

Mémoire de fin d'étude : « Impacte du vitrage pariétodynamique dans la rénovation énergétique des logements des années 1945-1975 à Liège ».

Auteur : EBRAHIMI Morsal

Promoteur : RUELLAN Guirec, HENZ Olivier

Faculté : faculté d'architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2023 - 2024

URI/URL : <https://matheo.uliege.be/>

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'œuvre 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.

Impacte du vitrage pariétodynamique dans la rénovation énergétique des logements des années 1945-1975 à Liège

Travail de fin d'études présenté par EBRAHIMI Morsal
en vue de l'obtention du grade de Master en
Architecture

RESUME

L'examen du contexte environnemental et énergétique récent souligne l'importance de la rénovation énergétique des habitations en Wallonie pour atteindre les objectifs fixés par l'Union européenne.

Dans le contexte wallon, 81 % des logements possèdent des vitrages isolants, principalement du « double vitrage ordinaire », tandis que 19 % n'en ont pas. Cette recherche vise à évaluer le potentiel des baies vitrées des anciennes habitations en y intégrant de nouveaux types de vitrage, tout en prenant en compte l'efficacité énergétique, le confort thermique, le coût de chauffage, les techniques de rénovation et les caractéristiques spécifiques des logements anciens.

L'étude se concentre spécifiquement sur les fenêtres et la ventilation des immeubles anciens, en examinant les divers types de vitrages modernes disponibles et leurs performances énergétiques associées, afin de déterminer les solutions optimales pour les rénovations.

Pour répondre à la question de recherche, nous avons réalisé une étude de cas unique en utilisant le logiciel de simulation thermique dynamique "DesignBuilder" pour obtenir un portrait détaillé de la situation (André, 2022). Le logement choisi a été analysé en fonction de diverses variables issues de quatre grandes catégories : isolation, vitrage, systèmes de ventilation et énergies consommées puis une étude est lancée afin de comparer les données obtenues.

Les résultats de cette recherche indiquent que les mesures de rénovation réduisent la consommation d'énergie et améliorent le confort en été. Cependant, le remplacement des vitrages sans isoler la façade n'apporte pas de différence significative. En hiver, la consommation de chauffage augmente, mais une baisse des températures des heures d'été peut être observée. Cela aide à prévenir la surchauffe dans les logements et trouver un équilibre entre la période d'été et hiver.

Le passage des doubles vitrages aux triples vitrages améliore significativement l'efficacité énergétique en réduisant la consommation de gaz pour le chauffage, grâce à une meilleure isolation thermique. En combinant ces vitrages avec une isolation renforcée des murs, la consommation de gaz diminue encore davantage. Toutefois, cette amélioration peut entraîner une surchauffe en été, nécessitant l'installation d'une ventilation mécanique pour maintenir un confort thermique. Les vitrages pariétodynamiques, bien qu'améliorant la gestion de la chaleur estivale, ne suffisent pas à maintenir une température idéale de 25°C, rendant l'ajout de ventilation mécanique nécessaire pour un confort optimal.

ABSTRACT

An examination of the recent environmental and energy context underlines the importance of energy-efficient home renovation in Wallonia for achieving the targets set by the European Union.

In the Walloon context, 81% of dwellings have insulating glass, mainly "ordinary double glazing", while 19% do not. The aim of this research is to assess the potential of older homes' bay windows by integrating new types of glazing, while considering energy efficiency, thermal comfort, heating costs, renovation techniques and the specific characteristics of older homes.

The study focuses specifically on windows and ventilation in older buildings, examining the various types of modern glazing available and their associated energy performance, to determine the optimum solutions for renovations.

To answer the research question, we carried out a single case study using the dynamic thermal simulation software "DesignBuilder" to obtain a detailed picture of the situation (André, 2022). The selected dwelling was analyzed according to various variables from four main categories: insulation, glazing, ventilation systems and energy consumption, and then a study was launched to compare the data obtained.

The results of this research indicate that renovation measures reduce energy consumption and improve comfort in summer. However, replacing glazing without insulating the facade makes no significant difference. In winter, heating consumption increases, but a drop in summertime temperatures can be observed. This helps prevent overheating in dwellings and strike a balance between the summer and winter periods.

Switching from double-glazing to triple-glazing significantly improves energy efficiency by reducing gas consumption for heating, thanks to better thermal insulation. When combined with reinforced wall insulation, gas consumption is further reduced. However, this improvement can lead to overheating in summer, necessitating the installation of mechanical ventilation to maintain thermal comfort. Parietodynamic glazing, while improving summer heat management, is not sufficient to maintain an ideal temperature of 25°C, making the addition of mechanical ventilation necessary for optimum comfort.

REMERCIEMENT

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse. Votre soutien, vos conseils et votre aide ont été inestimables tout au long de ce parcours.

Tout d'abord, je souhaite remercier sincèrement Monsieur RUELLAN Guirec, mon Co-promoteur. Votre expertise, votre patience et vos encouragements ont été essentiels à la bonne conduite de cette recherche. Vous avez su me guider avec bienveillance et rigueur, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Je souhaite également remercier chaleureusement Monsieur HENZ Olivier, mon promoteur, pour son soutien et son accompagnement tout au long de cette aventure académique.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux membres du jury pour leur temps, leur engagement.

Je remercie également toutes les personnes et institutions qui ont accepté de m'accompagner et de me fournir les informations nécessaires à ma recherche. Vos contributions ont enrichi mon travail et ont permis de donner vie à cette thèse.

Merci à mes collègues et amis pour leur soutien moral et leurs encouragements constants. Votre présence a été une source de motivation et de réconfort dans les moments difficiles.

TABLE DES MATIERES

1	CONTEXTUALISATION	8
1.1.1	Enjeux environnementaux	8
1.1.2	Répartition de la consommation de l'énergie en Belgique	8
1.1.3	Enjeux de la rénovation énergétique de Wallonie	9
1.1.4	Poste de déperdition majeur : fenêtre et ventilation	10
1.2	PROBLEMATIQUE	12
1.3	TRAVAIL DE RECHERCHE	14
2	REVUE DE LA LITTERATURE	15
2.1	Rénovation énergétique	15
2.1.1	Définition	15
2.1.2	Stratégie de rénovation en Belgique	16
2.1.3	Outils mis à disposition en Wallonie	18
2.1.4	Les freins à la rénovation énergétique des logements	19
2.2	LE VITRAGE DANS LA RENOVATION	21
2.2.1	Evolution du verre au cours du temps	22
2.2.2	Vitrages courants dans le cas de logement et leurs applications	23
2.2.3	Normes et réglementations concernant le vitrage dans la rénovation	24
2.2.4	Composant d'une fenêtre	25
2.2.5	Evaluation du cycle de vie et l'impact environnementale des vitrages	29
2.2.6	Fenêtre pariétodynamique	31
2.2.7	Confort thermique lié au vitrage	36
2.3	ETUDE SIMILAIRE SUR LE VITRAGE	41
2.3.1	Etude globale	41
3	METHODOLOGIE	46
3.1	METHODOLOGIE GENERALE	46
3.2	SELECTION DU CAS D'ETUDE	48
3.2.1	La maison Liégeoise	48
3.2.2	Les critères de sélections	49
3.2.3	Sélection et présentation brève de l'habitation	50
3.3	ELABORATION DE SCENARIO DE RENOVATION	54
3.3.1	Choix des variables sur les vitrages	54
3.3.2	Construction des scénarios	54
3.4	MODELISATION DES SCENARIOS DE RENOVATION SUR LOGICIEL	55
3.4.1	Paramétrage	55
3.5	VALIDATION DU MODELE EXISTANT	57
3.6	Paramètre à étudier	58
4	RESULTAT ET DISCUSSION	61
4.1	Résultat des scénarios	61

4.2	Analyse comparative	83
5	CONCLUSION	89
5.1	FORCES ET LIMITATIONS DE L'ÉTUDE.....	90
5.2	Limite de l'étude	91
6	BIBLIOGRAPHIE.....	93
7	ANNEXE	100

1 CONTEXTUALISATION

1.1.1 Enjeux environnementaux

Le changement climatique, une réalité mondiale depuis quelques années, est désormais indéniable et résulte principalement des émissions de gaz à effet de serre (GES), le CO₂ étant le plus répandu. En 2018, les émissions mondiales de CO₂ ont augmenté de 63 % par rapport à 1990. Alors que l'Europe a montré une amélioration (-23 %), les États-Unis, le Moyen-Orient, le Japon et la Chine portent une grande part de responsabilité dans cette problématique potentiellement liée aux GES à long terme, y compris les perturbations atmosphériques et les rejets toxiques (SPW, 2018).

La signature de l'accord de Paris en 2015 a recommandé de maintenir le réchauffement climatique en dessous de 1,5 °C, avec des émissions de 2 tonnes par habitant au niveau mondial d'ici 2050. Cependant, les objectifs fixés par la communauté internationale sont largement manqués. Les solutions mises en avant dans ce rapport soulignent l'urgence d'opérer une transition vers des sources d'énergie à faible émission de carbone (Climat, 2050).

Actuellement, nous devons prendre la responsabilité de faire face à la crise environnementale en cours. Chacun a le pouvoir de mener des actions concrètes et de provoquer des changements positifs. Nos styles de vie et nos choix de logement sont fortement impliqués dans cette période qualifiée de « crise énergétique ». L'amélioration de l'efficacité thermique de nos habitations se profile comme un domaine d'action privilégié. Il représente vraisemblablement le secteur offrant le plus grand potentiel d'économies d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) de manière relativement aisée.

Aujourd'hui, la consommation énergétique du secteur résidentiel a augmenté de manière significative, principalement en raison de plusieurs facteurs : l'accroissement du nombre de logements, l'augmentation de la surface habitable par individu, l'élévation des températures moyennes, ainsi que l'extension des espaces chauffés au sein des habitations (SPW, 2020).

1.1.2 Répartition de la consommation de l'énergie en Belgique

En Belgique, la consommation énergétique du secteur résidentiel a augmenté de plus de 2,9 % par rapport à son niveau de 1990 (Bilan domestique et assimilés, 2019), mais cette hausse est relativisée par la croissance de 20 % du parc de logements sur la même période. La diminution de la consommation par logement s'explique par des comportements plus économes en énergie, une augmentation de la part des appartements et des améliorations apportées aux

caractéristiques énergétiques des logements ainsi qu'à leurs équipements. D'après le schéma illustrant la consommation du secteur résidentiel en Wallonie pour l'année 2019, 75 % correspondait aux besoins de chauffage, tandis que le chauffage de l'eau sanitaire représentait 11 %.

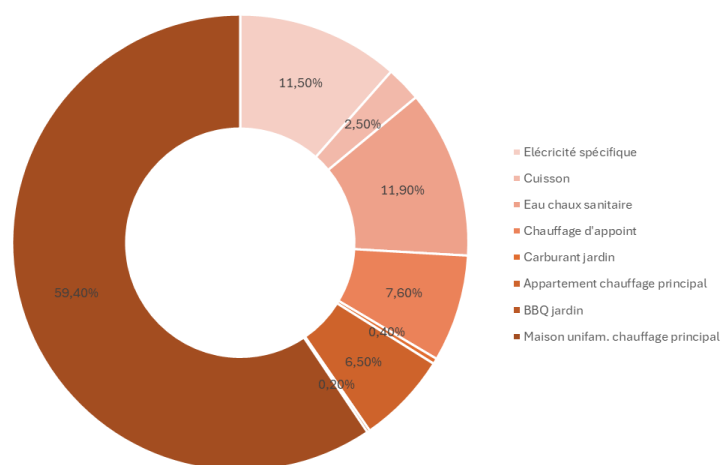


Figure 1 : Consommation finale totale du secteur résidentiel wallon par vecteur d'usage.
(Bilan domestique et assimilés, 2019)

En 2019, la consommation énergétique du secteur résidentiel était principalement alimentée par le gasoil (44 %), le gaz naturel (27 %) et l'électricité (19 %). Les énergies renouvelables ne représentaient qu'une part de 12 % de la consommation finale du secteur résidentiel cette année-là (SPW, 2019).

1.1.3 Enjeux de la rénovation énergétique de Wallonie

Le stock bâti en Belgique

Au 1er janvier 2023, la Belgique comptait 4,6 millions de bâtiments. Depuis 1995, le nombre de bâtiments a augmenté de 16 % dans le pays, tandis que le nombre de logements a connu une croissance plus rapide de 30 %, atteignant ainsi 5,7 millions d'unités. En Région flamande, on observe une augmentation de 32 % du nombre de logements et de 17 % du nombre de bâtiments. En Wallonie, le nombre de logements a augmenté de 29 % et celui des bâtiments de 17 %. À Bruxelles, l'augmentation du nombre de bâtiments est plus modérée (+1 %) comparée aux autres régions, mais le nombre de logements y a tout de même progressé de 21 %. L'âge des bâtiments varie significativement entre les régions : en Flandre, 34 % des bâtiments ont été construits après 1981, contre 22 % en Wallonie et seulement 7 % à Bruxelles (Statbel, 2023).

Les immeubles résidentiels

À l'heure où nous faisons face à de nouveaux défis environnementaux, les ensembles résidentiels d'après-guerre se caractérisent par un niveau de confort et de qualité peu élevé, entraînant une consommation énergétique élevée.

Le parc de logements wallon est constitué majoritairement d'anciens bâtiments : un grand nombre ont été construits avant 1945, et aujourd'hui, près de 86,3 % des logements nécessitent

une rénovation. En effet, ces immeubles répondaient à une pénurie de logements après la Seconde Guerre mondiale, mais ils ne sont plus conformes aux normes actuelles en matière d'habitat et de confort (SPW, 2020). La performance énergétique moyenne est donc classée en catégorie F, ce qui correspond à une consommation théorique de 434 kWh/m²/an.

En 2005, la consommation moyenne d'un logement wallon était estimée à +/-169 kWh/m²/an pour le chauffage, à +/-19 kWh/m²/an pour la production d'eau chaude sanitaire et à +/-23 kWh/m²/an pour la consommation électrique, soit un total de +/-211 kWh/m²/an (Département de l'Énergie, 2020). En conséquence, ces immeubles sont mal isolés et consomment beaucoup d'énergie pour le chauffage. Ils représentent des cibles prioritaires pour l'ensemble du territoire wallon afin de réduire les impacts environnementaux du parc immobilier existant.

Notre parc immobilier a un énorme potentiel de rénovation des logements, car il existe :

- 11 % des logements sans isolation de façade.
- 40 % de toitures ne possèdent pas d'isolation.
- 19 % sont équipées que de simples vitrages.
- 21 % des maisons unifamiliales ont isolé leur dalle de sol. (Bilan énergétique, 2005)

Et pourtant, le taux de rénovation naturel n'est que de 1% par an. Dans le cadre de la stratégie wallonne de rénovation à long terme, il devrait donc augmenter à 3% soit 45.000 habitations/ans. (Rebts, P.M, 2023).

1.1.4 Poste de déperdition majeur : fenêtre et ventilation

Afin de diminuer la consommation énergétique d'un bâtiment, et avant d'améliorer les systèmes de chauffage et de climatisation, il est essentiel de réduire au maximum les pertes de chaleur à travers son enveloppe. La représentation graphique, présentée dans la figure 2, expose la répartition des pertes thermiques. Pour les fenêtres, celles-ci atteignent 10 à 15 % des pertes totales. Pour cette même maison, les pertes dues à la ventilation et aux défauts d'étanchéité atteignent 20 à 25 %. Ainsi, les fenêtres et la ventilation représentent un élément important des pertes de chaleur à travers l'enveloppe d'une maison peu ou non isolée (30 à 40 % au total) (Wallonie Énergie, 2011).

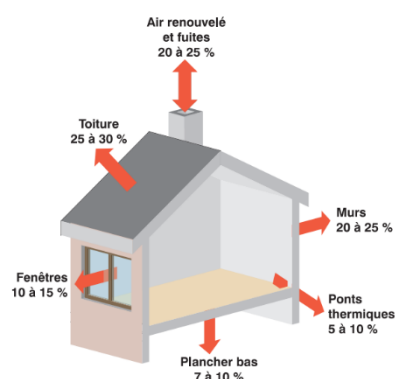


Figure 2 : Répartition des déperditions thermiques à travers l'enveloppe d'une maison peu isolée (Wallonie énergie, 2011)

Les besoins énergétiques d'une maison récente et performante sont beaucoup plus faibles que ceux d'une maison ancienne non rénovée, grâce au renforcement de l'isolation thermique de

l'enveloppe. Le bilan thermique d'une maison passive, présenté dans la figure 3, montre une répartition différente des déperditions énergétiques.

Les pertes thermiques par les fenêtres deviennent ainsi le principal poste de déperdition avec 61 % des pertes, tandis qu'il y a 37 % de gains thermiques dus aux apports solaires.

La ventilation représente, quant à elle, 19 % des pertes (Feist, W., & Schnieders, J., 2009).

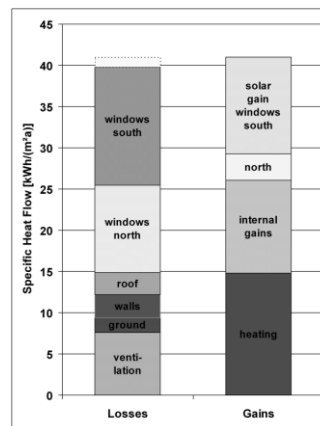


Figure 3 : Répartition des déperditions thermiques d'une maison passive
(Feist, W., & Schnieders, J., 2009)

L'isolation des parois opaques (murs, plafonds, planchers...) s'est rapidement développée grâce à des matériaux performants et économiques comme les laines minérales (laine de verre, laine de roche...) ou les isolants synthétiques dérivés de la pétrochimie (polystyrène, polyuréthane...). Les ponts thermiques ont été réduits grâce à la généralisation de techniques constructives telles que l'isolation sous chape flottante, les rupteurs de ponts thermiques et l'isolation par l'extérieur. La ventilation VMC double flux permet de réduire significativement les déperditions liées au renouvellement de l'air sanitaire (Feist, W., & Schnieders, J., 2009).

Il persiste cependant encore aujourd'hui un point faible dans l'enveloppe des bâtiments : les fenêtres. Néanmoins, plusieurs technologies visent à améliorer leur performance.

Selon les normes récentes, les fenêtres et portes donnant sur l'extérieur doivent assurer une isolation thermique de 31 % dans le cas des maisons individuelles et de 41 % pour les appartements (SPW, 2018).

1.2 PROBLEMATIQUE

Dans le contexte wallon, 81 % des logements possèdent des vitrages isolants et 19 % n'en ont pas. Le type de vitrage isolant le plus courant est le « double vitrage ordinaire » (88 % des cas) ; l'usage du triple vitrage est très faible. Pour les châssis, le matériau le plus fréquent est le bois (63 %), suivi du PVC (29 %), puis de l'aluminium, avec ou sans coupure thermique (Architecture et Climat, 2020).

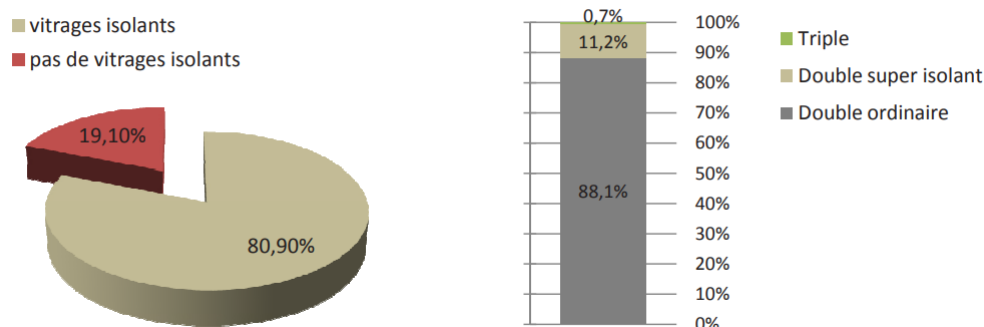


Figure 4 : situation des fenêtres de logement Wallon

Figure 5 : situation des fenêtre isolées en Wallon. (SPW , 2014)

La société de la Maison Liégeoise est active depuis janvier 1921 et se distingue comme l'une des premières entreprises belges axées sur le logement social. Actuellement, elle possède 8 000 logements. La Maison Liégeoise cherche à répondre à la pénurie de logements consécutive à la période d'après-guerre. À de nombreuses occasions, la Maison Liégeoise est reconnue comme un pionnier du secteur du logement social. Plus de 90 % de son parc immobilier se compose d'appartements répartis dans la municipalité de Liège, avec une moyenne d'âge d'environ 60 ans. Une grande partie de ce patrimoine nécessite des mises aux normes et des rénovations conséquentes (Maison Liégeoise, s.d.).

Un vaste programme de rénovation a été lancé, initialement à partir des années 1990 grâce à des financements internes, puis à partir de 2004 avec l'investissement et le soutien de la région wallonne (SWL, 2023). Les immeubles collectifs d'après-guerre sont également les témoins de l'architecture moderne (Lemoine, 2017).

Les principales caractéristiques de ces bâtiments sont d'abriter la fonctionnalité d'habiter (Pousse, 2012). C'est pour cette raison que les architectes ont opté pour une sélection spécifique de configurations d'appartements. Ils ont privilégié les logements de 2 à 3 chambres afin de répondre au « modèle familial » (Lemoine, 2017).

