid%20(for%20example%20energy%20flexibility))

De Graaf-Van Dinther, R., & Ovink, H. (2020). The Five Pillars of Climate Resilience. Dans

*Palgrave studies in climate resilient societies* (p. 1-19). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57537-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57537-3_1)

Delahais, A., & Robinet, A. (2023). *Coût de l'inaction face au changement climatique en*

*France : que sait-on ?* France Stratégie. Consulté le 21 mai 2024, à l'adresse [https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2023-dt\\_cout-inaction-climatique\\_20\\_avril.pdf](https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2023-dt_cout-inaction-climatique_20_avril.pdf)

Doutreloup, S., Fettweis, X., Rahif, R., Elnagar, E., Pourkiaei, M. S., Amaripadath, D., & Attia, S. (2022). Historical and future weather data for dynamic building simulations in Belgium using the regional climate model MAR : typical and extreme meteorological

year and heatwaves. *Earth System Science Data*, 14(7), 3039-3051.

<https://doi.org/10.5194/essd-14-3039-2022>

Ejidike, C. C., & Mewomo, M. C. (2023). Benefits of adopting smart building technologies in building construction of developing countries : review of literature. *SN Applied Sciences/SN Applied Sciences*, 5(2). <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05262-y>

Energie, A. (2023, 17 avril). *Charge fantôme : débranchez vos appareils pour économiser*.

Alterna Énergie. [https://www.alterna-energie.fr/blog-article/charge-fantome-debranchez-vos-appareils-pour-](https://www.alterna-energie.fr/blog-article/charge-fantome-debranchez-vos-appareils-pour-economiser#:~:text=Une%20charge%20fant%C3%B4me%20correspond%20%C3%A0,%27un%20m%C3%A9nage%5B1%5D)

[economiser#:~:text=Une%20charge%20fant%C3%B4me%20correspond%20%C3%A0,%27un%20m%C3%A9nage%5B1%5D](https://www.alterna-energie.fr/blog-article/charge-fantome-debranchez-vos-appareils-pour-economiser#:~:text=Une%20charge%20fant%C3%B4me%20correspond%20%C3%A0,%27un%20m%C3%A9nage%5B1%5D).

European Commission. (2024, avril). *Smart buildings and smart technologies in Europe : state of play and perspectives | BUILD UP*. Consulté le 29 mai 2024, à l'adresse

[https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/overview-article-](https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/overview-article-smart-buildings-and-smart-technologies-europe-state)

[smart-buildings-and-smart-technologies-europe-state](https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/overview-article-smart-buildings-and-smart-technologies-europe-state)

Fortune Business Insights. (2024). *The Europe smart building market size was valued at \$*

*4.40 billion in 2022 & is projected to grow from \$ 5.27 billion in 2023 to \$ 18.59*

*billion by 2030. . . Read More at :*

*- <https://www.fortunebusinessinsights.com/europe-smart-building-market-105128>.*

Consulté le 29 mai 2024, à l'adresse

<https://www.fortunebusinessinsights.com/europe-smart-building-market-105128>

Gadisseux, T. (2023, 17 juillet). *Aménagement du territoire : on pourra encore construire*

*&apos ; une maison 4 façades&apos ; , mais l'objectif est &apos ; d'optimiser*

*l'utilisation du territoire et du sol&apos ;* RTBF. Consulté le 21 mai 2024, à l'adresse

<https://www.rtbef.be/article/amenagement-du-territoire-on-pourra-encore->

construire-une-maison-4-facades-mais-lobjectif-est-do-optimiser-lutilisation-du-territoire-et-du-sol-11228738

Globule. (2023, 1 mars). *Pression des ventilateurs : quelques notions*. Rosenberg.

[https://www.rosenberg-france.fr/quelques-notions-sur-la-pression/#:~:text=La%20pression%20produite%20par%20un,elle%20est%20not%C3%A9e%20\(Ps\).](https://www.rosenberg-france.fr/quelques-notions-sur-la-pression/#:~:text=La%20pression%20produite%20par%20un,elle%20est%20not%C3%A9e%20(Ps).)