L'objectif des concepteurs de ces immeubles était de proposer de nouveaux logements, tout en améliorant la qualité de vie des habitants. Ainsi, une des caractéristiques fondamentales de ces immeubles modernes est d'ouvrir le logement vers l'extérieur en ajoutant des balcons et de grandes baies vitrées (Moley, 2017), afin de laisser pénétrer un maximum de lumière naturelle dans les pièces et d'améliorer le confort visuel.

Malheureusement, ces ouvertures généreuses présentent également de nombreuses faiblesses, tant au niveau de l'étanchéité à l'air qu'en raison des nombreux ponts thermiques qu'elles génèrent (Lemoine, 2017). Un exemple de logement collectif dans la cité de Droixhe, à

Liège, met en évidence divers problèmes, tels que la surchauffe, l'étanchéité, l'agencement, ainsi qu'une quantité de lumière insuffisante malgré la présence de larges ouvertures.



Figure 6 : situation des tours de logement à Droixhe-Liège (cité de Droixhe, 2022)

La mise aux normes de ce type de logement nécessite une rénovation approfondie. Il est essentiel de rénover la façade des immeubles. La rénovation énergétique doit suivre un ordre précis : il faut étanchéifier, isoler, puis remplacer les châssis et les vitrages. Le remplacement des châssis d'origine offre des avantages thermiques significatifs mais entraîne également des changements dans le comportement hygrothermique du bâtiment, pouvant causer des dégradations importantes et affecter la santé des occupants. Il est donc crucial d'installer un système de ventilation efficace.

Avant le remplacement, la perméabilité des châssis de fenêtres, des portes et des cheminées permet de ventiler naturellement le bâtiment et d'évacuer la vapeur d'eau produite par les occupants. La vapeur d'eau excédentaire condense sur le simple vitrage et est ensuite évacuée par la gouttière des châssis.

Après le remplacement, le châssis sera plus performant, à la fois étanche et isolé thermiquement. Cependant, ce changement entraîne des conséquences importantes sur le bâti ancien. En effet, la vapeur d'eau produite par l'activité humaine ne peut plus être évacuée par ventilation naturelle ni condensée sur le vitrage. Elle n'a alors d'autre choix que de migrer à travers les murs et, si la température à un point de la paroi est inférieure à la température du point de rosée, la vapeur d'eau se condense et entraîne l'humidification du mur. Cette humidification diminue le pouvoir isolant de la paroi et entraîne des risques de dégradations des matériaux ainsi que l'apparition de champignons et de moisissures.

Le remplacement d'un châssis ancien par un châssis moderne, sans réflexion sur la ventilation du bâtiment, peut donc entraîner une dégradation des parois du bâtiment. Il faut donc toujours envisager la mise en place d'une ventilation lorsqu'on étanchéifie un bâtiment (Matheo, 2013).

Le but de cette recherche est de travailler sur le potentiel des baies vitrées des anciennes habitations en intégrant les nouveaux types de vitrage, tout en tenant compte de l'efficacité

énergétique, du confort thermique, du coût de chauffage, des techniques de rénovation et des caractéristiques spécifiques des logements anciens.

Nous nous concentrons spécifiquement sur les fenêtres et la ventilation des immeubles anciens, en examinant les divers types disponibles ainsi que les mesures de performance énergétique qui leur sont associées. Plusieurs types de vitrages seront comparés : vitrage à contrôle solaire, vitrage basse émissivité, vitrage parietodynamique, etc. Nous verrons comment chacun répond à des besoins spécifiques et peut être intégré dans les rénovations (AGC, s.d.).

1.3 TRAVAIL DE RECHERCHE

La problématique centrale que cette étude cherche à résoudre est la suivante : **Quel type de vitrage est le plus adapté pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort des immeubles de logement construits entre 1945 et 1975 ?**

L'objectif ultime est d'enrichir l'expertise des plateformes de rénovation énergétique wallonnes, ou de structures similaires, en fournissant une étude d'impact concrète sur les mesures de rénovation. Cette étude vise à aider ces plateformes à conseiller et persuader les particuliers d'entreprendre des rénovations.

Pour atteindre cet objectif, plusieurs objectifs opérationnels, en accord avec la Stratégie wallonne de rénovation, ont été fixés :

- Sélectionner un cas d'étude représentatif des immeubles résidentiels de la période étudiée ayant une faible performance énergétique et en construire un modèle.
- Élaborer des scénarios combinant différentes mesures de rénovation.
- Étudier l'impact de ces scénarios sur quatre paramètres : consommation d'énergie, émissions de CO₂, surchauffe et coûts sur le cycle de vie.

Cette étude et ses résultats s'adressent à un public diversifié. Elle est principalement destinée aux professionnels des plateformes de rénovation énergétique, aux experts et conseillers en énergie ou en communication. À travers ces acteurs, elle vise également les particuliers souhaitant rénover leur habitation avec un budget limité, ainsi que les auditeurs en logement. Cependant, cette recherche peut également susciter l'intérêt des ingénieurs, architectes et autres professionnels du domaine de la construction ou de l'énergie.

2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

La mise en contexte réalisée dans l'introduction a permis d'identifier un domaine de recherche pertinent pour répondre à une problématique contemporaine. Avant d'entamer le développement d'une méthodologie, il est essentiel d'effectuer une revue de la littérature portant sur le sujet et les notions associées.

Ce deuxième chapitre se divise en quatre sections distinctes. Tout d'abord, le sujet central de ce travail, à savoir la rénovation énergétique, est défini et exploré en détail. Ensuite, les concepts clés en lien avec la méthodologie sont mis en œuvre et examinés : évolution des vitrages, performance énergétique, impacts environnementaux, confort et coûts de la rénovation. Par la suite, l'outil central de cette étude, à savoir le logiciel DesignBuilder, est brièvement présenté. Enfin, une revue des études similaires, focalisées sur des sujets connexes, vise à mettre en lumière les lacunes dans la recherche, auxquelles ce travail pourrait apporter des solutions.

2.1 Rénovation énergétique

2.1.1 Définition

Avant tout, il est primordial d'élargir la définition de la "rénovation énergétique" : qu'englobe exactement cette expression, quels en sont les motifs, comment et quand devrait-elle être mise en place ?

D'après Charlot-Valdieu et Outrequin « la réhabilitation énergétique est une opération impliquant une amélioration énergétique accompagnée d'une amélioration qualitative du logement et du bâtiment, intégrant la question de l'énergie et de la qualité d'utilisation du logement : confort, santé... ».

La réhabilitation énergétique totale désigne une opération visant à explorer simultanément toutes les pistes pour améliorer la performance énergétique du bâtiment, en abordant les sept aspects qui contribuent à la réduction de la consommation d'énergie : l'amélioration de l'étanchéité de l'enveloppe (murs, planchers, toits, menuiseries), l'amélioration de la ventilation, l'efficacité des systèmes de chauffage, et l'adaptation des comportements des occupants pour une meilleure économie énergétique (Charlot-Valdieu, 2018). Dans ce travail, le terme "rénovation énergétique", plus couramment utilisé en Wallonie, sera employé pour englober ces deux définitions.

Outre les enjeux pour la société mentionnés dans l'introduction, la rénovation énergétique des logements présente des avantages pour les propriétaires entreprenant de tels travaux. L'objectif premier de 71 % des ménages engageant des travaux de rénovation de leur logement est, en réalité, l'amélioration de leur qualité de vie : confort thermique, acoustique, luminosité naturelle et artificielle, agencement spatial... (Charlot-Valdieu, 2018). L'amélioration de la qualité sanitaire du logement, notamment de l'air intérieur, constitue également une raison importante pour rénover. Un air sain aide à prévenir les problèmes

d'humidité fréquents dans les logements anciens. Ces problèmes peuvent se manifester sous forme de moisissures, entraînant allergies et irritations chez certaines personnes (Charlot-Valdieu, 2018).

De plus, la réalisation d'économies à long terme attire certains propriétaires. Ces économies se manifestent à plusieurs niveaux : réduction des factures énergétiques (moins de dépendance aux fluctuations des prix de l'énergie), augmentation de la valeur immobilière du bien (récupérable en partie lors de la vente), et prévention des dégradations futures (notamment liées à l'humidité) (Walloreno, 2021).

Un dernier avantage résultant d'un projet de rénovation est l'amélioration esthétique, intérieure ou extérieure, du bâtiment. Il s'agit souvent d'un effet secondaire positif des travaux, par exemple lors de l'isolation des parois. Il est toutefois essentiel de tenir compte des contraintes patrimoniales, historiques et urbanistiques avant d'envisager certaines modifications (Charlot-Valdieu, 2018).

Les projets de rénovation énergétique visent à répondre à des enjeux techniques, environnementaux, humains et économiques. Selon Charlot-Valdieu et Outrequin, ils devraient suivre quatre grands principes :

- Sobriété énergétique : réduction du gaspillage énergétique par l'adaptation des habitudes de consommation des occupants.
- Prise en compte du confort et de la santé des occupants : amélioration du renouvellement de l'air et du confort thermique en été comme en hiver.
- Efficacité énergétique : réduction de la consommation d'énergie grâce à l'amélioration des performances de l'enveloppe et des systèmes de chauffage.
- Utilisation des énergies renouvelables : satisfaction des besoins énergétiques avec un impact réduit sur l'environnement.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs dispositifs de rénovation énergétique peuvent être mis en place. Les principales zones d'intervention incluent l'isolation des parois (murs, fenêtres, toitures, planchers et menuiseries), l'étanchéité à l'air de l'enveloppe, l'amélioration des systèmes de production de chaleur, le renouvellement de l'air via ventilation naturelle ou mécanique, et l'utilisation d'énergies renouvelables telles que la biomasse, le solaire, le photovoltaïque et la géothermie (SPW, 2016).

2.1.2 Stratégie de rénovation en Belgique

En Belgique, la gestion de l'énergie est décentralisée vers les régions, chacune établissant ses propres politiques pour promouvoir la rénovation énergétique : Walloreno en Wallonie, Révolution à Bruxelles-Capitale et Ik BENOveer en Flandre.

Walloreno

Walloreno est une campagne visant à encourager la rénovation des bâtiments pour réduire leur consommation d'énergie. L'objectif est d'atteindre un haut niveau de performance énergétique dans les bâtiments d'ici 2050 (Walloreno, 2021a).

Le défi est immense. En Wallonie, la majorité des habitations, soit près de 1,6 million, présentent actuellement un label F en termes de performance énergétique. Pour atteindre l'objectif fixé, il serait nécessaire de rénover 48 000 logements par an, soit environ 130 logements par jour, sur une période de 30 ans. Afin d'accompagner les candidats à la rénovation, la Région wallonne met à disposition une gamme d'outils et de ressources disponibles sur le site de la campagne Walloreno.

- le prêt à taux zéro
- l'audit Logement (et certificat PEB)
- la prime Habitation
- les guichets Énergie Wallonie
- le Quicksan
- le guide pratique (Vlaanderen, 2020)

BENOVeer

La campagne de rénovation flamande Ik BENOVeer émane d'un accord de rénovation conclu entre le gouvernement flamand et divers intervenants du secteur de la construction.

Son objectif principal est de rendre chaque maison ou appartement aussi économe en énergie d'ici 2050 qu'une habitation énergétiquement performante aujourd'hui. Avec un parc immobilier en Flandre comprenant environ 2,5 millions de logements nécessitant une rénovation, cela équivaut à 100 000 logements à rénover chaque année pour atteindre cet objectif avant l'échéance.

Ainsi, conformément à la vision de la campagne, la rénovation doit être à la fois "ambitieuse" (dépassant les exigences actuelles en matière de performance énergétique) et "méticuleuse". Pour faciliter ce processus, la Région flamande a mis en place un portail numérique qui centralise les informations essentielles sur chaque logement, telles que le certificat PEB, la feuille de suivi des travaux et des interventions (SPW, 2020).

Revolution (Bruxelles-Capitale)

Elle a été lancée par la Région de Bruxelles-Capitale et vise à élever le niveau moyen de performance énergétique des logements bruxellois à 100 kWh/m²/an d'ici 2050, correspondant au label C+ (équivalent à B en Wallonie). Pour rénover les 550 000 logements concernés, il est nécessaire que 5 % des logements occupés par leurs propriétaires et 2,6 % des logements en location soient rénovés.

Les principaux axes d'action mis en avant par Revolution comprennent la promotion du certificat PEB, la collaboration avec divers acteurs du secteur de la construction, le soutien aux propriétaires (par exemple, aides financières, prêts à taux réduits, simplification des démarches administratives), le renforcement des normes pour le secteur tertiaire, ainsi qu'une approche circulaire (Bruxelles Environnement, 2020).

Les objectifs fixés par les trois régions pour 2050 présentent finalement des similitudes marquées. Bien que Bruxelles bénéficie d'un label PEB initial plus favorable que les deux autres

régions, en raison de la compacité de son parc immobilier (principalement constitué d'appartements), cette configuration majoritaire constitue également un obstacle, car elle rend la rénovation plus complexe que pour les logements individuels. En revanche, la Région wallonne et la Région flamande ont l'avantage sur Bruxelles en ce qui concerne la mise en place effective d'outils concrets pour promouvoir et accompagner les projets de rénovation.

2.1.3 Outils mis à disposition en Wallonie

La campagne Walloreno offre un aperçu des principaux outils disponibles pour les Wallons souhaitant entreprendre des travaux de rénovation énergétique. Cette section met en lumière ces outils afin d'enrichir la compréhension du contexte régional de la recherche. Parmi les nouveaux outils récemment développés figurent le passeport bâtiment, la feuille de route de rénovation et le guichet énergie unique.

Guichets Énergie

Les Guichets Énergie Wallonie sont des centres d'information et d'assistance pour les citoyens concernant les questions énergétiques liées à leur logement. Il en existe seize, répartis sur tout le territoire régional. Ces guichets offrent des conseils impartiaux et personnalisés, dispensés par des professionnels, gratuitement. Propriétaires et locataires peuvent y obtenir des informations techniques et administratives pour leurs projets de construction ou de rénovation, ainsi que des conseils pour améliorer la performance énergétique de leur domicile. Les guichets fournissent également des informations sur la réglementation en vigueur en Wallonie et les aides disponibles (SPW, 2021a).

Quickscan

Quickscan est un outil en ligne permettant une auto-évaluation rapide des performances énergétiques des maisons unifamiliales. Il propose des conseils pour réduire la consommation d'énergie et améliorer le confort, mais il ne remplace pas une certification PEB officielle (SPW, 2016b).

Audit logement

L'audit logement est une analyse de la performance énergétique réalisée par un auditeur agréé en Wallonie. Il évalue la salubrité, la santé et la sécurité d'un logement. Son but est d'identifier les points faibles et de recommander des travaux prioritaires pour améliorer le confort, la santé et réduire la consommation d'énergie (SPW, 2019). Les résultats sont présentés dans une brochure détaillée, avec des travaux chiffrés et regroupés par bouquets. Contrairement au certificat PEB, obligatoire lors de la vente ou de la location d'un logement, l'audit est réalisé sur une base volontaire. Toutefois, pour une habitation unifamiliale, un certificat PEB est fourni pour une période de 10 ans en même temps que l'audit.

Primes et prêts à taux réduit

Depuis juin 2019, trois types d'aides financières sont disponibles pour les particuliers souhaitant rénover en Wallonie : les primes Habitation, le prêt à taux réduit (Rénoprêt) et le prêt à taux réduit avec primes. Les bénéficiaires doivent être propriétaires d'un logement âgé de plus de 15 ans. Les primes Habitation sont octroyées pour certains travaux, en fonction de la composition du ménage, des revenus, des travaux et de leur impact sur la performance énergétique, sans dépasser 70 % du montant total des travaux (SWCS, 2019).

Le prêt à taux réduit est un prêt sans intérêt destiné à financer divers travaux de rénovation d'un logement, tels que les économies d'énergie, l'amélioration de la salubrité, de la sécurité et l'adaptation au handicap. Le montant accordé peut varier de 1 000 € à 60 000 €, avec une durée maximale de remboursement de 30 ans, fixée par la Société wallonne du crédit social ou le Fonds du logement de Wallonie (SPW, 2021a).

Pour bénéficier des aides financières pour les travaux de rénovation, il est nécessaire, sauf exceptions, de faire réaliser un audit logement par un auditeur agréé par la Wallonie avant le début des travaux. Il est important de noter que cet audit est payant, son coût variant entre 110 € et 660 € pour tous les ménages, sans tenir compte des conditions de revenus (SPW, 2021a).

2.1.4 Les freins à la rénovation énergétique des logements

L'objectif de l'Union européenne pour 2050 est la rénovation d'un grand nombre de logements. Cependant, plusieurs obstacles entravent l'augmentation du taux de rénovation. Cette section identifie les principaux freins à la rénovation énergétique en Wallonie.

Coût de la rénovation, prix de l'énergie et financement

En Wallonie, certains bâtiments présentent des difficultés en matière d'amélioration de leurs performances énergétiques, bien que des méthodes efficaces existent, tant sur le plan énergétique que financier. La question de démolir et de reconstruire se pose parfois, mais cette option n'est pas toujours la plus efficace. Il est donc nécessaire de trouver des solutions innovantes pour améliorer les performances des bâtiments, notamment des bâtiments classés (The Passive House).

Souvent, les gens ne prennent pas en compte le coût total de leur maison sur toute sa durée de vie lorsqu'ils décident d'investir dans des rénovations. Le manque de fonds constitue une barrière importante à la rénovation durable, ce qui dépend directement des revenus des ménages (The Passive House). Ainsi, ceux qui rencontrent le plus de difficultés avec leur facture d'énergie vivent souvent dans des maisons peu performantes et n'ont pas les moyens de financer des rénovations importantes. Il ne s'agit pas uniquement d'une rentabilité à court terme, mais également d'un avantage financier à long terme de réaliser ces investissements.

La rénovation des logements existants présente souvent des limites par rapport à la construction de nouveaux logements, car elle peut ne pas permettre d'atteindre des niveaux de performance très élevés en raison d'une flexibilité moindre. Dans certains cas, démolir et reconstruire des bâtiments peut être plus judicieux pour atteindre des normes de performance supérieures. Cependant, il est essentiel de ne pas se concentrer uniquement sur la consommation d'énergie dans cette comparaison, car d'autres facteurs, comme l'utilisation des ressources naturelles et les critères économiques à long terme, doivent également être pris en compte (Pathways, 2009).

En Belgique, les propriétaires, généralement plus aisés, disposent de plus de moyens pour entreprendre des rénovations énergétiques. Cependant, les locataires, bien que moins nombreux, ont souvent des besoins de rénovation plus importants et moins de moyens pour y répondre. Les intérêts divergents entre propriétaires et locataires expliquent en partie la faiblesse des performances énergétiques des logements en location. Une communication efficace entre locataire et propriétaire est bénéfique pour les deux parties sur le long terme (The Passive House).

Protection du patrimoine et réglementation

En Belgique, les responsabilités sont partagées entre différents niveaux de gouvernement, ce qui génère une certaine complexité dans l'application des règles. Cela influence la réglementation de la rénovation énergétique, qui peut être à la fois une opportunité et une barrière.

Actuellement, les directives européennes s'appliquent uniquement aux rénovations majeures, avec des exceptions comme Bruxelles-Capitale. Toutefois, des réglementations trop strictes pourraient retarder des travaux nécessaires, en raison des investissements importants qu'elles exigeraient pour atteindre les normes.

La préservation du patrimoine exige souvent des compromis, notamment pour les façades protégées. Il n'existe pas encore de solutions techniques adaptées permettant de surmonter cette barrière esthétique. Bien que des solutions alternatives existent parfois, les performances énergétiques des bâtiments historiques ne peuvent pas rivaliser avec celles des constructions neuves, conçues pour être économes en énergie.

Information et communication

Il est difficile de juger des caractéristiques du stock de bâtiments en Belgique en raison du manque de données détaillées dans les archives. (The Passive House). Malgré l'existence de techniques et systèmes pour des rénovations durables, une meilleure compréhension est nécessaire. Plusieurs difficultés de communication existent entre le maître d'ouvrage et les professionnels : Manque de professionnels formés aux bonnes pratiques de rénovation, ce qui compromet la qualité des travaux (The Passive House).

- Absence de solutions intégrées et adaptées aux besoins des propriétaires. Bien que la rénovation énergétique soit en cours, les rénovations écoénergétiques souffrent encore d'un manque de reconnaissance.
- L'augmentation de la TVA sur les travaux de rénovation envoie des signaux contradictoires.
- Complexité des décisions politiques et de leur mise en œuvre.

2.2 LE VITRAGE DANS LA RENOVATION

Les économies d'énergie dans les bâtiments sont importantes. De 20 à 40 % de l'énergie utilisée dans les pays développés provient des bâtiments résidentiels et commerciaux (Pérez-Lombard, 2008). Cette énergie est principalement utilisée pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage.

Les fenêtres ont été identifiées comme un élément clé pour améliorer l'efficacité énergétique, car les pertes de transmission à travers une fenêtre peuvent être dix fois plus élevées que celles à travers les parois adjacentes, par unité de surface. De plus, il est généralement plus facile de rénover ou de remplacer les fenêtres que la plupart des autres parties de l'enveloppe du bâtiment (Rosencrantz, 2005).

Lors de la rénovation des vitrages, plusieurs défis techniques et architecturaux se posent. En général, on estime que les fenêtres datant de 1950 et avant étaient fabriquées avec du bois de haute qualité et comportaient des détails architecturaux qui méritent d'être conservés. Dans ces cas, il est souhaitable de mettre en œuvre des mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique sans altérer l'apparence visuelle des fenêtres et de la façade. Il est crucial de trouver un équilibre entre la taille des fenêtres pour minimiser les pertes de chaleur tout en permettant l'entrée de lumière naturelle, afin de bénéficier de ses avantages et de la vue extérieure.

Les nouvelles technologies des fenêtres offrent de meilleures performances, mais il est important de noter que ces systèmes complexes nécessitent une révision de la performance de l'ensemble de l'enveloppe du bâtiment ainsi que d'autres systèmes techniques, comme la ventilation. Par conséquent, la conception des fenêtres doit intégrer ces aspects tout en garantissant une performance énergétique optimale (Rosencrantz, 2005).

2.2.1 Evolution du verre au cours du temps

Dans cette partie, nous passons en revue l'évolution des vitrages au cours du temps, puis nous développons les critères des vitrages qui influencent le confort thermique et la consommation énergétique.

Évolution du verre en Belgique

La première idée de la production de verre remonte au IX^e siècle, avec une production réalisée par la technique de soufflage. L'amélioration continue jusqu'au XVII^e siècle grâce à l'invention de Louis Lucas de Néhou. Avec sa méthode de coulage, on produit des verres de qualité supérieure.

Au XX^e siècle, la mécanisation permet de produire une plus grande quantité de verre (Qui a inventé les fenêtres). En Belgique, la fabrication industrielle du verre débute uniquement en 1836, dans une usine située dans la vallée de la Sambre. Plus tard, dans les années 1950, la production atteint le chiffre remarquable de 100 millions de mètres carrés de verre par an, marquant ainsi une avancée significative pour l'industrie de la construction.

Pendant l'après-guerre, entre 1945 et 1975, non seulement la quantité de production atteint des niveaux considérables, mais une diversité de verres est également mise à la disposition des consommateurs. On assiste à une transition du simple verre et de la glace traditionnelle vers une gamme plus large comprenant du verre décoratif coulé, du verre de sécurité, du verre coloré, du double vitrage, et bien d'autres options. Cette innovation offre aux architectes une grande latitude dans la conception de leurs projets. Cependant, il subsiste divers critères à améliorer et à perfectionner concernant les vitrages. Des aspects tels que la filtration des rayons UV, la résistance, l'isolation thermique et acoustique nécessitent encore des développements et des progrès (Qui a inventé les fenêtres).

En 1960, pour classer les types de verre, le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) met en place la note NIT n°25 pour la terminologie des différents verres. Selon cette terminologie, le CSTC identifie huit grandes catégories de verres : les produits de glacerie, le verre à vitre, le verre coulé, le verre soufflé, le verre moulé ou les briques de verre, les spécialités ressortissantes aux verres plats, les glaces et verres transformés, et les glaces et verres façonnés (Verre et vitrages). Parmi les groupes, il existe encore des sous-groupes, comme le verre coloré, le verre opaque et le verre athermique.

D'après l'étude du CSTC, le verre soufflé et certains verres coulés ne sont pas utilisés dans le secteur du logement (Verre et vitrages). Pendant la période d'après-guerre, les presses et les publications architecturales mentionnent le type de verre et la technique de mise en œuvre. Cependant, dans les nouvelles constructions, seulement 25 % indiquent ces informations.

D'après Pierre Gilard, directeur de l'Institut national du verre (Verre et vitrages) : « Le verre ne constitue plus, comme par le passé, un simple moyen d'obturation laissant à la pierre la faveur de créer un style ; il prend rang parmi les éléments fondamentaux de l'architecture. » Le Tableau 1 reprend de manière synthétique le type de verre et ses caractéristiques...

Type de verre	Caractéristique
Verre Polie	Epaisseur 2- 40mm, la largeur dépend de l'épaisseur allant jusqu'à 6m, polie mécaniquement, transparente, utilisation régulière dans les logements.
Verre à vitre	Epaisseur 0,6- 2mm, la largeur dépend de l'épaisseur allant jusqu'à 6m polie mécaniquement, transparente, utilisation régulière dans les logements.
Verre coulé	Utilisée dans les occasion décoratif, surface texturée et avec des motifs, translucide mais laisse passer presque même quantité de lumière qu'un verre transparent.
Brique de verre	Construite sous forme carré ou ronde. Dimension va de 5x5cm -30x30cm. Résistant au feu, meilleur isolant, transparence de 80%, possibilité de combiné avec le béton coulé et la brique
Verre transformé	Trois types : double vitrage double vitrage diffusant, verre de sécurité Double vitrage est utilisé dans le secteur logement, meilleur type pour isolation thermique et acoustique, épaisseur des verres 3-10mm et épaisseur de lame 20mm et une surface de 3x6m max. n'est pas étanche à l'aide donc il y a la condensation entre deux verres ainsi les verres étaient translucides. Cependant double vitrage diffusant présente une couche de fibre de verre entre deux parois alors, les verres reste transparente.
Verre façonné	
Spécialité ressortissante aux verres plats	Mélangé avec l'oxyde de métal, peut être coloré, opalescent, opaque, utilisé dans les immeubles de bureau, bibliothèque ou zone de travail

Tableau 1 : différent type de verre et leur caractéristique (Verre et vitrages)

2.2.2 Vitrages courants dans le cas de logement et leurs applications

En général, les logements sont équipés de vitrage simple, double et, dans une très faible quantité, de triple vitrage. Le choix entre vitrage simple, double ou triple, ainsi que l'utilisation de vitrages spéciaux, dépend des objectifs spécifiques de la rénovation, des conditions climatiques, des exigences en matière de confort acoustique, de sécurité et des considérations budgétaires. Comme indiqué précédemment, en Wallonie, près de 20 % (Architecture et Climat, 2020) des fenêtres ne sont pas isolées et nécessitent un remplacement ou une rénovation majeure.

Le simple vitrage est principalement utilisé dans les bâtiments anciens et dans certaines situations où l'efficacité énergétique n'est pas la priorité. Il convient pour les climats doux où les variations de température ne sont pas extrêmes. L'avantage de ces vitrages est leur coût initial faible, et ils sont les moins chers à installer. Leur installation et leur maintenance sont plus simples. Cependant, ils offrent une très mauvaise isolation thermique : ils laissent passer facilement la chaleur et le froid, ce qui entraîne une augmentation des coûts énergétiques. Il faut savoir que la consommation annuelle d'un simple vitrage est d'environ 400 kWh/m². De plus, ils ne protègent pas efficacement contre les bruits extérieurs et sont plus susceptibles de se briser, offrant moins de résistance aux effractions.

Le double vitrage est plus adapté pour la majorité des bâtiments résidentiels et commerciaux dans les climats tempérés à froids. Le double vitrage est désormais obligatoire dans toutes les nouvelles constructions ainsi que dans les rénovations, conformément aux réglementations d'isolation thermique en vigueur en Région wallonne et en Région flamande (Vitrage isolant

thermique et vitrage isolant acoustique, s.d.). Il offre une meilleure isolation acoustique et thermique et présente un bon rapport coût-efficacité : bien qu'il soit plus cher que le vitrage simple, il offre un bon équilibre entre coût et performance.

Le triple vitrage est idéal pour les bâtiments situés dans des climats très froids ou pour les maisons passives où l'efficacité énergétique maximale est recherchée. Il est utilisé dans les rénovations de haut niveau visant à atteindre des standards de haute performance énergétique. L'isolation thermique offerte par un triple vitrage est supérieure à celle d'un double vitrage. Le coefficient de transmission thermique U d'un triple vitrage standard (avec deux lames d'air) est de 1,9 W/m²K, mais peut atteindre 0,5 W/m²K pour les triples vitrages remplis de gaz isolants. Cependant, la présence du troisième verre réduit les gains solaires et la transmission lumineuse. L'inconvénient de ce type de vitrage réside souvent dans son coût initial, plus élevé que celui des autres types de vitrages. De plus, son poids et son épaisseur posent des problèmes, nécessitant parfois des cadres de fenêtre renforcés et des modifications structurelles (Vitrage isolant thermique et vitrage isolant acoustique, s.d.).

Technologies modernes et innovations dans le vitrage

La technologie a introduit un type de vitrage innovant appelé vitrage intelligent. Cette innovation permet à un vitrage de modifier ses propriétés physiques, telles que la transmission visible ou la transmission du spectre solaire, en réponse à un courant électrique ou à des changements dans les conditions environnementales (Baetens, 2010). Ce type de vitrage adaptatif a la particularité de limiter les apports solaires tout en favorisant l'entrée de lumière naturelle (Loonen, 2013). Les vitrages intelligents introduisent ainsi un nouveau paradigme où les composants des bâtiments ne sont plus statiques mais peuvent s'adapter dynamiquement aux besoins et aux conditions extérieures. L'intégration de ces nouveaux matériaux transforme radicalement la conception des bâtiments, répondant aux enjeux actuels d'efficacité énergétique et de confort.

De manière générale, on trouve quatre familles de vitrages intelligents :

- Les cristaux liquides
- Les particules suspendues
- Les vitrages thermotropes
- Les vitrages chromiques
-

Cependant, il faut noter que l'application de ce type de vitrage n'est pas encore très courante dans les logements. Ils sont principalement utilisés pour des bâtiments de grande envergure tels que les hôpitaux, les aéroports, les universités et les bureaux (SageGlass, s.d.).

2.2.3 Normes et réglementations concernant le vitrage dans la rénovation

Depuis 2017, les réglementations PEB concernant le vitrage se sont durcies. Le respect de ces normes vous permet de bénéficier de certaines aides financières, telles que les primes énergies ou rénovation. Les conditions d'obtention de ces primes varient en fonction de la région.

La réglementation PEB vise à améliorer la performance énergétique des bâtiments et le confort des occupants. Elle repose sur trois piliers principaux :

- La qualité de l'enveloppe, visant à réduire les pertes thermiques grâce à une isolation efficace.
- La qualité des systèmes et des auxiliaires, incluant l'eau chaude, l'éclairage et le chauffage.
- La qualité des énergies utilisées.

Bien que l'objectif de la réglementation PEB soit uniforme à travers la Belgique, son application varie selon les régions : Région wallonne, Flandre ou Bruxelles-Capitale (Performance énergétique des bâtiments, 2017).

Les normes PEB fixent les valeurs maximales de U et minimales de R (résistance thermique) pour les vitrages extérieurs d'une maison. La valeur U indique combien de watts (W) traversent un mètre carré (m^2) de vitrage par degré Kelvin (K), montrant la quantité de chaleur qui s'échappe par la vitre. La valeur U_w totale comprend la valeur U_f (châssis) et U_g (verre). Le matériau du châssis influence la performance thermique : PVC ($1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$), aluminium ($2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$) ou bois ($2 \text{ W/m}^2\text{K}$). Les normes NBN EN 673, 674 et 675 définissent la valeur U_g .

L'utilisation du simple vitrage est interdite pour les ouvertures extérieures en raison de sa haute valeur U ($5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$), mais il est encore permis pour la décoration intérieure. Le double vitrage a une valeur U de $2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, obligatoire en Flandre mais insuffisante pour respecter les normes actuelles. Le vitrage à haut rendement (HR), contenant du gaz krypton ou argon, offre une meilleure performance avec une valeur U de $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Le triple vitrage, avec une valeur U entre $0,8$ et $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, est encore plus efficace. La valeur U globale doit être égale ou inférieure à $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour les fenêtres extérieures.

Dans certains logements, il y a encore des fenêtres à simple vitrage. Si une rénovation complète n'est pas envisagée, le propriétaire peut choisir le survitrage comme solution temporaire pour réduire la valeur U de $5,8$ à 3 . Cependant, cette option n'est pas compatible avec tous les types de fenêtres (Elise, 2023).

2.2.4 Composant d'une fenêtre

La fenêtre, partie importante du bâtiment, doit assurer le confort des occupants et réduire la consommation d'énergie. Pour cela, elle doit remplir plusieurs fonctions :

- Laisser entrer la lumière naturelle
- Contrôler la chaleur du soleil en hiver et l'empêcher en été
- Offrir une isolation thermique et une ventilation
- Servir d'accès au bâtiment
- Protéger contre le vent et les intempéries
- Assurer une isolation contre le bruit
- Protéger contre les intrusions

Les composants d'une fenêtre

Chaque fenêtre est composée de deux parties principales : un cadre fixe appelé dormant et un cadre mobile appelé ouvrant. Entre ces cadres se trouve le vitrage, qui peut être simple, double ou triple. La partie en bois qui forme la structure de la fenêtre, appelée menuiserie, peut

représenter environ 20 % de la surface totale de la fenêtre. Comme on peut le voir dans la Figure 5, le châssis de la fenêtre, comprenant le dormant et l'ouvrant, peut être fabriqué en bois, en aluminium ou en PVC.

Ainsi, une ouverture, qui est fréquemment une fenêtre, est composée de divers éléments principaux, notamment le dormant, qui est la partie immobile du cadre fixée au mur, et l'ouvrant, qui est la partie mobile de l'ouverture contenant le vitrage et maintenue par son cadre. Les accessoires métalliques, tels que les systèmes de quincaillerie, permettent de maintenir l'ouvrant attaché au dormant et de fermer et verrouiller l'ouverture (Figure 7).

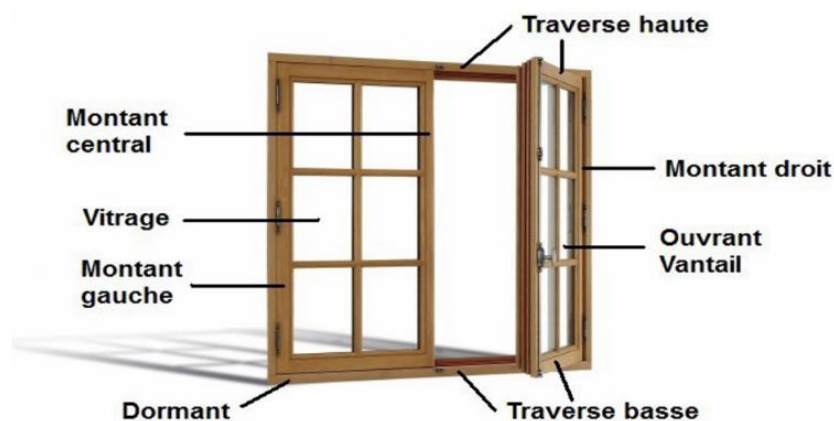


Figure 7 : Composant d'une fenêtre basique avec deux ouvrants. (Greffet, R, 2016)

Une fenêtre transmet de la chaleur à son environnement grâce à trois méthodes de transfert thermique. La Figure 11 montre ces transferts dans une fenêtre équipée d'un double vitrage, ainsi que les interactions avec l'environnement. Les trois méthodes de transfert thermique sont les suivantes :

- **La conduction** : elle se produit à travers le cadre de la fenêtre (en bois, en PVC ou en aluminium) et à travers le verre du vitrage.
- **La convection** : elle se produit à l'extérieur et à l'intérieur de la fenêtre, ainsi qu'entre les lames de gaz à l'intérieur de la fenêtre.
- **Le rayonnement** : il se produit à l'intérieur de la fenêtre entre les parois des chambres du cadre (PVC ou aluminium), ainsi qu'entre les verres du vitrage et entre les surfaces externes de la fenêtre et les surfaces environnantes (sol, murs, ciel, bâtiments...). Le verre est semi-transparent, ce qui signifie qu'il bloque le rayonnement de grande longueur d'onde (GLO) mais laisse passer en grande partie le rayonnement de courte longueur d'onde (CLO), dont les longueurs d'onde sont comprises entre 0,3 et 2,5 μm . Avec la demande croissante de performance énergétique, il est important de réduire ces transferts de chaleur et d'augmenter les apports solaires à travers la fenêtre. Nous examinerons dans la section suivante les principales techniques disponibles pour améliorer les performances thermiques des fenêtres.

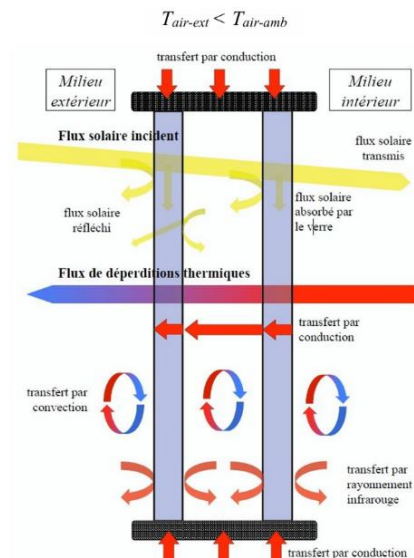


Figure 8 : Échanges thermiques à travers et au sein d'une fenêtre à double vitrage
(Greffet, R, 2016)

Le vitrage

Puisque le vitrage occupe environ les trois quarts de la surface d'une fenêtre, il est crucial que ce composant soit très efficace sur le plan thermique. Le vitrage permet à la lumière naturelle d'entrer dans le bâtiment, mais il doit également protéger contre les températures extrêmes pour maintenir un environnement confortable à l'intérieur, tout en étant économique.

À l'origine, les vitrages étaient simplement constitués d'un seul panneau de verre de 4 ou 6 mm d'épaisseur sans traitement spécifique. Pour répondre aux exigences croissantes d'efficacité énergétique des bâtiments, les fabricants de vitres ont développé des vitrages plus sophistiqués. Étant donné que le verre est un conducteur thermique relativement bon, on a amélioré sa résistance thermique en insérant de l'air (un bon isolant thermique) entre deux panneaux de verre pour former un double vitrage. Habituellement, l'épaisseur de l'espace d'air entre les deux panneaux de verre varie de 4 à 20 mm. Au-delà de 20 mm, l'augmentation de l'épaisseur de l'air n'améliore plus la résistance thermique du vitrage, car les mouvements de convection naturelle à l'intérieur de l'espace d'air entraînent des échanges thermiques accrus entre le panneau de verre intérieur et celui extérieur (Gan, 2001).

On observe également une orientation vers les constructions dites "intelligentes", capables de s'ajuster aux conditions environnementales et aux besoins des occupants. Des vitrages dits "intelligents" sont également envisageables, dont les propriétés optiques et thermiques peuvent changer en fonction des conditions extérieures. Parmi ceux-ci, on trouve les vitrages thermochromes, électrochromes ou photochromes ...

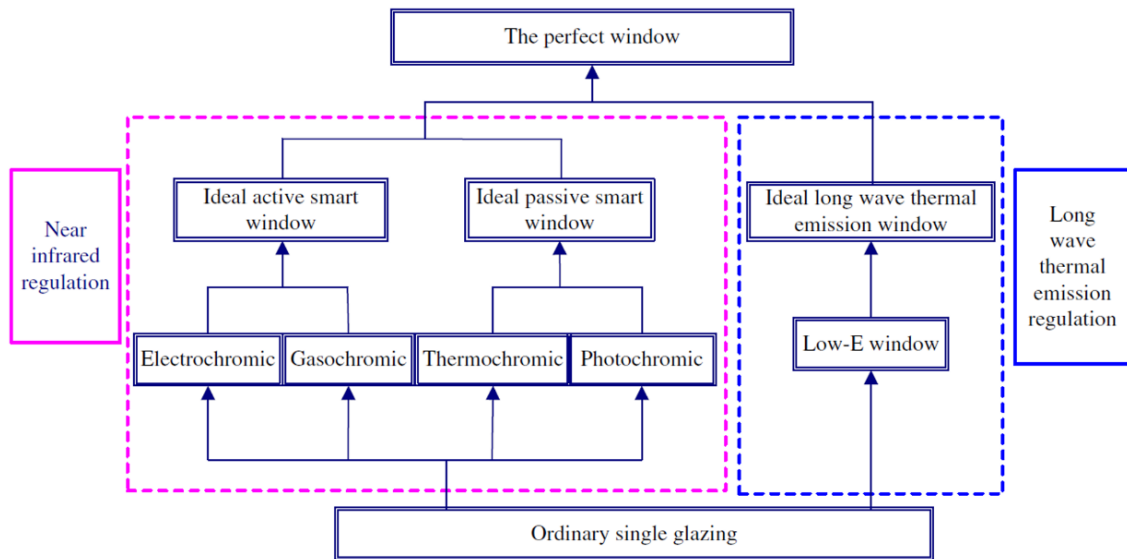


Figure 9 : Voies possibles de développement d'un simple vitrage.

(Ye, H, Meng, X, Long, L & Xu, B, 2013)

Grandeurs physiques caractéristiques d'une baie

Il y a deux mesures importantes pour décrire les propriétés thermiques et optiques d'une baie : le coefficient de transmission thermique, noté U_w , et le facteur solaire, noté S_w . Ces mesures, régies par des normes, facilitent la comparaison entre différentes baies ou éléments de baie (UFME, 2020).

Le coefficient de transmission thermique d'une fenêtre

Le coefficient de transmission thermique surfacique U , mesure la quantité de chaleur qui traverse un mètre carré de surface d'un élément de paroi pour chaque degré Celsius de différence de température. Il est exprimé en $W/m^2 \cdot K$. Pour les fenêtres, ce coefficient est noté U_w , où "w" signifie "Windows", et il est défini selon la norme.