Grosdhomme, É. (2019). Quand les bâtiments sont intelligents, les murs ont des yeux et des oreilles. *Constructif*, N° 54(3), 68-72. <https://doi.org/10.3917/const.054.0068>

Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review Of Ecology And Systematics*, 4(1), 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>

Holling, C. S., Schindler, D. W., Walker, B. W., & Roughgarden, J. (1995). Biodiversity in the functioning of ecosystems : an ecological synthesis. Dans *Cambridge University Press eBooks* (p. 44-83). <https://doi.org/10.1017/cbo9781139174329.005>

Homaei, S., & Hamdy, M. (2021). Thermal resilient buildings : How to be quantified ? A novel benchmarking framework and labelling metric. *Building And Environment*, 201, 108022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108022>

Hong, T., Malik, J., Krelling, A., O'Brien, W., Sun, K., Lamberts, R., & Wei, M. (2023). Ten questions concerning thermal resilience of buildings and occupants for climate adaptation. *Building And Environment*, 244, 110806. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110806>

Kanti Dutta Pramanik, P., Pal, S., Mukherjee, B., Pal, T., & Preet Singh, S. (s. d.). Green Smart Building : Requisites, Architecture, Challenges, and Use Cases. Dans *Research Anthology on Environmental and Societal Well-Being Considerations in Buildings and Architecture*. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-9032-4.ch002>

- King, J., & Perry, C. (2017). *Smart Buildings : Using Smart Technology to Save Energy in Existing Buildings*. Consulté le 21 mai 2024, à l'adresse <https://www.aceee.org/sites/default/files/publications/researchreports/a1701.pdf>
- Košir, M. (2024). The role and importance of climate change adaptability in the age of high-tech buildings. Dans *ResearchGate*. Consulté le 29 mai 2024, à l'adresse [https://www.researchgate.net/publication/379053626\\_The\\_role\\_and\\_importance\\_of\\_climate\\_change\\_adaptability\\_in\\_the\\_age\\_of\\_high-tech\\_buildings/citations](https://www.researchgate.net/publication/379053626_The_role_and_importance_of_climate_change_adaptability_in_the_age_of_high-tech_buildings/citations)
- Le système de ventilation à débit variable | France air*. (2023, 7 juillet). France Air. <https://www.france-air.com/guides-et-documents/le-systeme-de-ventilation-a-debit-variable/#:~:text=La%20VAV%20est%20le%20syst%C3%A8me,air%20neuf%2C%20chauffage%20et%20climatisation.>
- Lepage, R. (2021). *Climate change resilience for buildings*. Consulté le 29 mai 2024, à l'adresse <https://www.rdh.com/wp-content/uploads/2021/07/Climate-Change-Resilience-for-Buildings-Primer.pdf>
- Lhomme, S. L., Serre, D., Diab, Y., & Laganier, R. (2010). LA RESILIENCE : DÉFINITIONS ET CONCEPTS VOISINS. *45ème Congrès de la Société D'Ergonomie de Langue Française Liège (Belgique)*. <https://ergonomie-self.org/wp-content/uploads/2019/06/acte-52-self-2010.pdf>
- Linder, F. (2013). *Ventilation régulée en fonction des besoins et efficacité énergétique*. Consulté le 21 mai 2024, à l'adresse <https://www.sauter.fr/wp-content/uploads/ImportPDM/757328.pdf>
- Menna Allah SALAH Refai Mahmoud. (2023). Towards Climate Resilient Urban Areas Adaptive solutions. (Aswan City, A Case Study). Dans *ResearchGate*. Consulté le 21

mai 2024, à l'adresse

[https://www.researchgate.net/publication/377300744\\_Towards\\_Climate\\_Resilient\\_Urban\\_Areas\\_Adaptive\\_solutions\\_Aswan\\_City\\_A\\_Case\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/377300744_Towards_Climate_Resilient_Urban_Areas_Adaptive_solutions_Aswan_City_A_Case_Study)

Mofidi, F., & Akbari, H. (2020). Intelligent buildings : An overview. *Energy And Buildings*, 223, 110192. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110192>

Moriaux, V. (2023, 22 juin). *PEB : le calendrier de la traque aux passoires énergétiques est établi*. Trends-Tendances. <https://trends.levif.be/immo/peb-le-calendrier-de-la-traque-aux-passoires-energetiques-est-etabli/>

NOAA's National Weather Service. (s. d.). *What is the heat index ?*

<https://www.weather.gov/ama/heatindex>

Omar, O. (2018). Intelligent building, definitions, factors and evaluation criteria of selection. *Alexandria Engineering Journal /Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 2903-2910.

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.07.004>

Rameshwar, R., Solanki, A., Nayyar, A., & Mahapatra, B. (2019). Green and Smart Buildings :

A key to Sustainable Global Solutions. Dans *Green Building Management and Smart Automation*. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-9754-4.ch007>

Roulet, C.-A. (2009). *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments* (2<sup>e</sup> éd.). Presses polytechniques et universitaires romandes.