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_p U_p + A_f U_f + l_g \psi_g + l_p \psi_p}{A_g + A_p + A_f}$$

Comme l'équation le montre, les lettres A désignent les surfaces des différents composants de la fenêtre. L'indice "g" représente le vitrage ("glass"), "p" la partie opaque de la fenêtre ("panel") et "f" la menuiserie ("frame"). Les valeurs l_g et l_p correspondent aux longueurs visibles du vitrage et du panneau opaque, tandis que les coefficients ψ_g et ψ_p représentent la transmission thermique linéique de l'intercalaire entourant respectivement le vitrage et le panneau opaque.

Facteur solaire

Le facteur solaire S d'un composant de la fenêtre représente le rapport entre la somme des flux de chaleur directement transmis et réémis par cet élément à l'intérieur du bâtiment et le flux de chaleur solaire incident sur cet élément. Il s'agit d'une valeur sans unité, variant entre 0 et 1, et est exprimée par :

$$S = \frac{\varphi_{transmis} + \varphi_{abs-int}}{\varphi_{sol}}$$

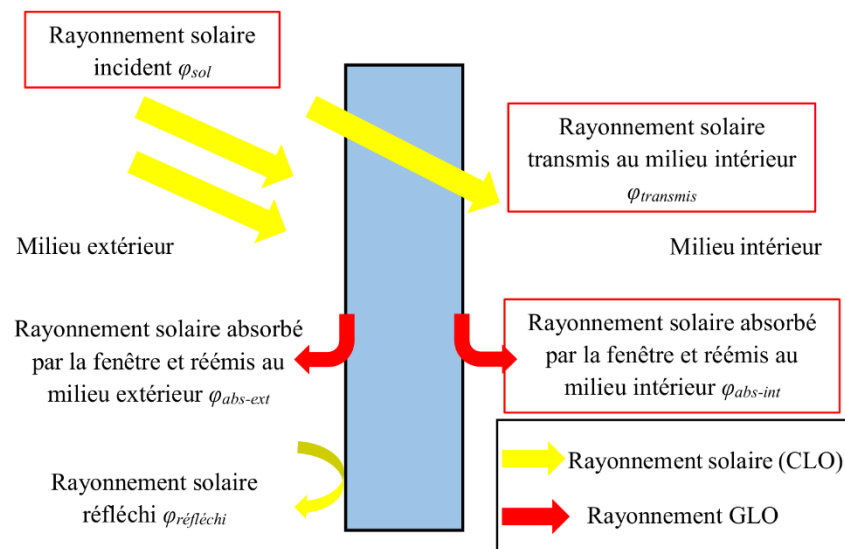


Figure 10 : transmission thermique d'un simple vitrage (Greffet, R, 2016)

2.2.5 Evaluation du cycle de vie et l'impact environnementale des vitrages

Le verre, étant un matériau 100 % recyclable, permet de démonter et de séparer les vitrages de leur châssis, qu'ils soient en aluminium, PVC, bois ou mixte. Comme le montre la Figure-11 les vitrages peuvent ensuite être pris en charge par les filières de collecte et de tri, en cours de mise en place, pour recycler le verre en fin de vie.

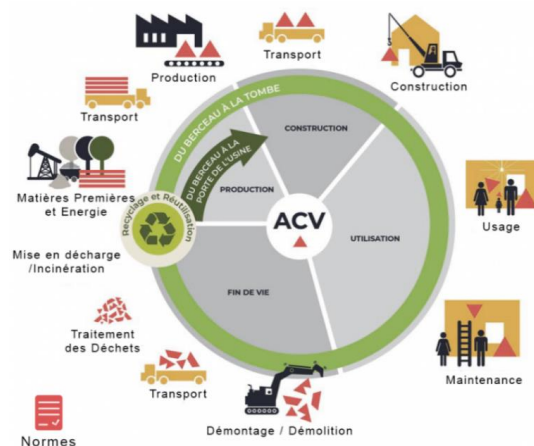


Figure 11 : Cycle de vie d'un produit (Energie plus , s.d.)

Dans une recherche générale la durée de vie des fenêtres peut atteindre 20 ans ou plus. Le tableau ci-dessous reprends le type de fenêtre et leur duré de vie. (Habitat, 2020)

Type de fenêtre	Durée de vie approximative
Fenêtre bois	De 20 à 50 ans
Fenêtre PVC	Jusqu'à 35 ans
Fenêtre Alu	De 25 à 35 ans
Fenêtre bois/alu	Jusqu'à 50 ans

Tableau 2 : durée de vie des fenêtres (Habitat, 2020)

Dans cette page, nous proposons une comparaison des impacts environnementaux des parois reprises dans la bibliothèque de TOTEM durant l'été 2023, afin d'identifier de bonnes pratiques en termes de choix constructifs.

Une comparaison entre les performances environnementales en millipoints par unité fonctionnelle (mPT/uf) et la valeur U (W/m^2K) des vitrages révèle plusieurs points importants. Tout d'abord, on remarque que certaines fenêtres ne respectent pas la valeur obligatoire $U = 1,5 W/m^2K$. Ensuite, les fenêtres avec châssis en bois présentent le meilleur score environnemental, que ce soit en simple ou en triple vitrage, suivies par le bois-alu, puis le PVC.

En outre, le passage au triple vitrage améliore systématiquement le score environnemental global pour le même matériau de châssis. Cependant, l'amélioration est moins significative que celle obtenue en changeant le matériau du châssis. Par exemple, passer d'un châssis en aluminium avec double vitrage à un aluminium avec triple vitrage améliore le score d'environ dix millipoints, tandis que passer à un châssis en bois avec double vitrage permet de gagner près de vingt millipoints. (Impacts environnementaux, s.d.).

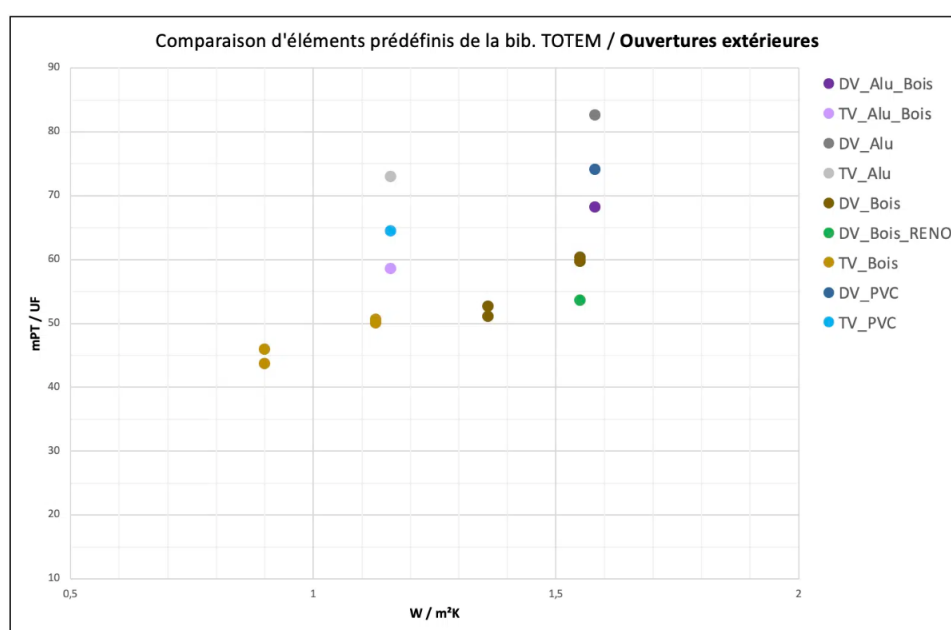


Figure 12 : Comparaison d'éléments : les fenêtres prédéfinies de la bibliothèque TOTE (Impacts environnementaux, s.d.)

Selon Dr. Jean Souviron, dans sa thèse de doctorat sur l'analyse du cycle de vie des vitrages, on observe une complexification des technologies de vitrage au cours des dernières décennies (passage du simple au double, puis au triple vitrage, ajout de couches à faible émissivité, remplissages gazeux, etc.). Il s'interroge sur le bilan environnemental de ces vitrages dans un scénario de rénovation énergétique. Les bénéfices de ces technologies lors de l'utilisation du bâtiment surpassent-ils le coût environnemental lié à une production plus complexe ?

Selon Dr. Jean Souviron dans sa thèse de doctorat, (Souviron, 2022) le meilleur vitrage est celui qu'on évite de produire. Avant de se demander quel vitrage utiliser pour remplacer ceux en fin de vie, il est essentiel de réfléchir à la nécessité même de ces vitrages, dans le but de réduire globalement les quantités de matériaux utilisés. Il se concentre notamment sur la rénovation des murs rideaux, où la quantité de verre peut effectivement être remise en question.

L'impact environnemental des vitrages est fortement affecté par la difficulté à recycler les produits actuels, principalement en raison des défis liés à la séparation des composants des vitrages complexes. Concernant la valeur ajoutée des vitrages "complexes", il souligne la grande incertitude entourant les analyses de cycle de vie actuelles. Cette incertitude est due au contexte climatique changeant, à la transition des sources énergétiques, à la diversité des hypothèses d'utilisation et des gains internes, aux systèmes HVAC, et potentiellement à une remise en question des conditions intérieures à maintenir dans les bâtiments à l'avenir.

Ses résultats montrent que la consommation énergétique globale est similaire pour les simples, doubles et triples vitrages, suggérant que la réduction d'impact pourrait ne pas dépendre du choix de la technologie. (Impacts environnementaux, s.d.)

2.2.6 Fenêtre pariétodynamique

Pendant de nombreuses décennies, la fenêtre pariétodynamique a fait l'objet d'investigations, proposée comme une réponse à une problématique cruciale : la réduction des pertes thermiques à travers les fenêtres et la ventilation. Il est important de souligner que, dans une maison peu isolée, les fenêtres et la ventilation représentent un point significatif de déperdition thermique à travers l'enveloppe, constituant ainsi le principal poste de déperdition d'une maison passive.

Premières approches

La première conception d'un "élément pariétodynamique" remonte à 1881, avec un brevet déposé par Morse aux États-Unis. Ce dispositif, intégré à la façade d'un bâtiment, visait à assurer la ventilation (Figure 13-a). L'air pouvait circuler de l'intérieur vers l'extérieur ou vice versa, contribuant exclusivement au réchauffement de l'air intérieur. En 1938, Fisk fusionne le principe de l'élément pariétodynamique avec celui d'une fenêtre, donnant ainsi naissance au concept de fenêtre pariétodynamique. Cette fenêtre, composée de trois verres et de deux lames d'air connectées (Figure 13-b), était présentée comme une "fenêtre antibruit avec ventilation".

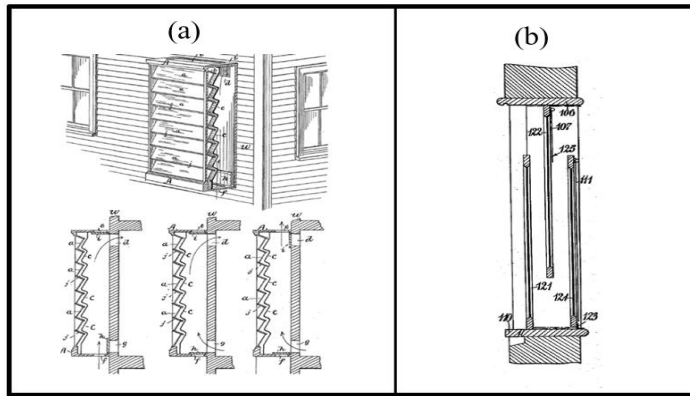


Figure 13 : Schémas de systèmes pariétodynamiques ayant fait l'objet de dépôts de brevets.
(Fisk Brevet, 1938)

Le concept introduit par Fisk a été réexaminé par Powel en 1962, présentant un système conçu pour assurer la ventilation d'un bâtiment tout en prévenant la condensation ou la formation de givre (Figure 14-a). White a déposé un brevet pour un panneau de façade composé de deux vitres en verre séparées par une lame d'air ventilée. Ce panneau peut pivoter en position été (Figure 14-b, à droite) ou en position hiver (Figure 14-b, à gauche) en fonction de la saison. En été, la circulation de l'air permet de dissiper la chaleur du panneau vers l'extérieur, tandis qu'en hiver, l'air circulant se réchauffe grâce au rayonnement solaire avant d'être réintroduit dans le bâtiment (W.S. White, 1975).

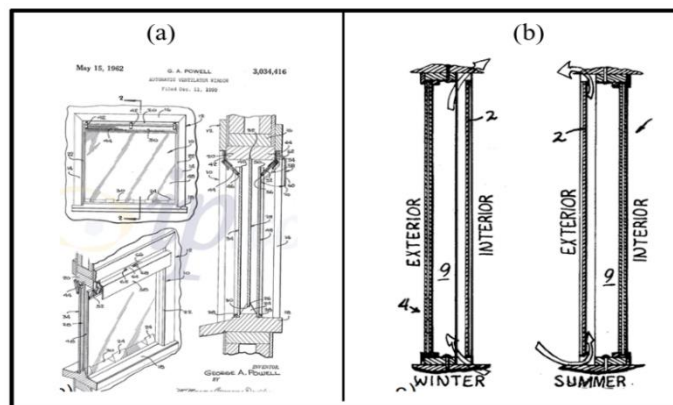


Figure 14 : Schémas de systèmes pariétodynamiques ayant fait l'objet de dépôts de brevets.
(W.S. WHITE, 1975)

Modes de fonctionnement

Le concept des fenêtres pariétodynamiques repose sur la circulation de l'air entre leurs vitres. Selon le mode de fonctionnement souhaité (rafraîchissement en été ou chauffage en hiver), l'air circule du côté extérieur vers l'intérieur ou inversement. Pendant sa circulation entre les vitres de la fenêtre, l'air récupère à la fois une partie des pertes thermiques à travers la fenêtre et une partie de l'énergie solaire absorbée par les vitres (J.S. Carlos, 2012). Plusieurs configurations de fenêtres pariétodynamiques (Carlos, 2011) peuvent être identifiées, et on peut distinguer cinq modes de fonctionnement des fenêtres pariétodynamiques, comme illustré par la Figure 15.

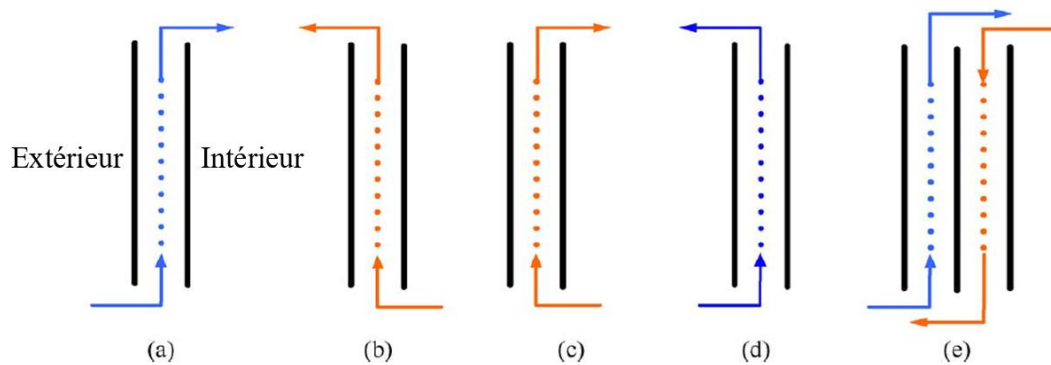


Figure 15 : Principaux modes de fonctionnement des fenêtres pariétodynamiques :
(a) insufflation (b) extraction (c) rideau d'air intérieur (d) rideau d'air extérieur (e) double flux (Wei, 2010)

Les fenêtres pariétodynamiques offrent plusieurs modes de fonctionnement distincts.

Le mode (a), par insufflation, est utilisé pour réduire les pertes thermiques du bâtiment pendant la saison de chauffage (Baker, 2000). Ce mode permet de récupérer une partie des pertes thermiques intérieures grâce à l'air de renouvellement circulant à travers un double vitrage, préchauffant ainsi l'air neuf de ventilation avant son introduction dans le bâtiment (Appelfeld, 2011).

En revanche, le mode (b), par extraction, agit en sens inverse du mode (a) : il extrait l'air vicié du logement, refroidissant le vitrage pendant la saison chaude afin de réduire les apports de chaleur extérieurs. Les modes (c) et (d), représentant respectivement les rideaux d'air intérieur et extérieur, n'assurent pas le renouvellement d'air car il n'y a pas de flux entre l'intérieur et l'extérieur (Gosselin, 2008).

Le mode (c) vise à réduire les pertes thermiques, tandis que le mode (d) cherche à diminuer les apports de chaleur extérieurs. Quant au mode (e), il est similaire au fonctionnement d'une VMC double flux, où la fenêtre agit comme un échangeur thermique. Il est possible d'inverser la circulation de l'air dans le vitrage pour un fonctionnement plus adapté en été, où l'air extrait de la pièce sert à rafraîchir l'air neuf entrant (Wei, 2010).

Les fenêtres pariétodynamiques se présentent ainsi sous différentes formes, la configuration la plus étudiée (Southall, 2006) étant composée d'un double vitrage côté intérieur et d'un simple vitrage côté extérieur, entre lesquels circule l'air neuf (Figure 16). Une autre configuration, objet de cette étude, sera présentée ultérieurement.

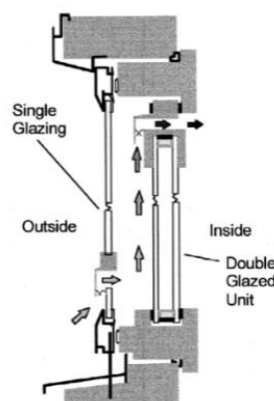


Figure 16 : Fenêtre pariétodynamique constituée d'un double vitrage du côté intérieur et d'un simple vitrage du côté extérieur. (W.S. WHITE, 1975)

Coefficient de transmission thermique surfacique

Le facteur de transfert thermique d'une fenêtre standard est déterminé de la manière suivante :

$$U_w = \frac{\Phi_{int}}{A_w(T_{air-amb} - T_{air-ext})} = \frac{\Phi_{ext}}{A_w(T_{air-amb} - T_{air-ext})}$$

Dans cette équation, Φ_{int} représente le flux de chaleur à l'intérieur de la fenêtre, tandis que Φ_{ext} correspond au flux de chaleur à l'extérieur. A_w désigne la surface totale de la fenêtre, et $T_{air-ext}$ et $T_{air-amb}$ indiquent respectivement les températures de l'air extérieur et ambiant. Pour que les fenêtres parietodynamiques conservent le principe de la circulation de l'air, leur coefficient de transmission thermique se calcule par le coefficient "équivalent", noté $U_{w,eq}$, eq (Wright, J. L., 1986).

Au niveau de la face intérieure du vitrage

$$U_{w,eq} = \frac{\Phi_{ext}}{A_w(T_{air-amb} - T_{air-ext})}$$

Au niveau de la face intérieure du vitrage

$$U_{w,eq} = \frac{\Phi_{int} - \Phi_{éch}}{A_w(T_{air-amb} - T_{air-ext})}$$

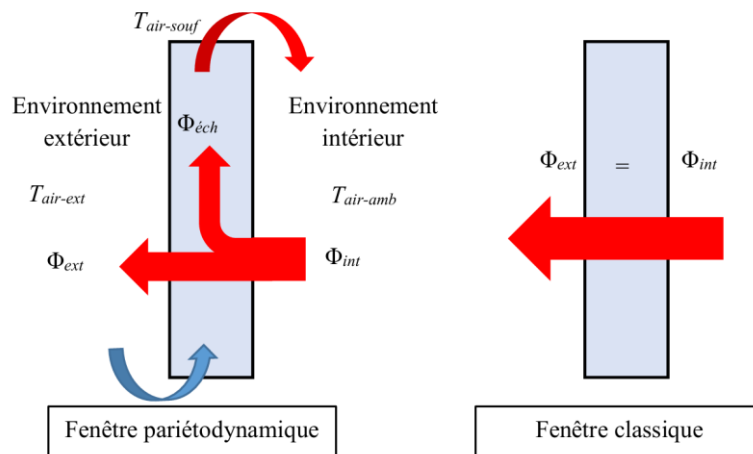


Figure 17 : Comparaison des bilans thermiques entre une fenêtre classique et une fenêtre parietodynamique (Greffet, R, 2016)

Facteur solaire

Les fenêtres dynamiques optimisent l'utilisation des rayons solaires par rapport aux fenêtres traditionnelles. Pour les fenêtres classiques, les gains solaires incluent le rayonnement directement transmis à l'intérieur et celui absorbé par les vitrages, puis réémis dans la pièce (Wright, J. L., 1986). En revanche, pour les fenêtres dynamiques, l'énergie captée par les vitres et récupérée par l'air circulant entre elles constitue un apport significatif supplémentaire aux gains solaires. Ainsi, les gains solaires de ces fenêtres sont la somme des apports classiques et des

contributions supplémentaires dues à la circulation d'air (D., V. D., 2002). Le calcul du facteur solaire repose sur la mesure des flux de chaleur entrants lorsqu'il n'y a pas de différence de température entre l'intérieur et l'extérieur (Protection thermique, s.d.). Le facteur solaire Sw des fenêtres parietodynamiques comprend donc trois composantes.

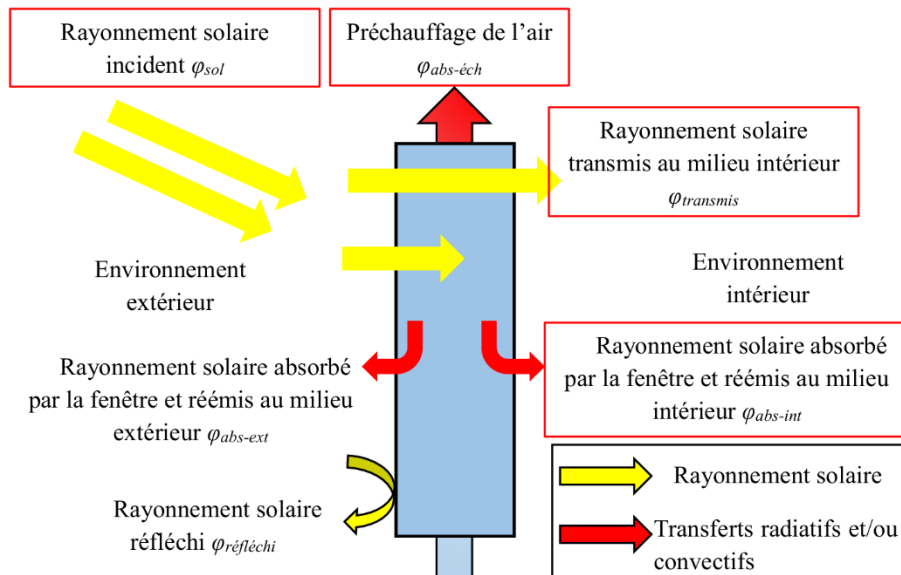


Figure 18 : Densités de flux radiatifs pris en compte dans le calcul du facteur solaire d'une fenêtre ventilée (Greffet, R, 2016)

Principaux paramètres conditionnant les performances d'une fenêtre parietodynamique

Les études initiales sur les fenêtres parietodynamiques, menées par Korkala (Siitonen, 2014) et Boehm (Energy Technologies Area Publications, s.d.), indiquent que ce système est généralement efficace pour les logements individuels. Il permet de réduire la consommation d'énergie pour le chauffage des maisons en préchauffant l'air, sans compromettre le confort thermique. Plusieurs recherches ont identifié les facteurs influençant les performances de ces fenêtres, notamment le débit d'air, la surface vitrée, la différence de température intérieur-extérieur, le rayonnement solaire, et le type de vitrage.

Le débit d'air

Le flux d'air est l'un des éléments clés affectant l'efficacité d'une fenêtre ventilée (Carlos, 2013). Une accélération de la circulation de l'air dans l'espace entre les vitres entraîne une augmentation du transfert de chaleur récupéré par l'air, réduisant ainsi les pertes thermiques entre la fenêtre et l'extérieur.

La surface du vitrage

Pour un débit d'air constant, une augmentation de la surface vitrée de la fenêtre (en hauteur ou en largeur) prolonge le temps pendant lequel l'air circule dans l'espace interne, augmentant ainsi la période durant laquelle l'air est chauffé (Southall, 2006).

Le rayonnement solaire

Concernant l'effet du rayonnement solaire, les recherches menées par John et ses collègues (Wright, J. L., 1986), ainsi que d'autres chercheurs, montrent que les apports solaires ne diminuent pas avec une augmentation du flux d'air. Au contraire, la valorisation des apports solaires augmente considérablement avec l'augmentation du flux d'air. De plus, plus l'intensité du rayonnement solaire est élevée, plus la température de l'air soufflé par la fenêtre est importante. Il convient de noter que, comme pour une fenêtre classique, l'orientation optimale d'une fenêtre ventilée est vers le sud (National Research Council Canada, 2024).

La différence de température intérieure / extérieure

L'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur influence de manière significative l'efficacité des fenêtres parietodynamiques. Selon Carlos et ses collaborateurs, plus cet écart de température est important, plus les performances de la fenêtre s'améliorent.

2.2.7 Confort thermique lié au vitrage

Le confort thermique peut être défini comme un état de satisfaction par rapport à l'ambiance thermique (« Thermal Comfort is that condition of mind that expresses satisfaction with the thermal environment ») (Le Vecteur Air, s.d.). Oseland a montré qu'un même individu, soumis à des conditions climatiques identiques mais dans des lieux différents (chez lui, à son bureau ou dans une chambre climatique), ne ressentait pas la même sensation thermique. Dans cette section, nous présenterons les indices et modèles d'évaluation du confort thermique, les facteurs influençant ce confort, ainsi que les inconforts locaux (ASHRAE, s.d.).

Il est difficile de définir des conditions optimales de confort thermique, car celui-ci correspond à un équilibre thermique entre le corps humain et les conditions ambiantes, et la satisfaction physiologique et psychologique varie d'une personne à l'autre. La Figure 19 illustre le bilan des échanges d'un individu avec son environnement.

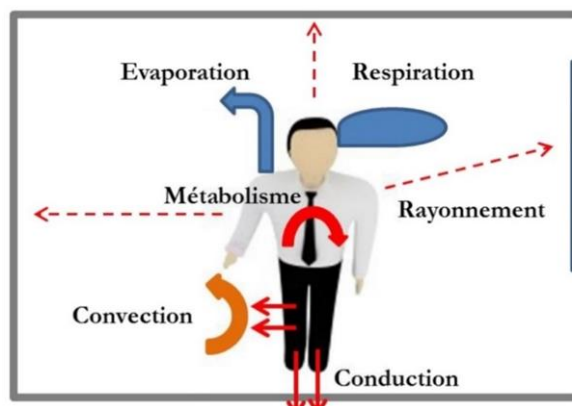


Figure 19 : Bilan thermique d'un individu avec son environnement (le vecteur air, s.d.)

La charge thermique (CT) est un indice qui exprime l'état thermique du corps. Lorsque CT est nul, le corps est en équilibre thermique. Une valeur négative de CT indique une baisse de la température corporelle, tandis qu'une valeur positive traduit une hausse de la température corporelle. M correspond au métabolisme, W au travail physique (activité) de la personne, R au flux échangé par rayonnement, C au flux échangé par convection, et K au flux échangé par conduction. Evap représente le flux perdu par évaporation, dû à la fois à la diffusion de la vapeur à travers la peau et à l'évaporation résultant de la transpiration à la surface de la peau. Enfin, Resp désigne le flux perdu par la respiration. L'évaluation du confort thermique nécessite de prendre en compte divers facteurs, tels que le métabolisme, l'habillement, les températures et la vitesse de l'air, la température radiante moyenne de l'environnement, ainsi que l'humidité relative (Fanger, 1970). Ces sept facteurs principaux affectant directement le confort thermique peuvent être regroupés en deux catégories : les caractéristiques des occupants et les conditions thermiques de l'environnement (Confort thermique, s.d.).

- Les caractéristiques des occupants concernent le métabolisme et l'habillement.
- Les conditions de l'environnement thermique incluent des facteurs tels que la température de l'air sec, la vitesse de l'air, l'humidité relative, la température radiante moyenne et la température opérative.

Pour mieux comprendre ce concept, les conditions environnementales sont expliquées en détail ci-dessous.

La température de l'air sec

Il s'agit de la température moyenne de l'air sec entourant l'occupant. Selon l'ASHRAE, cette valeur doit être calculée en prenant la moyenne spatiale des mesures effectuées à trois niveaux différents : au niveau des chevilles, de la taille et de la tête, pour un occupant en position assise ou debout. La moyenne temporelle, quant à elle, doit être déterminée à partir d'au moins 18 points de mesure effectués à des intervalles de trois minutes.

La vitesse de l'air

D'après l'ASHRAE, la vitesse de l'air correspond à la moyenne de la vitesse omnidirectionnelle de l'air à laquelle le corps est exposé. Cette moyenne temporelle est déterminée de manière similaire à celle utilisée pour la température de l'air (ASHRAE, s.d.).

L'humidité relative

Un taux d'humidité relative (HR) compris entre 30 % et 65 % a peu d'impact sur le confort thermique, bien que des valeurs extrêmes (très basses ou très élevées) puissent causer de l'inconfort. Une humidité relative basse peut intensifier la transpiration, entraînant une sensation de refroidissement physiologique et un dessèchement des muqueuses et de la peau. À l'inverse, une humidité élevée freine la transpiration cutanée, ce qui réduit la dissipation de la chaleur à la surface de la peau (Confort thermique, s.d.).

La température radiante moyenne

La température radiante correspond à la chaleur échangée par rayonnement entre le corps et son environnement. Elle est influencée par les températures et les émissivités des surfaces environnantes, ainsi que par le facteur de forme entre le corps et ces surfaces.

La norme ISO-7726 propose plusieurs méthodes pour déterminer cette température. L'une d'elles consiste à utiliser un thermomètre à globe noir, qui est une sphère noire de 150 mm de diamètre en général, avec un capteur de température au centre. Les échanges thermiques par rayonnement et convection à la surface du globe sont comparables à ceux du corps humain. Toutefois, lorsque la vitesse de l'air est faible, les échanges convectifs avec le globe sont négligeables, et une réduction du diamètre du globe a peu d'effet sur les mesures (Ambiances, 2012).

La température opérative

La température opérative (T_{op}) est définie comme la température d'un espace virtuel thermiquement homogène dans lequel une personne échange le même niveau de chaleur par rayonnement et convection que dans l'espace réel, non uniforme. Cette température tient compte des effets combinés de la convection et du rayonnement, pondérés par leurs coefficients d'échange respectifs, et se calcule de la manière suivante :

$$T_{op} = \frac{hc T_{air} + hr T_r}{hc + hr}$$

Où hc et hr sont respectivement les coefficients d'échanges convectif et radiatif.

(Température opérative, 2023)

Confort d'été

Une fois que les pertes par transmission de l'enveloppe P_e [W/K] et les pertes par ventilation P_v [W/K] sont déterminées, on connaît la puissance de chaleur totale P_b à fournir au bâtiment pour le réchauffer d'un degré : $P_b = P_e + P_v$ [W/K]. Son ordre de grandeur est de quelques centaines de watts par degré d'écart entre les températures intérieure et extérieure. Le système de chauffage du bâtiment est soulagé grâce aux apports de chaleur fournis par l'occupation (apports internes) et par le rayonnement solaire au travers des parois vitrées (apports solaires). En effet, on considère que l'utilisation de l'éclairage artificiel, de l'eau chaude sanitaire et des appareils électroménagers ajoute une quantité de chaleur de l'ordre de 600 W, ce qui réchauffe le bâtiment de quelques degrés (= 600/ P_b degrés). Ces "apports" finissent par se transformer en chaleur (incontrôlée) au sein du bâtiment (Confort thermique, s.d.).

Le flux solaire traversant les surfaces vitrées est d'environ 50 W/m² pour une fenêtre verticale orientée au nord, et presque 150 W/m² pour une fenêtre orientée plein sud (valeurs moyennes à Uccle, au mois de mars). Même non occupée et non chauffée, une maison d'habitation peut atteindre une température intérieure supérieure à la température extérieure (Confort thermique, s.d.).

Maximiser les apports "gratuits" en hiver

Lorsque les températures extérieures sont froides, tout apport de chaleur est bienvenu, d'où l'intérêt de prévoir de larges surfaces vitrées dans les façades orientées favorablement (côté sud : sud-est à sud-ouest). De plus, une répartition judicieuse des locaux à l'intérieur du volume protégé permet d'organiser une thermocirculation de l'air : l'air circule entre les zones exposées au rayonnement solaire et les zones non exposées, permettant aux locaux moins favorablement orientés de bénéficier des apports solaires reçus par les locaux mieux situés (Confort thermique, s.d.).

Se protéger des surchauffes en été

Pendant les mois où la température extérieure plus clémente se combine avec un ensoleillement généreux, il est parfois nécessaire de se protéger d'un réchauffement excessif du bâtiment. Plusieurs moyens peuvent être envisagés : la mise en place de protections solaires mobiles (auvents, volets...), le refroidissement nocturne par sur-ventilation pendant une partie de la nuit, ou encore la mobilisation de l'inertie thermique apportée par la masse intérieure de l'habitation (voir page suivante). Si chacun de ces moyens peut parfois suffire à lui seul, il sera peut-être nécessaire de les combiner pour éviter efficacement tout risque de surchauffe en été (Confort thermique, s.d.).

L'inertie thermique

Selon la disposition de l'isolation thermique au sein des parois, la masse accessible depuis l'ambiance pour stocker les apports solaires et internes peut être très forte ou très faible :

- Inertie forte : L'isolation thermique est placée extérieurement par rapport à la masse de maçonnerie. Cette masse importante est ainsi thermiquement accessible depuis l'ambiance intérieure.
- Inertie faible : L'isolation thermique est placée intérieurement à la maçonnerie, empêchant ainsi l'accès à la masse depuis l'ambiance intérieure. Toutefois, des planchers lourds ou des parois intérieures lourdes peuvent compenser la faible inertie des murs extérieurs.
-

Comportement de la température en hiver et en été :

Une forte inertie est préférable lorsque l'habitation est occupée (et chauffée) de façon continue. En hiver et en mi-saison, lors d'une journée bien ensoleillée, une forte inertie permet d'emmagasiner les apports solaires et de retarder le pic de température intérieure à une période de la journée où la température extérieure est encore plus froide. Une faible inertie, en revanche, n'amortit que très peu le pic de température intérieure, qu'elle ne retarde que de quelques heures (La Maison Passive, s.d.).

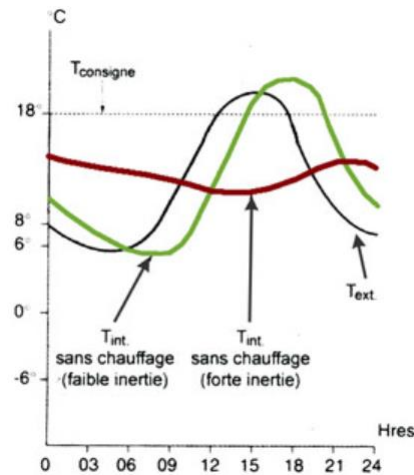


Figure 20 : Journée ensoleillée d'hiver. (LA MAISON PASSIVE, s.d.)

En été, la température extérieure élevée fait en sorte que les apports de chaleur reçus pendant la journée conduisent à une surchauffe intérieure indésirable. Une forte inertie permet de stocker la chaleur reçue en journée pour la restituer pendant la nuit, lorsque la température extérieure a baissé. La ventilation nocturne aide à accélérer la dissipation de cette chaleur et à refroidir les parois qui l'ont stockée durant la journée. Le bâtiment exploite ainsi au mieux les apports gratuits. À l'inverse, une faible inertie permet de chauffer très rapidement l'ambiance intérieure d'un bâtiment occupé de manière intermittente. Toutefois, elle ne permet pas de retarder l'impact des apports de chaleur reçus au cours de la journée, ce qui peut entraîner des surchauffes importantes, rendant l'occupation du bâtiment très inconfortable (La Maison Passive, s.d.).

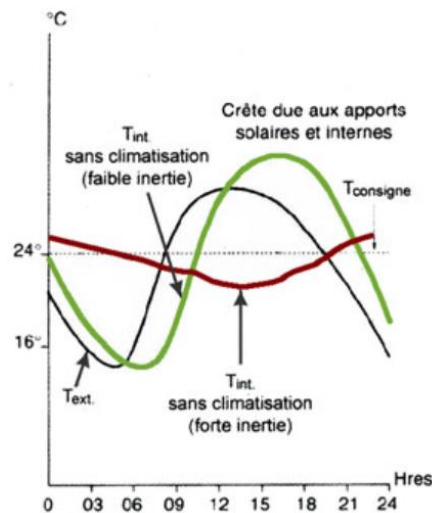


Figure 21 : Journée ensoleillée d'été. (LA MAISON PASSIVE, s.d.)

2.3 ETUDE SIMILAIRE SUR LE VITRAGE

Avant de concevoir une méthodologie précise et appropriée, il est essentiel d'examiner les études analogues à celle-ci. Ces études peuvent porter sur des sujets similaires ou adopter des approches méthodologiques comparables. Cette section vise à répertorier, de manière non exhaustive, des recherches centrées sur l'analyse des impacts liés à la rénovation énergétique des logements, notamment par l'utilisation de la technologie du vitrage.

2.3.1 Etude globale

En Belgique, et précisément à Liège, les logements collectifs d'après-guerre ont besoin d'une rénovation. Mais avant tout, il est nécessaire de connaître toutes les problématiques empêchant la rénovation de ces immeubles. Plusieurs solutions techniques existent pour rénover énergétiquement un logement. Le CERAA (CERAA, s.d.) a réalisé une étude portant sur l'analyse des logements existants et la question de l'amélioration de leurs performances thermiques à travers l'application des principes de la maison passive. L'analyse a été réalisée sur un échantillon de 9 types bâtis, choisis en fonction de leur représentativité sur le territoire de la Région de Bruxelles-Capitale. Afin de diminuer la consommation énergétique du chauffage de chaque type, une série de solutions, affectant l'architecture, ont été apportées. On peut donc citer l'isolation thermique et l'étanchéité à l'air, ayant un impact sur l'enveloppe du volume chauffé, l'isolation des toitures, murs, planchers, et le remplacement des châssis.

En termes de confort et de qualité de vie des occupants, l'isolation acoustique joue un rôle crucial dans les bâtiments de logements collectifs, en raison de la présence importante de nuisances sonores (Trachte, 2010). Cependant, de nombreux obstacles freinent la rénovation des immeubles collectifs d'après-guerre. En effet, les possibilités de réhabilitation sont limitées par l'obligation d'effectuer les travaux de rénovation lorsque les appartements sont occupés, et ce, sur une durée assez courte sans impacter de trop l'intérieur des logements (MOLEY, 2017). Néanmoins, si les habitations ne peuvent pas être utilisées confortablement, la nécessité de reloger les occupants s'impose. De plus, l'ajout d'un tout petit peu d'isolant peut vite faire apparaître une série de difficultés. Certaines pièces sont tellement difficiles à isoler qu'il est impossible de les rendre étanches. Elles sont considérées comme des espaces tampons hors de l'enveloppe chauffée. En outre, il arrive également que les hauteurs sous plafond posent des problèmes dans l'isolation des planchers (MOLEY, 2017).

Afin de résoudre le problème de surchauffe et l'isolation thermique par les fenêtres et les ouvertures des logements, d'autres experts, notamment des architectes, proposent des solutions qui ne sont pas directement liées au vitrage.

Lacaton et Vassal, un duo d'architectes français renommé pour leur approche innovante et durable, utilisent le vitrage de manière stratégique pour maximiser l'efficacité énergétique et améliorer le confort des occupants dans leurs projets. Leur méthode repose sur plusieurs

principes clés : ils privilégient les grandes surfaces vitrées pour augmenter l'apport de lumière naturelle, réduisant ainsi la dépendance à l'éclairage artificiel et générant des économies d'énergie significatives. Ils conçoivent des espaces flexibles et adaptables en utilisant souvent des façades vitrées mobiles ou des systèmes de vitrage modulaires, permettant de reconfigurer les espaces selon les besoins des utilisateurs. Les architectes intègrent des vitrages à haute performance thermique, tels que des vitrages à faible émissivité (low-E) et des vitrages doubles ou triples, pour réduire les pertes de chaleur en hiver et limiter les gains de chaleur en été, améliorant ainsi l'efficacité énergétique globale des bâtiments. En combinant le vitrage avec des systèmes de ventilation naturelle, Lacaton et Vassal créent des bâtiments naturellement ventilés, réduisant la nécessité de climatisation mécanique et améliorant la qualité de l'air intérieur. Ils cherchent à effacer les frontières entre l'intérieur et l'extérieur, utilisant le vitrage pour créer une continuité visuelle et spatiale, renforçant le lien des occupants avec l'environnement extérieur et améliorant leur bien-être. Dans certains projets, ils utilisent des vitrages recyclés ou récupérés, alignant leur pratique avec des principes de durabilité et de réemploi des matériaux, réduisant ainsi l'empreinte carbone de leurs constructions. Les vitrages performants maximisent le confort thermique et visuel des occupants. Les grandes baies vitrées offrent des vues dégagées et un apport de lumière naturelle tout en maintenant un confort thermique optimal grâce aux technologies avancées de vitrage (Lacaton & Vassal, 2007).

Un exemple emblématique est leur projet de transformation de la Tour Bois-le-Prêtre à Paris, où ils ont ajouté des extensions vitrées aux façades existantes, créant des espaces lumineux et thermiquement performants, tout en augmentant la surface habitable sans démolition massive. En résumé, Lacaton et Vassal utilisent le vitrage de manière stratégique pour maximiser l'apport de lumière naturelle, améliorer l'efficacité énergétique, créer des espaces flexibles et adaptables, et renforcer la relation entre l'intérieur et l'extérieur, tout en mettant l'accent sur le confort des occupants et la durabilité (Beaumont & Beaumont, 2024). Cette démarche architecturale est énoncée dans leur étude PLUS (Lacaton & Vassal, 2007) et appliquée dans de nombreux projets de rénovation. En effet, les structures existantes sont gardées intactes et les balcons sont ajoutés aux façades, ce qui pourrait être encore possible à réaliser dans presque tout type de l'immeuble de logement à Liège.