SageGlass. (2016). *Smart Window Product Overview | SageGlass*. Consulté le 31 mai 2024, à l'adresse <https://sageglass.com/smart-windows/product-overview>

Sauce, G., Burlet, J.-L., & Graziani, O. (s. d.). *Caractérisation de l'intelligence des bâtiments*.

Consulté le 21 mai 2024, à l'adresse

<https://journal.augc.asso.fr/index.php/ajce/article/view/ajce.36.1.18/257>

So, A. T., Wong, A. C., & Wong, K. (1999). A new definition of intelligent buildings for Asia.

*Facilities*, 17(12/13), 485-491. <https://doi.org/10.1108/02632779910293488>

Spw. (s. d.). *Production de logements neufs*. Etat de L'environnement Wallon.

[http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicator sheets/MEN%202.html#:~:text=En%202021%2C%2012%20795%20nouveaux,appartements%20\(44%2C3%20%25\).](http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicator sheets/MEN%202.html#:~:text=En%202021%2C%2012%20795%20nouveaux,appartements%20(44%2C3%20%25).)

STATEC. (s. d.). *Statistiques des bâtiments achevés* [Base de données].

<https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fstatistiques.pUBLIC.lu%2Fdam-assets%2Ffr%2Fdonnees-autres-formats%2Fentreprises%2Fconstruction-logement%2FD4013.xls&wdOrigin=BROWSELINK>

The University of North Carolina. (2023, 26 juillet). *Heat Index - Environment, Health and*

*Safety*. Environment, Health And Safety. Consulté le 21 mai 2024, à l'adresse <https://ehs.unc.edu/topics/heat-stress/heat-index/>

Theodoridis, S. (2020). Introduction. Dans *Elsevier eBooks* (p. 1-17).

<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818803-3.00010-6>

Theunis, L. (2021, 1 février). *Actualisation des données sur le réchauffement climatique en*

*Belgique, un bilan préoccupant*. DAILY SCIENCE.

<https://dailyscience.be/04/02/2021/actualisation-des-donnees-sur-le-rechauffement-climatique-en-belgique-un-bilan-preoccupant/>

Thijs, W. (2023, 26 mai). La construction en bois a-t-elle vraiment le vent en poupe en

Belgique ? *Close Up News*. <https://www.closeupnews.be/fr/article/la-construction-en-bois-t-elle-vraiment-le-vent-en-poupe-en-belgique>

Tradowsky, J. S., Philip, S. Y., Kreienkamp, F., Kew, S. F., Lorenz, P., Arrighi, J., Bettmann, T., Caluwaerts, S., Chan, S. C., De Cruz, L., De Vries, H., Demuth, N., Ferrone, A., Fischer, E. M., Fowler, H. J., Goergen, K., Heinrich, D., Henrichs, Y., Kaspar, F., . . . Wanders, N. (2023). Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in Western Europe during July 2021. *Climatic Change*, 176(7). <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03502-7>

University of Cambridge. (2014). *Climate Change : Implications for Buildings*. Consulté le 29 mai 2024, à l'adresse [https://www.cisl.cam.ac.uk/system/files/documents/IPCC\\_AR5\\_\\_Implications\\_for\\_Buildings\\_\\_Briefing\\_\\_WEB\\_EN.pdf](https://www.cisl.cam.ac.uk/system/files/documents/IPCC_AR5__Implications_for_Buildings__Briefing__WEB_EN.pdf)

U.S Green Building Council. (2018). Resilient by Design : USGBC Offers Sustainability Tools for Enhanced Resilience. Dans *U.S Green Building Council*. Consulté le 21 mai 2024, à l'adresse <https://www.usgbc.org/resources/resilient-design-usgbc-offers-sustainability-tools-enhanced-resilience>

Vanwelde, V., & Vinel, J. (2024). *SmartBuilding* [Diapositives]. Formation Smart Buildings - Buildwise, Bruxelles, Belgique.

Verpoorten, B. (2023, 17 mars). *Le Belge construit toujours plus petit : en 20 ans, la surface des maisons neuves a diminué de 25 m<sup>2</sup>*. RTBF. <https://www.rtbef.be/article/le-belge-construit-toujours-plus-petit-en-20-ans-la-surface-des-maisons-neuves-a-diminue-de-25-m2-11169253>

*What is Dynamic Shading ?* (2022, 14 janvier). KJ Installations, Inc. | What Is Dynamic Shading ? <https://www.kjinstallations.com/blog/post/75839/what-is-dynamic-shading/>