*Figure 22 : Situation avant et après la transformation de la Tour Bois-le-Prêtre avant
réhabilitation (Lacaton & Vassal , 2007)*

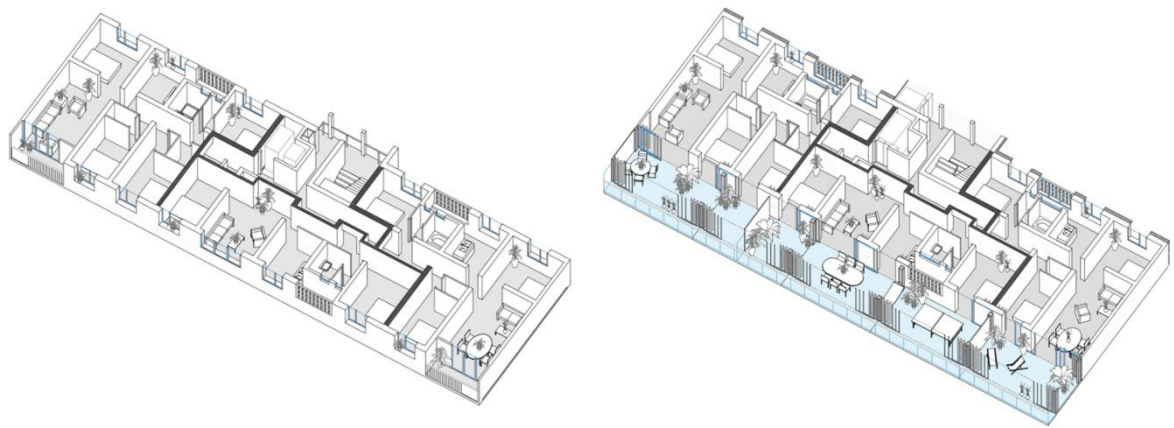


Figure 23 : La méthodologie utilisé dans le cas de la transformation des logements en 3D
(Lacaton & Vassal , 2007)

Plusieurs autres études ont été réalisées pour identifier les caractéristiques des vitrages et améliorer leur emploi. Magali Bodart, dans sa thèse intitulée "Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physiques, économiques et écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique", se concentre sur le développement d'un outil permettant de choisir le vitrage le plus adapté pour les bâtiments en tenant compte de divers critères. Dans la conclusion de sa thèse, Magali Bodart résume les principaux résultats et contributions de son travail. Elle explique que l'outil développé permet de comparer différents types de vitrage en fonction de critères physiques, économiques et écologiques. Cet outil intègre des données complexes et variées, offrant une évaluation globale et multidimensionnelle des options de vitrage.

L'outil aide à sélectionner des vitrages qui optimisent à la fois le confort thermique et visuel des occupants en prenant en compte des paramètres tels que la transmission lumineuse, l'isolation thermique et la gestion des gains solaires. Les analyses économiques incluent non seulement les coûts d'achat et d'installation, mais aussi les économies d'énergie sur le long terme. De plus, l'outil évalue l'impact écologique des vitrages en considérant leur cycle de vie complet, depuis la fabrication jusqu'au recyclage.

La thèse démontre la pertinence et l'efficacité de l'outil à travers des études de cas concrets, et Magali Bodart propose des recommandations pour son utilisation par les professionnels du bâtiment, les architectes et les décideurs, afin d'améliorer la prise de décision en matière de choix de vitrage. La conclusion souligne également la nécessité de continuer à affiner et à enrichir l'outil avec de nouvelles données et fonctionnalités, en intégrant par exemple des critères supplémentaires tels que les aspects acoustiques et la résilience aux conditions climatiques extrêmes (Magali Bodart, s.d.). Cette étude fournit une base de données préétablie sur les types de vitrage existants ; cependant, l'étude datant, il serait intéressant de mettre à jour cette base de données, étant donné que les évolutions ne sont jamais arrêtées.

Dans une autre étude expérimentale, Alain Makhour met en évidence les caractéristiques des fenêtres pariétodynamiques avec l'intégration d'un vitrage chauffant, afin de répondre à plusieurs questions, telles que la ventilation, la lumière naturelle et le chauffage. De plus, le système inventé serait pertinent pour un meilleur confort thermique au sein du logement et

pour optimiser l'espace, car le système de chauffage pourrait être intégré dans l'enveloppe du bâtiment (Alain Makhour, 2021). Les résultats obtenus montrent que les fenêtres pariétodynamiques peuvent aider à diminuer le besoin de chauffage en préchauffant l'air extérieur. Elles sont même plus performantes qu'un double vitrage associé à un convecteur et qu'un triple vitrage chauffant.

La fenêtre pariétodynamique chauffante permet une meilleure distribution de l'air neuf dans une pièce par rapport au cas de référence (Sutter, 2003a). L'analyse se fait dans des conditions climatiques fixes. Pour la suite de ce travail, il faut tester le vitrage dans des conditions climatiques variées et formuler une conclusion plus générale.

La thèse de Rémy Greffet, intitulée "Études expérimentale et numérique des performances énergétiques d'une fenêtre pariétodynamique", examine en détail les performances énergétiques d'un type innovant de fenêtre conçu pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Cette fenêtre, capable de gérer les flux thermiques à travers la paroi en utilisant des mécanismes comme la convection forcée ou naturelle, vise à optimiser le confort thermique intérieur tout en réduisant les besoins en chauffage et en climatisation.

Rémy Greffet a construit et testé des prototypes de fenêtres pariétodynamiques dans des environnements contrôlés, mesurant divers paramètres tels que les coefficients de transmission thermique, les débits d'air et les températures de surface. Ces mesures ont été essentielles pour évaluer les gains énergétiques potentiels de ces fenêtres par rapport aux fenêtres classiques.

En complément des expériences, des simulations numériques ont été effectuées pour prévoir les performances énergétiques des fenêtres pariétodynamiques dans différentes conditions climatiques et configurations de bâtiments. Les modèles numériques, validés par les résultats expérimentaux, ont été utilisés pour examiner divers scénarios non réalisables expérimentalement. La combinaison de cette approche a permis une analyse approfondie des gains énergétiques possibles, montrant une réduction des besoins en chauffage et en climatisation ainsi qu'une amélioration du confort thermique des occupants.

L'analyse montre que les mesures réelles et les résultats sont proches, avec des écarts souvent inférieurs à 1°C. Le modèle a permis de confirmer les analyses expérimentales précédentes. L'étude révèle que la température extérieure, le flux solaire et le débit d'air sont les facteurs les plus influents sur la température des fenêtres. L'épaisseur totale des lames d'air est importante pour les pertes de chaleur, surtout l'épaisseur de la lame intérieure pour l'effet de paroi froide. Un vitrage avec un verre clair et deux verres à faible émissivité s'est révélé efficace. Pour réduire les pertes, il faut augmenter les transferts de chaleur dans les lames d'air sur certaines faces et les réduire sur d'autres. Le cadre de la fenêtre est le principal point de perte de chaleur, représentant les trois quarts des déperditions. La fenêtre pariétodynamique a de meilleures performances thermiques qu'une fenêtre triple vitrage dès 4 m³/h de débit d'air, avec un bon facteur solaire. Simuler une maison équipée de ces fenêtres montre une réduction de 20 à 30 % des besoins de chauffage et un gain de 55 % en climatisation en été. Cependant, sans climatisation et protections solaires adaptées, le confort diminue, car la fenêtre retient la chaleur.

La lumière naturelle sert de source d'éclairage dans les immeubles, et étant donné que la lumière naturelle influence l'homme, ses activités et sa santé, il est essentiel de mettre en place un système afin d'assurer le confort visuel pour l'individu (Sutter, 2003b). La thèse de fin d'étude réalisée par Yannick Sutter a pour objectif d'étudier un modèle de store vénitien au pilotage automatique. Ce type de store permet d'améliorer les conditions de confort visuel et de créer un climat plus tempéré pour les occupants. Sa méthodologie est basée sur des expériences et des mesures sur un modèle réalisé en maquette. D'après cette recherche, il ressort que la présence d'un store de type réglable, permettant de capter un maximum de lumière tout en évitant la chaleur et l'éblouissement, peut garantir le confort visuel et thermique des occupants. L'automatisation des stores permet de capter et de diriger la lumière sous l'angle souhaité (Sutter, 2003c).

Le centre de recherche AGC (AGC, s.d.) de Gosselies en Belgique a développé des vitrages dits intelligents dont l'invention vise à améliorer le confort thermique, visuel et à économiser de l'énergie. Les vitrages sont adaptés pour des logements et des bureaux (Thomasrambaud, 2022). On peut identifier cinq grandes catégories de verres intelligents : le verre colorant, le verre opacifiant, le verre photocatalytique, le verre thermique et le verre photovoltaïque. Les différents types de vitrage présentent un intérêt pour être développés afin de répondre aux besoins de divers types de consommateurs, que ce soient des petits logements ou des ensembles collectifs. Actuellement, les verres intelligents sont très coûteux et pas encore facilement accessibles pour le secteur du logement (Thomasrambaud, 2022).

Maintenant que l'on connaît l'importance et le potentiel des vitrages, il serait intéressant d'analyser le bilan énergétique et l'influence des verres intelligents sur des immeubles de logements existants.

3 METHODOLOGIE

La trame centrale de cette étude, ainsi que les principaux concepts qui y sont liés, ont été élaborés et précisés à travers une analyse approfondie de la littérature. Cette base de connaissances peut maintenant être exploitée pour élaborer une méthodologie en mesure de répondre à la problématique de recherche.

Ce travail de recherche a pour objectif de mettre en avant le potentiel des vitrages pariétodynamiques dans le cadre de la rénovation des logements d'après-guerre et d'explorer la possibilité d'y intégrer des solutions alternatives.

Dans le cours de ce document, le quatrième chapitre expose en détail la méthodologie élaborée et exécutée en six phases majeures : recherche documentaire, choix du cas d'étude, création d'un modèle de cas d'étude, élaboration de scénarios de rénovation, modélisation des scénarios de rénovation et, finalement, interprétation des données.

3.1 METHODOLOGIE GENERALE

Les avancées technologiques dans le domaine des vitrages sont manifestes, et aujourd'hui il existe différents types de vitrage sur le marché pour répondre à des besoins spécifiques tels que la ventilation, le confort thermique, le confort visuel, etc. Ces technologies avancées trouvent fréquemment leur application dans le contexte de nouvelles constructions ou de rénovations majeures.

La ville de Liège abrite un parc immobilier ancien qui nécessite une rénovation substantielle pour se rapprocher du taux de rénovation estimé pour l'année 2050, fixé à 3 % par an, alors que le taux actuel est de 1 % (Habitos, s.d.). Ainsi, l'objectif de cette étude est d'explorer le potentiel des baies vitrées des anciennes habitations en intégrant de nouveaux types de vitrages, tout en tenant compte de l'efficacité énergétique, du confort thermique, des techniques de rénovation et des caractéristiques spécifiques des logements anciens.

La méthode globale sélectionnée pour conduire cette étude implique l'analyse d'un cas concret à travers la modélisation et la simulation thermique. Les étapes définies pour atteindre les objectifs fixés et obtenir les résultats souhaités sont les suivantes :

1. Recherche documentaire sur les logements collectifs d'après-guerre

Dans un premier temps, afin de mieux cerner ces types de bâtis, nous allons parcourir le contenu bibliographique mis à notre disposition. Effectivement, pour comprendre les systèmes constructifs de ces immeubles (structure, composition des murs, orientation, etc.) et la typologie des ouvertures. Celle-ci pourra être effectuée à l'aide de la consultation et de l'analyse de plans types de logements composant les bâtiments collectifs en question.

Des organismes tels que l'archive d'architecture de l'Université de Liège ou encore la société des logements sociaux détiennent les informations essentielles. Une demande d'obtention de ces plans devra être faite par le chercheur.

2. Le choix du cas d'étude

Afin de répondre à la question de recherche, nous nous appuyons sur une étude de cas unique pour obtenir un portrait détaillé d'une situation (André, 2022). Certes, une étude de cas multiples aurait sûrement apporté une série d'informations supplémentaires, mais le choix le plus judicieux pour ce mémoire s'est porté sur un cas d'étude.

3. La création d'un modèle de cas d'étude

Le logement choisi comme sujet d'étude est représenté à l'aide du logiciel de simulation thermique dynamique « DesignBuilder ». Le modèle est initialisé en fonction des caractéristiques de l'état existant avant toute rénovation. Après une première simulation, le modèle est ajusté et validé pour garantir que la version finale reflète de manière optimale la réalité.

4. Élaboration de scénario de rénovation

Les paramètres de rénovation sont sélectionnés à partir de quatre grandes catégories : isolation, vitrage, systèmes de ventilation et énergies consommées. Ces variables sont ensuite caractérisées au cours de la collecte de données. Les scénarios de rénovation sont élaborés en fonction de ces variables. L'étude repose sur six scénarios, les deux premiers étant des scénarios de base, et les autres cas présentent des caractéristiques inférieures à la situation existante. Les scénarios sont basés sur la conformité à l'objectif de performance énergétique des bâtiments (PEB).

5. Modélisation des scénarios de rénovation

De manière similaire au scénario de base, les différentes situations sont représentées dans le logiciel DesignBuilder. Dans un premier temps, elles sont configurées conformément aux caractéristiques définies précédemment, afin d'explorer en profondeur ces configurations et leurs variations.

6. Évaluation quantitative et qualitative des données

L'analyse se focalise principalement sur trois dimensions clés : le type de vitrage, les consommations énergétiques et le confort thermique. Tandis que les informations relatives à la consommation, provenant des simulations, sont directement exploitables, les trois autres paramètres nécessitent un traitement spécifique des données brutes obtenues dans le logiciel. Les résultats anticipés sont désormais prêts à être présentés, analysés et comparés.

Schématisation de la méthodologie générale de cette étude

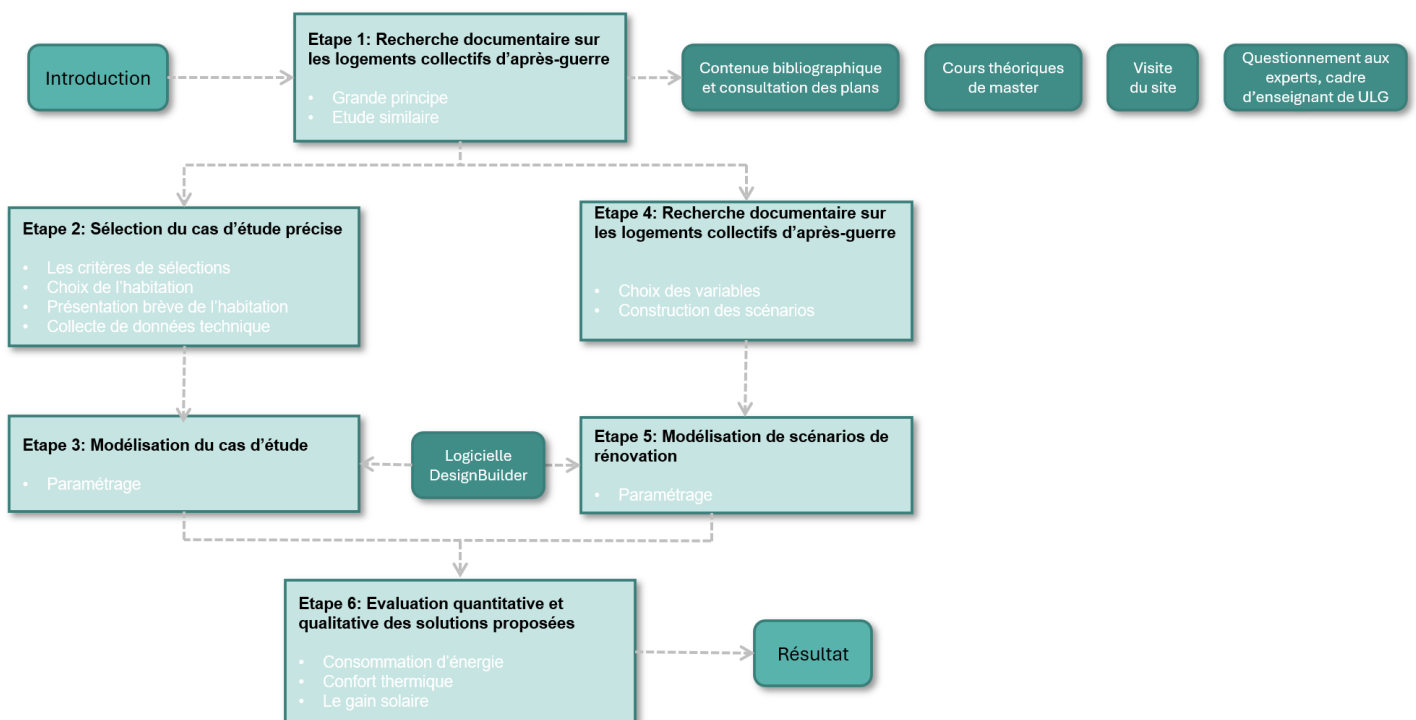


Figure 24 : Schéma de la méthodologie générale

3.2 SELECTION DU CAS D'ETUDE

Afin de répondre à la question de recherche, nous nous appuyons sur une étude de cas unique pour obtenir un portrait détaillé d'une situation (André, 2022). Bien qu'une étude de cas multiples aurait sans doute fourni une série d'informations supplémentaires, le choix le plus judicieux pour ce mémoire s'est porté sur une étude de cas unique. Pour ce choix, il est nécessaire de déterminer une série de critères.

3.2.1 La maison Liégeoise

À Liège, les responsables municipaux ont examiné de près la constante augmentation des coûts du logement, notamment en raison des effets de la guerre, ainsi que les difficultés rencontrées par les citoyens pour y accéder. C'est dans ce cadre qu'ils ont pris la décision d'établir l'Office des Logements en 1920 afin de remédier à cette crise.

Les premières actions se sont concentrées principalement sur la création de petites habitations en périphérie. Toutefois, la demande de logements au cœur de la ville reste élevée.

Finalement, en 1921, la Maison Liégeoise est inaugurée et devient la continuité de l'Office des Logements. Dès le début de son travail, la Maison Liégeoise privilégie la construction d'appartements afin d'offrir un grand nombre de logements.

Les coûts de construction et l'augmentation de la demande en logements incitent la Maison

Liégeoise à ériger des habitations multiples sur les terrains disponibles à la suite de l'exposition universelle de 1905. Ces logements offrent une densité plus élevée et un confort sur une superficie réduite (Christine, s.d.).

La Maison Liégeoise, l'une des premières entités belges fournissant des logements à vocation publique, gère environ 8000 résidences. Sa présence opérationnelle s'étend sur le territoire de la ville de Liège, couvrant les secteurs de Burenville, Cointe, Sainte-Walburge, Sainte-Marguerite, Nord (Saint-Léonard), Thier-à-Liège, Outremeuse, Vennes, Amercoeur et Droixhe (Maison Liégeoise, s.d.).

3.2.2 Les critères de sélections

Dans cette section, nous mettrons en évidence les critères essentiels qui détermineront le choix d'un logement pour notre étude de cas. Nous examinerons divers aspects tels que l'emplacement, la typologie, l'état du logement et la consommation énergétique. Chaque critère sera analysé en détail afin de comprendre son impact sur le choix final, en tenant compte des besoins spécifiques des résidents potentiels. Cette analyse nous permettra de sélectionner un logement répondant au mieux aux exigences de notre étude et d'assurer une évaluation complète et précise des options disponibles.

Critères	Justification
Localisation : Ville de Liège	Liège est une grande ville avec un potentiel important. Son tissu urbain a besoin de rénovation pour se mettre aux normes actuelles. En effet, 50 % des dossiers sont liés à Liège-Énergie (Energy Cities , 2022)
Typologie et morphologie : Immeuble d'habitation sociale, plus de 4 étages, mitoyen ou libre de 4 côtés, des appartements avec une surface de +- 300 m ² par étage	Représentatifs des immeubles construits après la guerre dans un style moderne, les hauts immeubles de Liège font partie intégrante de l'image de la ville. La superficie disponible permet de proposer des appartements de tailles et d'orientations variées.
Consommation : gaz, mazoute	Données nécessaires pour la comparaison des résultats.
Etat du logement : label E, F et G habitable	Cible de l'appel pour la rénovation de la région wallonne.
Période de la construction : 1945 – 1980	Logements après-guerre avec des défauts énergétiques très remarquables.
Nombre de la rénovation : pas de rénovation ou petite rénovation	Possibilité d'explorer et d'expérimenter différentes solutions.
Façade et type de vitrage : grande ouverture vitrée, sans isolation et étanchéité à l'air	Possibilité d'examiner le lien entre le confort thermique, la consommation énergétique et les ouvertures.

Tableau 3 : les critères de logement pour un choix de cas d'étude

3.2.3 Sélection et présentation brève de l'habitation

Le complexe résidentiel des Parvis des Écoliers se situe dans le quartier d'Outremeuse. Il fait partie intégrante du patrimoine de la Maison Liégeoise et a été construit dans les années 1920. Cet ensemble présente un style moderniste distinctif. Il se compose de deux tours, l'une de 19 étages et l'autre de 13 étages. Chaque étage a la capacité d'accueillir six appartements de tailles variées, favorisant ainsi une mixité d'habitats. Les superficies des logements oscillent entre 70 m² et 100 m² (Annexe interview Maison Liégeoise).