## XV. Annexes

### A. Annexe 1 : Tableau des compositions de parois

Numéro de layer	Nom	Conductivité [kJ/hmK]	Capacité [kJ/kgK]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]
1	Mortier	3,6	1,7	1700
2	SteicoProtect	0,1332	2,1	230
3	PanneauOSB	0,468	1,7	500
4	PlaqueDePlâtre	1,152	1	900
5	BoisDeCharpente	0,468	1,6	600
6	BetonLourdArme	9	1	2400
7	IsotrieGroep	0,0752	1	40
8	BetonLourdNonArme	6,84	1	2400
9	CarreauxDeGres	4,32	1	200
10	Homatherm	0,1368	2,1	55
11	Gitage	0,6122	1,6	600
12	ChapeCiment	4,014	1	1700
13	PareVapeur	0,144	0,1	0,1
14	Ardoise	7,92	1	2700
15	BarriereEtancheité	0,828	1	1150

### B. Annexe 2 : Tableau des compositions des parois composées

Numéro de Layer	Nom	Composition	Conductivité [kJ/hmK]	Capacité [kJ/kgK]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]
16	1ParoiComposée	15% de bois de charpente en feuillus durs et résineux	0,1895	/	/
		85% de ISOFLOC			
17	2ParoiComposée	15% de bois de charpente en feuillus durs et résineux	2,2737	/	/
		85% de Homatherm			



18	3ParoiComposée	11% de bois de charpente en feuillus durs et résineux	0,1764	/	/
		89% de ISOFLOC			
19	4ParoiComposée	20% de bois de charpente en feuillus durs et résineux	0,2059	/	/
		80% de Homatherm			

### C. Annexe 3 : Représentation des murs, planchers et plafonds encodés dans TRNBuild

Walls, floors, ceilings, roofs			
Nom	Composition [inside/back]	Épaisseur [m]	U-value [W/m <sup>2</sup> K ]
EXT_WallEnduit	PlaqueDePlatre AirNonVentile 2ParoiComposée PanneauOSB 1ParoiComposée SteicoProtect Mortier	0,474	0,106
EXT_Roof	PlaqueDePlatre AirNonVentile Homatherm PareVapeur 4ParoiComposée SteicoProtect AirFortementVentile Ardoise	0,286	0,149
EXT_Floor	AirFortementVentile BetonLourdArme IsotrieGroep BoisDeCharpente PanneauOSB	0,402	0,244
GROUND_Floor	CarreauxDeGres BetonLourdNonArme IsotrieGorep BetonLourdArme	0,430	0,102
ADJ_Wall	AirNonVentile PlaqueDePlatre IsotrieGroep PlaqueDePlatre AirNonVentile	0,180	0,154
ADJ_Ceiling	CarreauxDeGres ChapeCiment PanneauOSB Gitage	0,305	0,591
EXT_WALLBardage	PlaqueDePlatre AirNonVentile 2ParoiComposée PanneauOSB 1ParoiComposée SteicoProtect AirFortementVentile BoisDeCharpente	0,474	0,104

ADJ_CeilingGrenier	PlaqueDePlatre AirNonVentile 3ParoiComposee Homatherm BarriereEtancheité	0,464	0,102
--------------------	--	-------	-------

#### D. Annexe 4 : Tableau des surfaces vitrées

Type de fenêtre	Quantité présente	ID Number TRNSYS	U-value	g-value
Fenêtre	12	14306	0,54	0,52
Fenêtre de toiture	3	202	1,07	0,62

#### E. Annexe 5 : Tableau des gains internes

Zones	Gain de présence humaine [kJ/h ]	Gain d'équipement électrique [kJ/hm <sup>2</sup> ]	Gain d'humidité [kg/h ]
Séjour	Radiative: 648 Convective: 432	Radiative: 5,4 Convective: 3,6	0,24
Cuisine	Radiative: 120 Convective: 80	Radiative: 5,4 Convective: 3,6	0,24 et 1,5 pour la cuisson
Salle de bains	Radiative: 60 Convective: 40	/	3
Chambres 1 (chambre parentale)	Radiative: 96 Convective: 64	/	0,12
Chambres 2 & 3	Radiative: 49 Convective: 32	/	0,06