L'intégralité de la structure est réalisée en béton coulé sur place, y compris la façade constituée d'éléments en béton. Chaque logement bénéficie d'un balcon d'au moins 80 cm de largeur. Les baies vitrées et les portes coulissantes donnant sur les balcons sont généralement équipées d'anciens « double vitrages ».

La qualité architecturale de ce complexe est notablement représentée par un espace extérieur : le parvis comprend des espaces verts et des aires de jeux pour enfants. Il s'agit généralement d'un lieu de rencontre pour les habitants, en particulier les familles, offrant un espace de détente et de loisirs au cœur de la ville.

De plus, les résidents profitent d'une vue panoramique sur la ville de Liège grâce aux baies vitrées des appartements.

Le bureau de la Maison Liégeoise est situé au rez-de-chaussée. Au niveau R+1 des deux tours, ces dernières sont connectées par une passerelle. Les logements débutent seulement à partir du niveau R+2.



Figure 25 (gauche) : Grande tour



Figure 26 (droite) : le contexte du complexe Des parvis des Écoliers

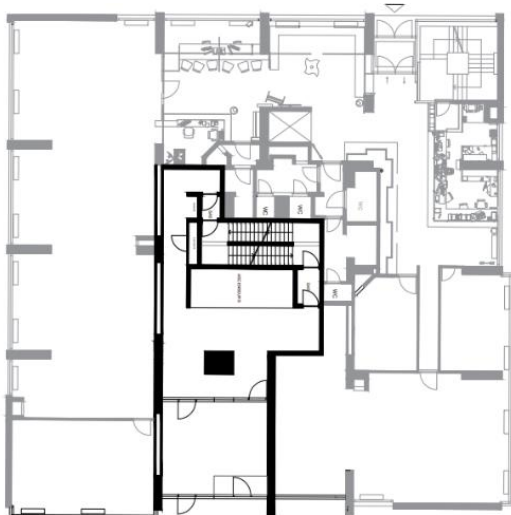


Figure 27 (gauche) : Plan RDCH grande tour

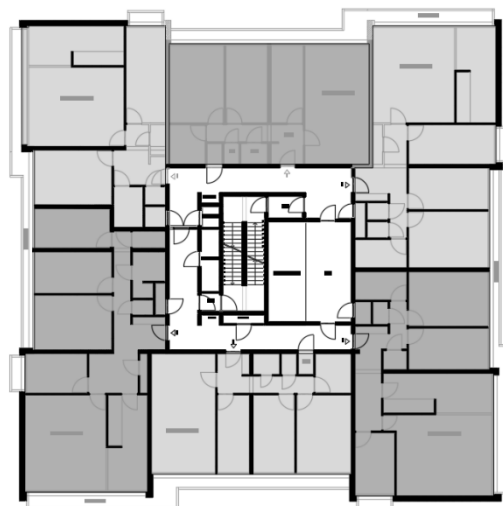


Figure 28 (droite) : Plan 2^{er} étage de grande tour

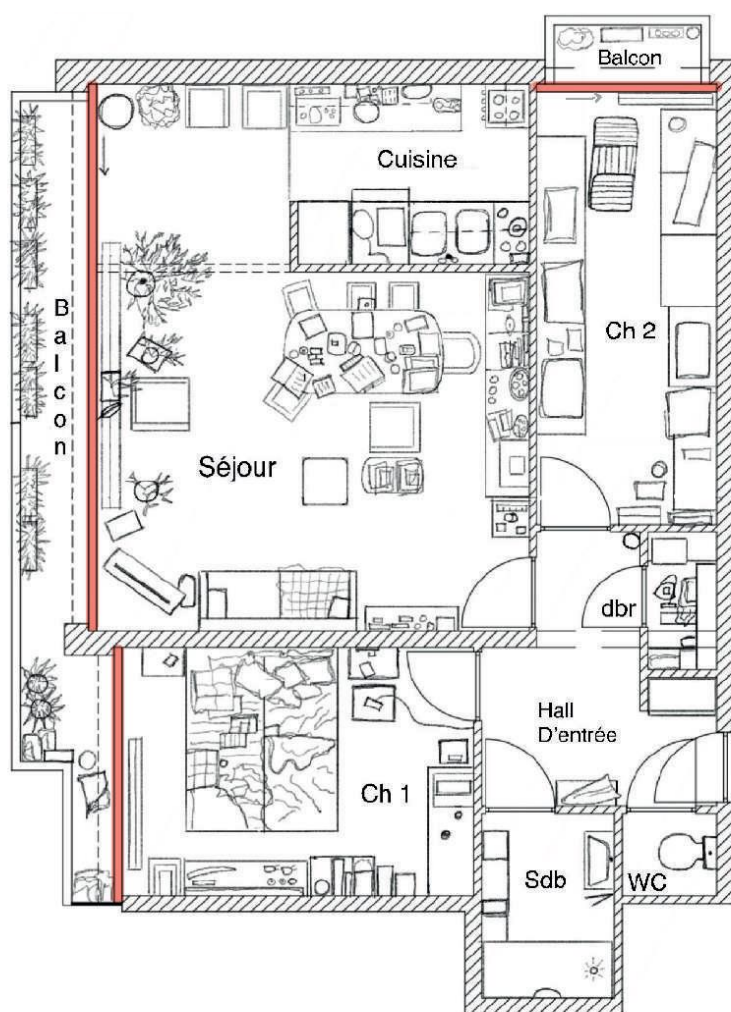


Figure 29 grande tour : plan d'appartement 2 chambres nord-ouest
(LOUIS Joséphine - MINSIER Yanis)



Figure 30 grande tour, appartement 2 chambres Sud-ouest
(LUYCKX Hugo - MARTINEZ AGUILERA Mathilde)

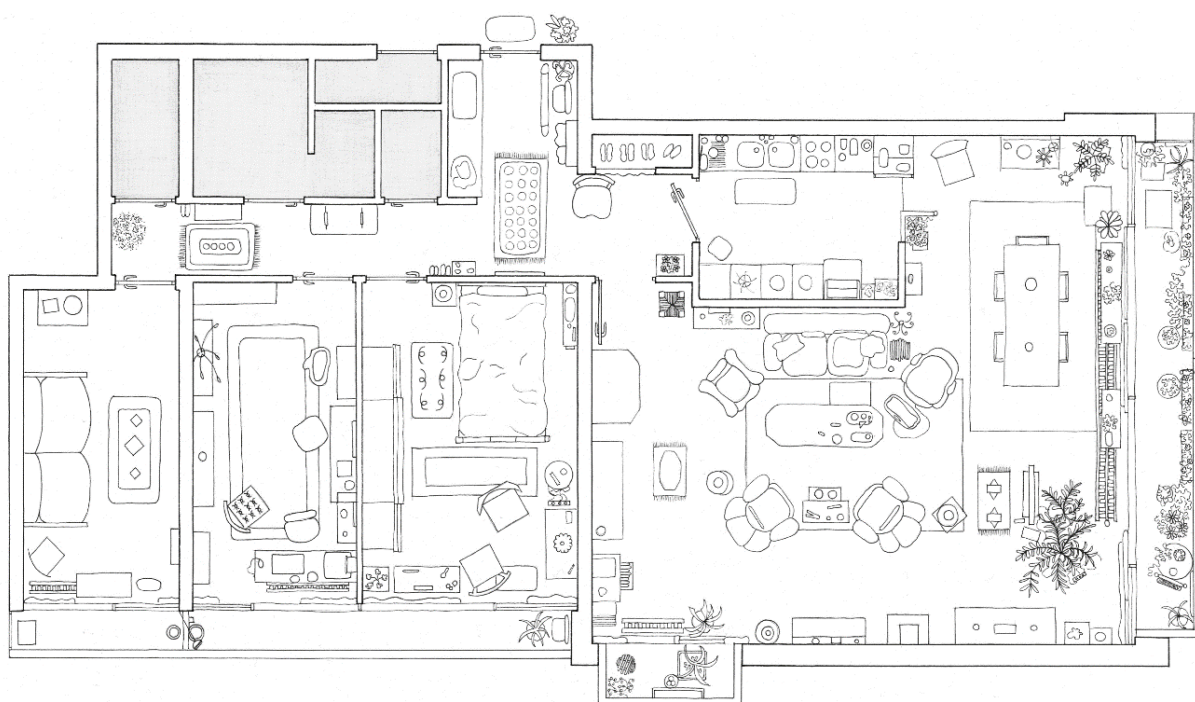


Figure 31 grande tour, appartement 3 chambres ouest
(CIRAOLO Luana - VANDEN BOSSCHE Sarah)

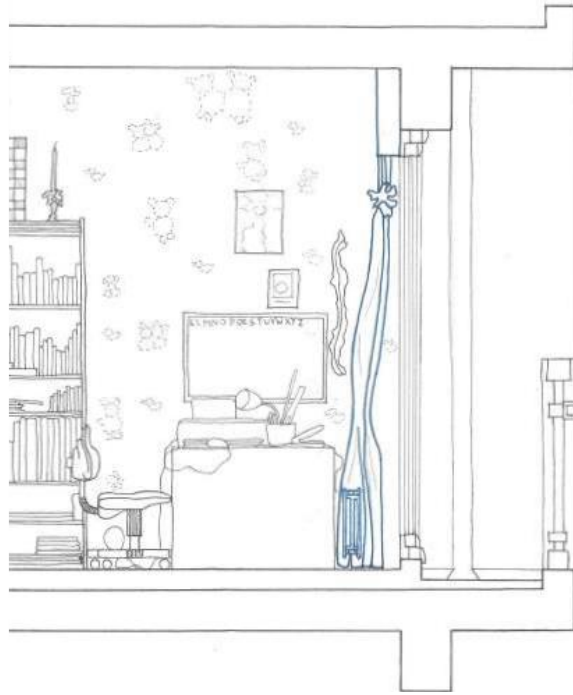


Figure 32 grande tour, coupe dans appartement 3 chambres ouest
(CIRAOLO Luana - VANDEN BOSSCHE Sarah)



Figure 33 ensemble des photos de la façade grande tours et détail des fenêtres

3.3 ELABORATION DE SCENARIO DE RENOVATION

3.3.1 Choix des variables sur les vitrages

Le tableau 4 présenté ci-dessous offre une comparaison détaillée des données techniques relatives à différents types de vitrage, à savoir le simple vitrage, le double vitrage simple/électrochrome, et le triple vitrage haute performance/pariétodynamique. Ce tableau a été conçu dans le cadre d'un projet de rénovation de logement, où le choix du vitrage constitue une étape cruciale pour améliorer les performances thermiques et énergétiques de l'habitation.

L'objectif principal de cette comparaison est de fournir des informations réalistes et pratiques sur ces trois types de vitrage, afin de faciliter la prise de décision lors de la rénovation. En présentant des caractéristiques techniques spécifiques à chaque type de vitrage, ce tableau permet également d'expérimenter et de comparer les performances de ces options, en fonction des priorités du projet de rénovation (Admin, 2020).

Type de Vitrage (FIV, s.d.)	Composition	Coefficient U (W/m 2K)	Transmission lumineuse TL %	Facteur solaire FS % (g)	Ventilation	Prix (Vitrage haut rendement, s.d.) en m ²
Simple	Claire Ép. 4-12 mm	5,8	90	87	Naturel	45-130€
Double	Clair Ép. 4/air/4	2,9	81	77	Naturel ou mécanique	100-115€
	Electrochrome Ep. 6/15 air/4	1,4	70	40	Mécanique	80-100€
Triple	Basse émissivité Ép. 4/12 argon/4	1,1	70	50	Mécanique	150-230€
	Pariétodynamique	0,5- 0,8	48	68	Via les lames de vitrages	

Tableau 4 : Données techniques de différents types de vitrage.

3.3.2 Construction des scénarios

Dans cette étude, nous explorons trois grandes approches de rénovation. La première est déclinée en cinq variables, tandis que les deux autres se divisent en trois variables distinctes. Les résultats obtenus sont ensuite analysés et comparés.

La justification du choix de ces types de vitrage réside dans le fait que leurs propriétés et caractéristiques présentent des écarts relativement importants entre eux, permettant ainsi de tester une gamme de valeurs variées et d'obtenir des résultats plus intéressants.

A.Façade sans Isolation		B.Isolation de façade intérieur	C.Isolation de façade extérieur
0 = Situation existant	Double vitrage simple	-	-
1	Simple vitrage	Double vitrage simple	Double vitrage simple
2	Double vitrage électrochrome	Double vitrage électrochrome	Double vitrage électrochrome
3	Triple vitrage basse émissivité	Triple vitrage basse émissivité	Triple vitrage basse émissivité
4	Triple Vitrage pariétodynamique	Triple Vitrage pariétodynamique	Triple Vitrage pariétodynamique

Tableau 5 : Différent scénario pour l'étude

Ces scénarios illustrent différentes approches de la gestion thermique à travers l'utilisation de différentes combinaisons de vitrage et d'isolation, offrant ainsi une perspective sur l'impact potentiel de ces configurations sur l'efficacité énergétique et le confort thermique des bâtiments.

3.4 MODELISATION DES SCENARIOS DE RENOVATION SUR LOGICIEL

3.4.1 Paramétrage

Une fois le cas d'étude sélectionné et toutes ses données collectées, il est temps de modéliser le logement dans son état initial, non rénové. Pour ce faire, nous faisons appel à un logiciel de modélisation et de simulation thermique dynamique. Cet outil, à la fois performant et accessible, est particulièrement adapté à cette étude.

L'un des atouts de DesignBuilder est sa panoplie de valeurs par défaut et de modèles préenregistrés. Dans la mesure où les informations sur le cas d'étude ne contredisent pas ces valeurs, nous les avons conservées. Cette section décrit de manière générale les ajustements apportés au fichier de base afin que le modèle reflète au mieux la réalité du logement. Nous modélisons l'un des étages intermédiaires de la grande tour. Toutes les données encodées sont, cependant, détaillées dans un fichier Excel en annexe.

Localisation et données de météo

Une fois le choix du cas d'étude confirmé et toutes les données le concernant recueillies, la modélisation de l'habitation dans son état initial peut enfin débuter. À cet effet, le logiciel de modélisation et de simulation thermique dynamique, DesignBuilder, est utilisé. Cet outil, à la fois performant et accessible, se révèle particulièrement adapté à cette tâche. L'un des avantages majeurs de DesignBuilder réside dans sa vaste bibliothèque de valeurs par défaut et de modèles préenregistrés. Ces derniers ont été exploités, sauf contradiction avec les données spécifiques au cas d'étude. Cette section présente de manière générale les modifications apportées au fichier de base afin d'optimiser la représentation du modèle de l'habitation.

Géométrie et zonage

L'orientation du bâtiment a été soigneusement planifiée, avec la façade avant inclinée à un angle de 30° par rapport au nord dans le sens antihoraire. Le bâtiment est divisé en six blocs, correspondant au nombre d'appartements par étage : trois appartements de deux chambres avec une superficie de 70 m², et trois appartements de trois chambres avec une superficie de 85 m² à 100 m². Chaque bloc est subdivisé en deux zones en fonction de l'utilisation des pièces (chauffée/non chauffée), généralement réparties entre les espaces sanitaires et cuisine/salon/chambre à coucher. Les deux premiers niveaux de l'immeuble ne sont pas résidentiels. Les habitations commencent seulement à partir du troisième étage. Pour toutes les parois horizontales ou verticales mitoyennes, le paramètre « adiabatique » est encodé. Les ouvertures, uniformes et de taille égale sur toute la façade, sont directement intégrées dans la modélisation géométrique.

Activité

Toutes les zones sont occupées, et la densité d'occupation est établie dans DesignBuilder en fonction du nombre total d'occupants, soit environ 15 personnes par étage (voir annexe : interview de la Maison Liégeoise). Aucune recherche supplémentaire n'est effectuée pour obtenir le nombre exact de résidents par étage. L'objectif est d'avoir une estimation générale, étant donné que le nombre de résidents varie considérablement et ne correspond pas nécessairement à la superficie de l'appartement. En général, les appartements de deux chambres abritent une famille de trois personnes, tandis que ceux de trois chambres accueillent une famille de quatre personnes. Le nombre de jours fériés par an est fixé à 10 jours, ce qui correspond à la moyenne des jours fériés (hors week-end) en Belgique. Seules la cuisine et la salle de bains sont alimentées en eau chaude sanitaire. Les valeurs de consommation sont estimées à partir de la moyenne trouvée sur Energy Plus, soit 50 litres par mètre carré par jour et par personne (Energy Plus Le Site, 2007b). La température cible dans les pièces chauffées est fixée à 20°C pendant les heures de présence (de 18h à 8h en semaine, ainsi que le week-end et les jours fériés). La température de consigne en l'absence des occupants est de 18°C pour éviter un refroidissement excessif des pièces. Les besoins en éclairage des différentes zones sont estimés en fonction des données moyennes fournies par Livios (Livios, s. d.). Seules les consommations électriques des appareils électroménagers les plus impactantes sont prises en compte, principalement dans la cuisine.

Construction

Tous les différents types de parois qui composent l'enveloppe de l'habitation sont modélisés dans le logiciel en fonction des descriptions figurant sur les plans. Au total, il y a douze murs extérieurs, deux planchers et six portes extérieures. Les caractéristiques des parois sont définies à partir des matériaux également créés dans DesignBuilder, en utilisant les données de propriétés disponibles sur le site Energy Plus. En ce qui concerne l'étanchéité de l'enveloppe, aucune valeur précise n'a été mesurée lors de l'audit, mais elle a été estimée comme étant médiocre. Par conséquent, une valeur de débit de fuite par unité de surface (V50) de 8 m³/h.m²

est choisie. Cette valeur est typique pour les maisons anciennes où aucune mesure spécifique pour garantir l'étanchéité de l'enveloppe n'a été prise.

Ouverture

Les ouvertures de l'habitation reposent principalement sur deux paramètres : le vitrage et le châssis. L'habitation comporte du double vitrage ancien et des châssis en aluminium, présentant une mauvaise étanchéité à l'air. Pour deux types de vitrages, nous optons pour des paramétrages particuliers : vitrage électrochrome et vitrage pariétodynamique. Les fenêtres électrochromiques passent de transparentes à teintées en appliquant un courant électrique. Nous pouvons facilement modéliser un vitrage électrochrome dans DesignBuilder en utilisant les données d'ombrage de fenêtre et en définissant les propriétés du panneau de fenêtre extérieur à utiliser lorsque l'ombrage est actif. Pour le vitrage pariétodynamique, il n'existe pas de solution directe pour le modéliser, donc il doit être présenté avec divers ajustements. Il est modélisé comme une fenêtre à triple vitrage avec flux d'air. Cette option peut être utilisée pour spécifier le mécanisme de contrôle des fenêtres dans lesquelles l'air forcé circule dans l'espace entre les couches de verre adjacentes. Elles sont également connues sous le nom de « fenêtres à extraction de chaleur » ou « fenêtres climatiques ».

Éclairage

Le type d'éclairage des espaces étant peu connu et variable d'un espace à l'autre, le modèle d'éclairage choisi est « DesignBuilder default lighting ». Quatre programmes d'éclairage sont définis selon le type d'espace : pièce de vie, chambre, salle de bain ou autre (hall, cave et rangement). Les programmes d'éclairage sont aussi définis selon les habitudes générales dans une maison.

HVAC

Le modèle de référence sélectionné est « Chauffage par radiateur, Eau chaude par chaudière, Ventilation naturelle », ce qui correspond bien au scénario étudié : absence de ventilation mécanique ou de climatisation active, avec chauffage et production d'eau chaude sanitaire au gaz. Les espaces chauffés comprennent les pièces de vie et les chambres. Les pièces utilisées comme espaces de rangement ne sont pas équipées de radiateurs. Ce programme est généralisé à l'ensemble de la maison et reflète les habitudes de chauffage des occupants. La consommation d'eau chaude sanitaire est limitée à la cuisine et à la salle de bain, tandis que la ventilation naturelle est uniquement prise en compte pour les pièces munies de fenêtres donnant sur l'extérieur.

3.5 VALIDATION DU MODELE EXISTANT

Pour garantir que le modèle élaboré dans DesignBuilder reflète fidèlement la réalité, il est nécessaire de procéder à une étape de calibration et de validation. L'objectif est de vérifier que les résultats de la simulation sont en adéquation avec les relevés observés. Dans cette étude, la calibration du modèle se concentre sur un seul paramètre, à savoir la consommation mensuelle de gaz pour le chauffage et l'eau chaude.

Effectivement, l'accès aux relevés de température et aux données de consommation électrique des ménages s'est révélé difficile en raison de la complexité d'accès aux compteurs privés. De plus, l'obtention des relevés de température aurait nécessité davantage de temps pour une période de collecte suffisamment étendue.

Le tableau ci-dessus reprend les données de consommation de chauffage et d'eau chaude par nombre de ménages pour un étage de l'année 2023.