## F. Annexe 6 : Performance Énergétique du bâtiment (PEB)

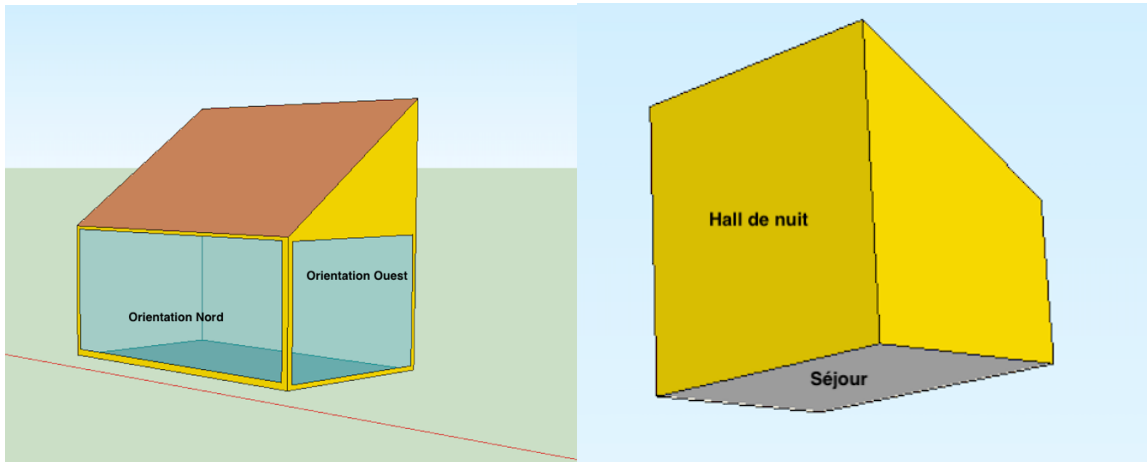
# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS

### Consommation en kWh/m<sup>2</sup>/an

RÉGION BRUXELLOISE	RÉGION WALLONNE	RÉGION FLAMANDE
<b>A</b> < 46 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>A<sup>+</sup></b> < 46 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>A<sup>+</sup></b> < 0 kWh/m <sup>2</sup> /an
<b>B</b> 46 - 95 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>A</b> 46 - 85 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>A</b> 0 - 100 kWh/m <sup>2</sup> /an
<b>C</b> 96 - 150 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>B</b> 86 - 170 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>B</b> 101 - 200 kWh/m <sup>2</sup> /an
<b>D</b> 151 - 210 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>C</b> 171 - 255 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>C</b> 201 - 300 kWh/m <sup>2</sup> /an
<b>E</b> 211 - 275 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>D</b> 256 - 340 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>D</b> 301 - 400 kWh/m <sup>2</sup> /an
<b>F</b> 276 - 345 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>E</b> 341 - 425 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>E</b> 401 - 500 kWh/m <sup>2</sup> /an
<b>G</b> >345 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>F</b> 426 - 510 kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>F</b> >500 kWh/m <sup>2</sup> /an
	<b>G</b> >510 kWh/m <sup>2</sup> /an	

(Moriaux, 2023)

## G. Annexe 7 : zoom sur la zone de Vide sur Séjour



Comme expliqué, les murs « Hall de nuit » et « Séjour » sont des virtuels surfaces. Ce qui signifie que ces murs n'existent pas en réalité, et le vide sur séjour est alors directement lié avec le hall de nuit et le séjour.

## H. Annexe 8 : Fiche projet du modèle de référence

ENVT0901-1



# FICHE PROJET

---

## 7- ÉTUDE D'UNE MAISON E+ EN CONSTRUCTION LEGERE, BECKERICH (LUXEMBOURG)

### Vue d'ensemble

Dans le cadre d'un projet de conception d'une maison à énergie positive, les porteurs du projet (constitué d'un consortium réunissant bureaux d'architectes, institutions publiques et universités) vous ont contacté pour réaliser une étude devant permettre d'analyser les performances globales de la maison et de déterminer, sur base de vos analyses par simulation, quelles sont les mesures à prendre pour que la maison présente un bilan annuel positif. Ce bilan positif se caractérise par une production d'énergie locale supérieure à la consommation de la maison, sur une base annuelle. Attention toutefois, que la maison dans son état initial doit respecter les critères de performances énergétiques d'une maison passive (voir cahier des charges du projet).

Vous devez également montrer que la maison est performante en tout point, ce compris face au risque d'apparition de surchauffe (pièces de vie et chambres). Vous devez déterminer par STD quelles sont les mesures à appliquer si la maison présente un risque élevé d'apparition de surchauffe.

### Objectifs

- Caractérisation de la demande initiale du bâtiment et vérification du caractère passif de la maison avant mesure d'amélioration vers un bilan positif, proposition de solutions (qui seront testées par simulation) pour atteindre un bilan annuel en énergie positif.
- Caractérisation de la surchauffe dans les zones indiquées par le client avant et après mesures correctives. La valeur maximale de la température dans un local en période estivale est fixée à 25°C, par le client.

### Informations sur le projet

Données fournies par le consortium du projet	
<input type="checkbox"/> Plans avec toutes les dimensions précises du bâtiment dans son entièreté et de son environnement proche (bâtiments en face pouvant créer un ombrage sur le bâtiment de l'étude) pour la modélisation des zones d'étude.	Voir plans – <b>Attention, pour les besoins de l'examen, vous devez considérer le mur mitoyen comme un mur extérieur et ne pas tenir compte de la mitoyenneté dans le cadre de votre travail.</b>
<input type="checkbox"/> Orientation du bâtiment	Voir plans
<input type="checkbox"/> Composition des parois (type de matériaux, épaisseurs, valeurs U) et valeurs pour les fenêtres et châssis	Voir ci-après
<input type="checkbox"/> Description du système de ventilation (type et débits)	VMC double flux avec récupérateur de chaleur -> vous devez déterminer (sur base de la norme en vigueur) les débits de pulsion / extraction de chaque pièce et aboutir à l'équilibre
<input type="checkbox"/> Taux d'infiltration	n50 = 0.6 h-1

## ENVT0901-1 Fiche projet

<input type="checkbox"/> Gains internes à appliquer dans la zone d'étude	Se référer aux critères techniques ci-dessous, à déterminer par le bureau d'études en charge du projet de simulation
<input type="checkbox"/> Fréquence des gains (s'il s'agit d'une occupation : nombre de personnes et répartition horaire/hebdomadaire/etc...)	Se référer aux critères techniques ci-dessous, à déterminer par le bureau d'études en charge du projet de simulation
<input type="checkbox"/> Exigences à respecter pour le confort estival (température de consigne)	25°C – imposé par le client
<input type="checkbox"/> Critères d'évaluation pour la surchauffe (température maximale, % annuel à ne pas dépasser)	Règlement GdL en vigueur
<input type="checkbox"/> Chauffage	Chauffage électrique 3kW rendement 100%
<input type="checkbox"/> Refroidissement	Pas traité dans cette étude
<input type="checkbox"/> Production ECS	Pas traité dans cette étude



## Détails – Compositions des parois opaques

Type de paroi : Mur



Tableau des couches

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

Liste des parois

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

Type de paroi : Mur



Tableau des couches

#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	R [m²K/W]
1	Simple	Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - U: 0.15	0,020	0,133
2	Simple	Air fortement ventilé (Air)	-	0,000
3	Simple	Steico Protect (265).ref - U: 0.048	0,100	2,083
4	Composée	15% de Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - U: 0.13 85% de ISOFLOC / Flocons de cellulose - U: 0.039	0,300	5,698
5	Simple	Panneau d'OSB (Oriented Strand Board) (Bois et dérivés de bois) - U: 0.13	0,015	0,115
6	Composée	15% de Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - U: 0.13 85% de Homatherm flex.ref - U: 0.039	0,025	0,475
7	Simple	Air non ventilé (Air)	0,025	0,180
8	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	0,014	0,050

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Exigence
B- ME bois + bardage	35,71	Environnement extérieur	0,11		✓

## ENVT0901-1 Fiche projet

Type de paroi : Plancher/Plafond



Tableau des couches

#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	R [m²K/W]
1	Simple	Béton lourd normal armé (Eléments de construction pierreux sans joints) - U: 2.2	0,150	0,068
2	Simple	Isotrie-groep / Isotrie 240 (> 12cm) - U: 0.025	0,200	7,400
3	Simple	Béton lourd normal non armé (Eléments de construction pierreux sans joints) - U: 1.3	0,070	0,054
4	Simple	Carreaux de grès (Divers) - U: 1.2	0,010	0,008

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Exigence
B- dalle de sol	78,19	Sol	0,11	7,53	

Type de paroi : Plancher/Plafond



Tableau des couches

#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	R [m²K/W]
1	Simple	Homatherm flex.ref - U: 0.039	0,100	2,564
2	Composée	11% de Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - U: 0.13 89% de ISOFLOC / Flocons de cellulose - U: 0.039	0,300	6,121
3	Simple	Air non ventilé (Air)	0,050	0,160
4	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	0,014	0,050

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Exigence
B- plafond étage	46,54	Espace adjacent non chauffé	0,08		

Type de paroi : Toiture



Tableau des couches


#	Type de la couche	Type de matériau	Epaisseur [m]	R [m²K/W]
1	Simple	Air fortement ventilé (Air)	-	0,000
2	Simple	Steico spécial - U: 0.046	0,100	2,174
3	Composée	20% de Bois de charpente en feuillus durs et résineux (Bois et dérivés de bois) - U: 0.13 80% de ISOFLOC / Flocons de cellulose - U: 0.039	0,140	2,448
4	Simple	Homatherm flex.ref - U: 0.039	0,025	0,641
5	Simple	Air non ventilé (Air)	0,025	0,160
6	Simple	Plaques de plâtre entre deux couches de carton (Matériaux hétérogènes)	0,014	0,050

Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	U [W/m²K]	R [m²K/W]	Exigence
B- toiture inclinée	35,65	Environnement extérieur	0,18		


## ENVT0901-1 Fiche projet

### Détails – Compositions des parois translucides

Type de paroi :	Fenêtre	
Type de fenêtre :	Fenêtre simple	
Valeur U du vitrage :	0,60	W/m²K
Valeur g (facteur solaire) :	0,50	
Groupe du profilé :	Bois	
Valeur Uf du profilé :	0,73	W/m²K (Introduction directe)
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation	
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque	

#### Liste des parois


Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Ug [m²K/W]	Exigence
B- 0,02 séjour S +PS	4,34	Environnement extérieur	-11,00	0,79	0,60	

Type de paroi :	Fenêtre	
Type de fenêtre :	Fenêtre simple	
Valeur U du vitrage :	0,60	W/m²K
Valeur g (facteur solaire) :	0,50	
Groupe du profilé :	Bois	
Valeur Uf du profilé :	0,73	W/m²K (Introduction directe)
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation	
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque	

#### Liste des parois


Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Ug [m²K/W]	Exigence
B- 0,03 séjour E	1,94	Environnement extérieur	-101,00	0,79	0,60	

## ENVT0901-1 Fiche projet

Type de paroi :	Fenêtre		
Type de fenêtre :	Fenêtre simple		
Valeur U du vitrage :	0,60	W/m <sup>2</sup> K	
Valeur g (facteur solaire) :	0,50		
Groupe du profilé :	Bois		
Valeur Uf du profilé :	0,73	W/m <sup>2</sup> K (Introduction directe)	
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation		
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque		

### Liste des parois


Nom	Surface [m <sup>2</sup> ]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m <sup>2</sup> K]	Ug [m <sup>2</sup> K/W]	Exigence
B 0,04 séjour N	6,00	Environnement extérieur	169,00	0,79	0,60	

Type de paroi :	Fenêtre		
Type de fenêtre :	Fenêtre simple		
Valeur U du vitrage :	0,60	W/m <sup>2</sup> K	
Valeur g (facteur solaire) :	0,50		
Groupe du profilé :	Bois		
Valeur Uf du profilé :	0,73	W/m <sup>2</sup> K (Introduction directe)	
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation		
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque		

### Liste des parois


Nom	Surface [m <sup>2</sup> ]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m <sup>2</sup> K]	Ug [m <sup>2</sup> K/W]	Exigence
B 0,05 séjour O +PS	3,24	Environnement extérieur	79,00	0,79	0,60	

## ENVT0901-1 Fiche projet

Type de paroi :	Fenêtre		
Type de fenêtre :	Fenêtre simple		
Valeur U du vitrage :	0,60	W/m²K	
Valeur g (facteur solaire) :	0,50		
Groupe du profilé :	Bois		
Valeur Uf du profilé :	0,73	W/m²K (Introduction directe)	
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation		
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque		

### Liste des parois


Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Ug [m²K/W]	Exigence
B 0,06a cuisine N	0,52	Environnement extérieur	189,00	0,79	0,80	

Type de paroi :	Fenêtre		
Type de fenêtre :	Fenêtre simple		
Valeur U du vitrage :	0,60	W/m²K	
Valeur g (facteur solaire) :	0,50		
Groupe du profilé :	Bois		
Valeur Uf du profilé :	0,73	W/m²K (Introduction directe)	
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation		
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque		

### Liste des parois


Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Ug [m²K/W]	Exigence
B- 1,01 hall de nuit S +PS	0,86	Environnement extérieur	-11,00	0,79	0,80	

## ENVT0901-1 Fiche projet

Type de paroi :	Fenêtre		
Type de fenêtre :	Fenêtre simple		
Valeur U du vitrage :	0,60	W/m²K	
Valeur g (facteur solaire) :	0,50		
Groupe du profilé :	Bois		
Valeur Uf du profilé :	0,73	W/m²K (Introduction directe)	
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation		
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque		

### Liste des parois


Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Ug [m²K/W]	Exigence
B- 1,02 chambre 3 S +PS	2,03	Environnement extérieur	-11,00	0,79	0,60	

Type de paroi :	Fenêtre		
Type de fenêtre :	Fenêtre simple		
Valeur U du vitrage :	0,60	W/m²K	
Valeur g (facteur solaire) :	0,50		
Groupe du profilé :	Bois		
Valeur Uf du profilé :	0,73	W/m²K (Introduction directe)	
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation		
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque		

### Liste des parois


Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Ug [m²K/W]	Exigence
B- 1,03 chambre 2 E	0,90	Environnement extérieur	-101,00	0,79	0,60	

## ENVT0901-1 Fiche projet

Type de paroi :	Fenêtre	
Type de fenêtre :	Fenêtre simple	
Valeur U du vitrage :	0,60	W/m²K
Valeur g (facteur solaire) :	0,50	
Groupe du profilé :	Bois	
Valeur Uf du profilé :	0,73	W/m²K (Introduction directe)
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation	
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque	

### Liste des parois


Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Ug [m²K/W]	Exigence
B 1,04a chambre 1 N	0,80	Environnement extérieur	180,00	0,79	0,60	

Type de paroi :	Fenêtre de toit	
Type de fenêtre :	Fenêtre simple	
Valeur U du vitrage :	0,50	W/m²K
Valeur g (facteur solaire) :	0,45	
Groupe du profilé :	Bois	
Valeur Uf du profilé :	1,50	W/m²K (Introduction directe)
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation	
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque	

### Liste des parois


Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Ug [m²K/W]	Exigence
B- 1,05 bain S +PS	0,92	Environnement extérieur	-11,00	1,07	0,50	

## ENVT0901-1 Fiche projet

Type de paroi :	Fenêtre		
Type de fenêtre :	Fenêtre simple		
Valeur U du vitrage :	0,60	W/m²K	
Valeur g (facteur solaire) :	0,50		
Groupe du profilé :	Bois		
Valeur Uf du profilé :	0,73	W/m²K (Introduction directe)	
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation		
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque		

### Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Ug [m²K/W]	Exigence
0,06b cuisine N	0,52	Environnement extérieur	169,00	0,79	0,60	


Type de paroi :	Fenêtre		
Type de fenêtre :	Fenêtre simple		
Valeur U du vitrage :	0,60	W/m²K	
Valeur g (facteur solaire) :	0,50		
Groupe du profilé :	Bois		
Valeur Uf du profilé :	0,73	W/m²K (Introduction directe)	
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation		
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque		

### Liste des parois

Nom	Surface [m²]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m²K]	Ug [m²K/W]	Exigence
B 1,04b chambre 1 N	0,80	Environnement extérieur	169,00	0,79	0,60	




## ENVT0901-1 Fiche projet

Type de paroi :	Fenêtre		
Type de fenêtre :	Fenêtre simple		
Valeur U du vitrage :	0,60	W/m <sup>2</sup> K	
Valeur g (facteur solaire) :	0,50		
Groupe du profilé :	Bois		
Valeur Uf du profilé :	0,73	W/m <sup>2</sup> K (Introduction directe)	
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation		
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque		


### Liste des parois

Nom	Surface [m <sup>2</sup> ]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m <sup>2</sup> K]	Ug [m <sup>2</sup> K/W]	Exigence
B-0,00 wc S	0,48	Environnement extérieur	-11,00	0,79	0,60	

Type de paroi :	Fenêtre de toit		
Type de fenêtre :	Fenêtre simple		
Valeur U du vitrage :	0,50	W/m <sup>2</sup> K	
Valeur g (facteur solaire) :	0,45		
Groupe du profilé :	Bois		
Valeur Uf du profilé :	1,50	W/m <sup>2</sup> K (Introduction directe)	
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation		
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque		

### Liste des parois

Nom	Surface [m <sup>2</sup> ]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m <sup>2</sup> K]	Ug [m <sup>2</sup> K/W]	Exigence
B- 1,06 chambre 2 N	1,34	Environnement extérieur	169,00	1,07	0,50	

Type de paroi :	Fenêtre de toit		
Type de fenêtre :	Fenêtre simple		
Valeur U du vitrage :	0,50	W/m <sup>2</sup> K	
Valeur g (facteur solaire) :	0,45		
Groupe du profilé :	Bois		
Valeur Uf du profilé :	1,50	W/m <sup>2</sup> K (Introduction directe)	
Valeur U grille de ventilation :	Pas de grille de ventilation		
Valeur U Panneau opaque :	Pas de Panneau Opaque		

### Liste des parois

Nom	Surface [m <sup>2</sup> ]	Environnement	Orientation [°]	U [W/m <sup>2</sup> K]	Ug [m <sup>2</sup> K/W]	Exigence
B- 1,07 hall de nuit N	1,09	Environnement extérieur	169,00	1,07	0,50	