NOMBRE DE PERSONNE	CONSOMMATION EN KWh/an
1	4.600
5	23.500
2	10.000
1	4.200
1	5.000
5	24.000
Total pour l'étage	71.800

Une fois que le modèle a été finalisé, la première simulation peut être initiée. La période de calcul choisie s'étend du 1er janvier au 31 décembre 2024, pour deux principales raisons : elle correspond à une année complète de 365 jours et elle est la plus proche possible des périodes de relevés disponibles (décembre 2023). Ainsi, les conditions météorologiques utilisées par le logiciel reflètent au mieux celles réellement rencontrées, ce qui peut exercer une influence significative sur les résultats.

Lors de la comparaison des premiers résultats de consommation générés par le logiciel avec les attentes, une différence notable est observée. Pour évaluer précisément cet écart, il est confronté à une tolérance préalablement définie de 10 % afin de déterminer si le modèle peut être considéré comme calibré et validé.

D'après les informations fournies par le logiciel DesignBuilder, la consommation annuelle s'élève à 75 000 kWh. L'écart entre les conditions réelles et le modèle est de 3 200 kWh, ce qui représente **4,4 %**. Étant donné que cet écart est inférieur au seuil de 10 %, nous pouvons considérer notre modèle comme valide.

3.6 Paramètre à étudier

Parmi les nombreux résultats fournis par les scénarios modélisés, deux thèmes ont été sélectionnés pour être étudiés, chacun représenté par un paramètre spécifique :

- Performance énergétique, en se basant sur la consommation d'énergie.
- Confort thermique, en tenant compte de la température de l'air.
- Impacts de la ventilation, en considérant le débit d'air.

Le choix d'examiner les consommations énergétiques est clair dans le contexte d'une rénovation énergétique. L'évaluation de la ventilation est motivée par la perspective évoquée dans l'introduction concernant les pertes d'énergie dans les logements. La ventilation peut influencer la consommation de gaz ou l'apport de chaleur d'été de l'extérieur vers l'intérieur, augmentant ainsi le risque d'inconfort pendant les périodes de chaleur. En ce qui concerne le confort thermique, l'objectif est d'améliorer le confort en été et en hiver.

Performance énergétique

Les données relatives à la consommation d'énergie sont obtenues directement dans l'onglet de simulation de DesignBuilder. Ces données correspondent à l'énergie utilisée par le ménage. Les catégories de données pertinentes pour cette étude sont les suivantes :

- Consommation totale d'énergie annuelle
- Consommation de gaz annuelle (pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire)
- Consommation d'électricité annuelle (pour l'éclairage, les équipements, etc.)

Pour chaque catégorie, les résultats peuvent être présentés soit sous forme de consommation totale annuelle en kWh/an, soit sous forme de consommation spécifique annuelle (divisée par la surface de plancher chauffée) en kWh/m².an.

Confort thermique

La norme NBN EN ISO 7730, qui concerne le confort thermique, établit les objectifs de température opérative suivants pour un bâtiment résidentiel, en fonction du type de pièce :

- Minimum pour le chauffage pendant la saison hivernale : 18°C, 20°C ou 21°C.
- Maximum pour le rafraîchissement pendant la saison estivale : 27°C, 26°C ou 25,5°C (Energy Plus Le Site, 2014).

Dans cette étude, les températures de référence choisies sont 18°C pour la valeur minimale et 25°C pour la valeur maximale. Elles peuvent ainsi être comparées aux températures moyennes et extrêmes en saison estivale (juin-juillet-août) ou hivernale (décembre-janvier-février) obtenues pour chaque scénario. La valeur maximale permet également d'évaluer le nombre d'heures de surchauffe par an (h/an) ou le pourcentage de temps de surchauffe sur l'année (%) où la température moyenne intérieure dépasse 25°C. La Performance Énergétique des Bâtiments (PEB) recommande de ne pas dépasser 5 % de temps de surchauffe (Guide Bâtiment Durable, 2020).

Il est possible d'inclure des stores pour réduire les apports solaires et augmenter la résistance à la conduction thermique à travers les fenêtres. Dans le cas à analyser, nous les utiliserons uniquement pour la modélisation des vitrages électrochromes. Pour le reste, cette protection n'est pas appliquée afin d'évaluer les impacts purs des vitrages sur le confort thermique.

Impacts de la ventilation

Il existe deux approches principales pour modéliser la ventilation naturelle et l'infiltration dans DesignBuilder, en fonction de l'option de modèle de ventilation naturelle choisie :

- Programmation : Cette approche permet de définir explicitement le taux de ventilation naturelle pour chaque zone en termes de valeur maximale de changements d'air par heure (ACH) et d'un programme spécifique. Le taux de changement d'air d'infiltration est fixé par une valeur ACH constante, avec diverses options de contrôle disponibles.

- Calculé : Cette méthode calcule la ventilation naturelle et l'infiltration en fonction des ouvertures de fenêtres, des fissures, de la flottabilité et des différences de pression dues au vent, ainsi que des dimensions des fissures. Des options de contrôle sont également fournies.

Pour notre étude, nous avons opté pour la ventilation naturelle programmée afin d'estimer de manière raisonnable les taux de ventilation naturelle et d'infiltration dans le bâtiment. D'autres scénarios de flux d'air sont plus complexes à estimer, nécessitant parfois le calcul des flux d'air.

Ventilation et infiltration naturelles programmées

Le débit et les données de planification de la ventilation naturelle programmée sont accessibles dans l'onglet CVC. Le débit est désactivé si la température de l'air de la zone descend en dessous de la température de consigne de ventilation définie sous Contrôle environnemental dans l'onglet Activité. L'infiltration est définie par une valeur ACH constante sous Étanchéité à l'air dans l'onglet Construction. Le flux d'air à travers les fenêtres extérieures, les événements et les portes est inclus dans la valeur de ventilation naturelle de l'air extérieur (ac/h) définie dans l'onglet CVC.

4 RESULTAT ET DISCUSSION

Dans ce quatrième chapitre, les résultats obtenus sont examinés en trois étapes distinctes. Tout d'abord, une analyse détaillée des résultats est présentée pour le cas de référence ainsi que pour chaque scénario individuel. Ensuite, une comparaison et une analyse approfondie des principaux résultats sont effectuées pour l'ensemble des configurations étudiées. Enfin, des conclusions sont formulées à partir de ces analyses, permettant ainsi de répondre aux questions de recherche énoncées au début de ce travail.

4.1 Résultat des scénarios

Scénario A-0, double vitrage simple sans isolation de parois

La consommation d'énergie :

Ce scénario est équivalent à la situation actuelle des logements et représente l'état initial de l'habitation avant toute intervention de rénovation. Les résultats qui en découlent servent de point de référence pour l'analyse des résultats obtenus à partir des scénarios étudiés. La consommation d'énergie totale obtenue pour le cas de base s'élève à **86 397 kWh/an**. Pour une surface de plancher chauffée de 492 m², cela équivaut à une consommation spécifique de 175 kWh/an.m². Le total comprend une consommation de gaz de 77 970 kWh et une consommation d'électricité de 8 427 kWh, soit l'équivalent de 11 % de l'énergie consommée en gaz.

Consommation annuelle = **77.970KWh**
Electricité annuelle = **8.427 KWh**

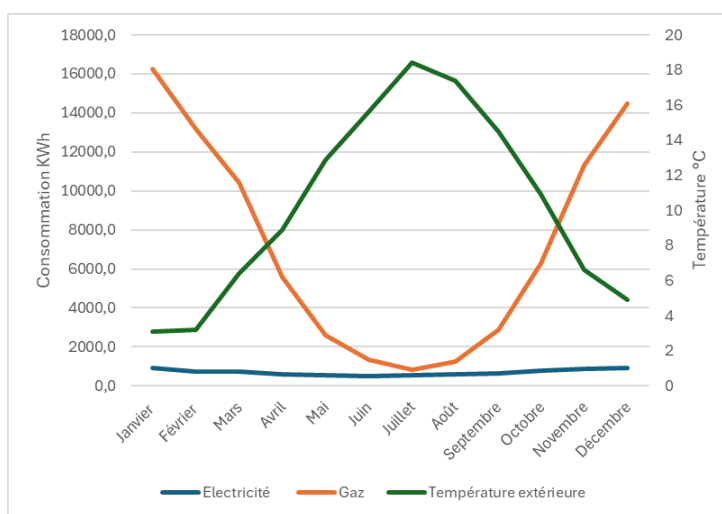


Figure 5-1 : DB, consommation annuelle d'énergie en KWh

La consommation de gaz joue un rôle majeur dans la consommation énergétique totale et est très sensible aux variations de température extérieure, comme le montre la Figure 5-1. En effet, la consommation varie de moins de 300 kWh en juillet à près de 15 000 kWh durant les mois d'hiver. Cette variation est principalement due au manque d'isolation de l'habitation, qui permet des échanges de chaleur importants à travers les murs et les fenêtres.

Le confort thermique :

La Figure 5-2 illustre les températures opératives évaluées pour le cas actuel. En été, la température moyenne est de 28,9 °C, dépassant le seuil de confort thermique de 25 °C. Bien

que la température maximale atteigne 30,3 °C, la surchauffe n'est observée que pendant trois mois de l'année, soit **1,23 %** du temps, ce qui reste bien en dessous des 5 % recommandés.

En hiver, la température maximale s'élève à 19,3 °C et la température minimale à 18,9 °C. Ces deux valeurs sont donc au-dessus du seuil de confort thermique fixé à 18 °C.

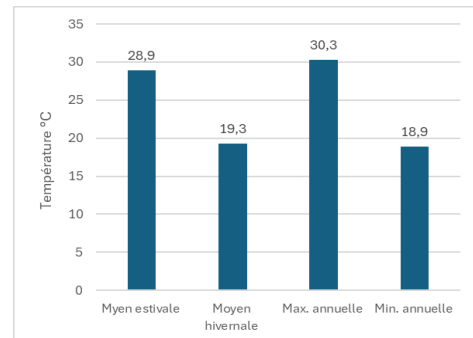


Figure 5-2 : DB, température opérative

Gain d'énergie solaire :

Le gain solaire atteint son pic en juillet, atteignant près de 9 000 kWh. Le minimum est observé pendant l'hiver en décembre, avec un gain de 1 300 kWh. Comme le montre la Figure 5-3, les besoins en chauffage diminuent considérablement durant l'été. Il existe une forte corrélation entre le gain solaire et les besoins en chauffage. Le total d'énergie nécessaire pour le chauffage des logements est de 62 074 kWh, ce qui correspond à 95 % de l'énergie de chauffage nécessaire.

Gain solaire = **62.074 KWh**
Chauffage nécessaire = **65.566 KWh**

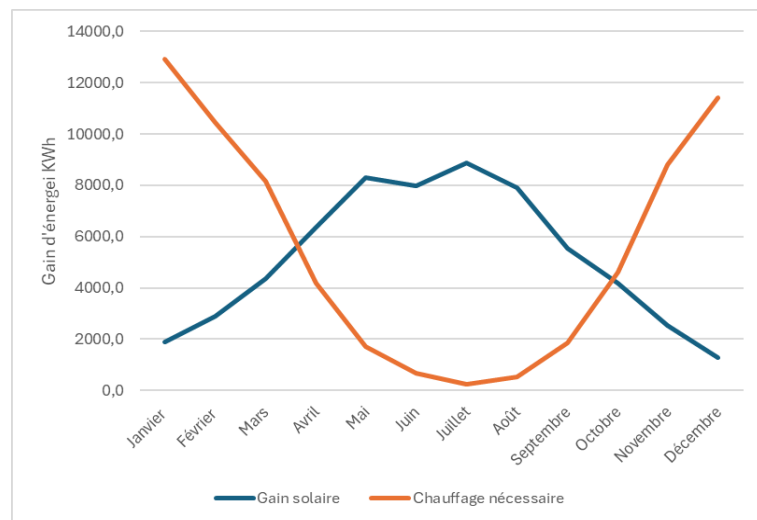


Figure 5-3 : DB, Gain d'énergie solaire mensuelle en KWh

A-1 Simple vitrage, sans isolation de parois

La consommation d'énergie :

La consommation d'énergie totale obtenue pour le cas A1 s'élève à **98 564 kWh/an**, soit une **hausse de 21 %** par rapport au scénario A0. Pour une surface de plancher chauffée de 492 m², cela équivaut à une consommation spécifique de 200 kWh/an.m². Le total comprend une consommation de gaz de 91 260 kWh pour le chauffage et 8 304 kWh pour la production d'électricité, ce qui équivaut à 10 % de la consommation de gaz.

Scénario A0
 Consommation annuelle = **77.970KWh**
 Electricité annuelle = **8.427 KWh**

Scénario A1
 Consommation annuelle = **91.260 KWh**
 Electricité annuelle = **8.304 KWh**

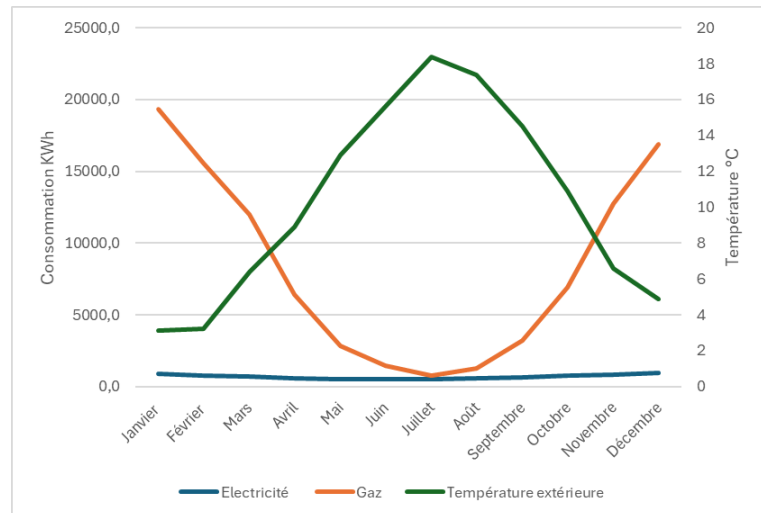


Figure 5-4 : DB, consommation mensuelle d'énergie en KWh

La consommation de gaz joue un rôle majeur dans la consommation énergétique totale et est très sensible aux variations de température extérieure, comme le montre la Figure 5-4. La consommation d'énergie oscille entre moins de 300 kWh en juillet et environ 18 500 kWh pendant les mois d'hiver. Cette variation est principalement causée par la mauvaise isolation et l'inefficacité des vitrages de l'habitation, ce qui entraîne des pertes de chaleur significatives à travers les murs et les fenêtres.

Le confort thermique :

La Figure 5-5 présente les températures opératives évaluées pour le cas d'étude. En été, la température moyenne de 27,3 °C se trouve au-dessus des 25 °C, seuil supérieur de confort thermique. Bien que la température maximale atteigne 28,6 °C, une surchauffe n'est constatée que pour 360 h/an, soit **1,23 %** du temps, ce qui est bien inférieur au seuil recommandé de 5 %. En hiver, la température moyenne s'élève à 20,2 °C et la température minimale à 18,6 °C. Ces deux valeurs sont donc au-dessus du seuil de confort thermique fixé à 18 °C.

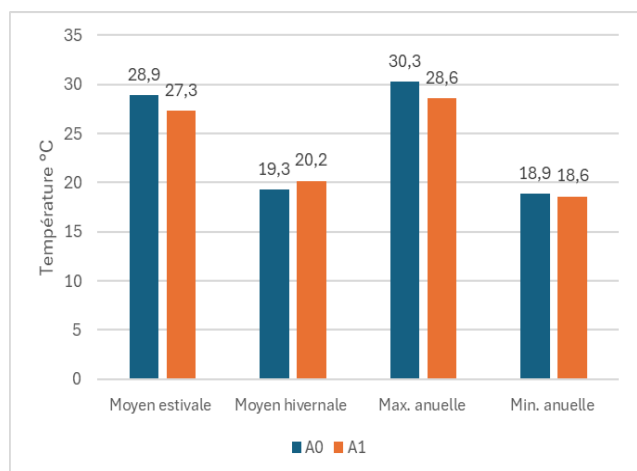


Figure 5-5 : DB, température opérative

Gain d'énergie solaire :

Le gain solaire atteint son pic en juillet, atteignant près de 11 140 kWh. Le minimum est observé pendant l'hiver en décembre, avec un gain de 1 700 kWh. Comme le montre la Figure 5-6, les besoins en chauffage diminuent considérablement durant l'été. Il existe un lien entre le gain solaire et les besoins en chauffage.

Le total d'énergie nécessaire pour le chauffage des logements est de 62 074 kWh, ce qui correspond à 95 % de l'énergie de chauffage nécessaire.

Scénario A0
Gain solaire = **62.074 kWh**
Chauffage nécessaire = **65.566 kWh**

Scénario A1
Gain solaire = **85.588 kWh**
Chauffage nécessaire = **77.189 kWh**

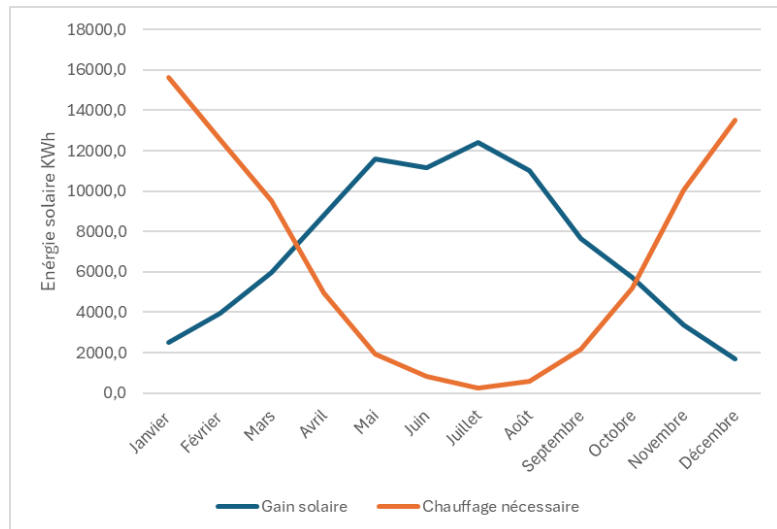


Figure 5-6 : DB, Gain solaire mensuelle en kWh

Dans le cas de simple vitrage, le gain solaire a une **augmentation de 27 %** et le besoin en chauffage augmente de **15%**.

Scénario A-2, double vitrage électrochrome sans isolation de parois

La consommation d'énergie :

La consommation d'énergie totale obtenue pour le scénario A2 s'élève à 42 631 kWh/an, soit 51 % de moins que la situation existante. Pour une surface de plancher chauffée de 492 m², cela équivaut à une consommation spécifique de 87 kWh/an.m². Le total comprend une consommation de gaz de 35 327 kWh/an et une consommation d'électricité de 7 304 kWh/an.

Scénario A0
Consommation gaz = **77.970 kWh**
Consommation électricité = **8.427 kWh**

Scénario A2
Consommation gaz = **35.327 kWh**
Consommation électricité = **7.304 kWh**

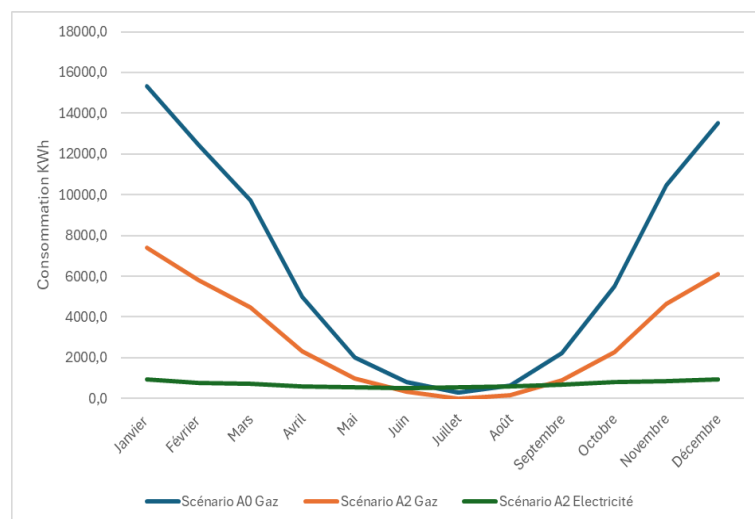


Figure 5-7 : DB, consommation mensuelle d'énergie en kWh

Une réduction de l'énergie nécessaire pour le chauffage est prévue dans ce scénario grâce à l'installation de vitrages plus performants, ce qui permet une diminution de la consommation de gaz de 51 %. Les besoins en chauffage varient de presque 0 kWh en juillet-août à plus de 7

000 kWh durant les mois d'hiver. Cette variation est principalement due au manque d'isolation de l'habitation, qui permet des échanges de chaleur importants à travers les murs et les fenêtres.

Le confort thermique :

La Figure 5-8 illustre les températures opératives évaluées pour le scénario A2. En été, la température moyenne est de 27,3 °C, dépassant le seuil de confort thermique de 25 °C. Bien que la température maximale atteigne 28,4 °C, la surchauffe n'est observée que pendant trois mois de l'année, soit **1,23 %** du temps, ce qui reste bien en dessous des 5 % recommandés par les normes belges pour la surchauffe.

Pendant la période estivale, la température s'élève à 27,3 °C, et durant la période hivernale, elle est de 19,7 °C. Nous constatons une diminution de 6 % de la température maximale annuelle par rapport à la situation existante. Malgré cette amélioration, la température de confort de 25 °C pour les périodes estivales n'est pas encore atteinte.

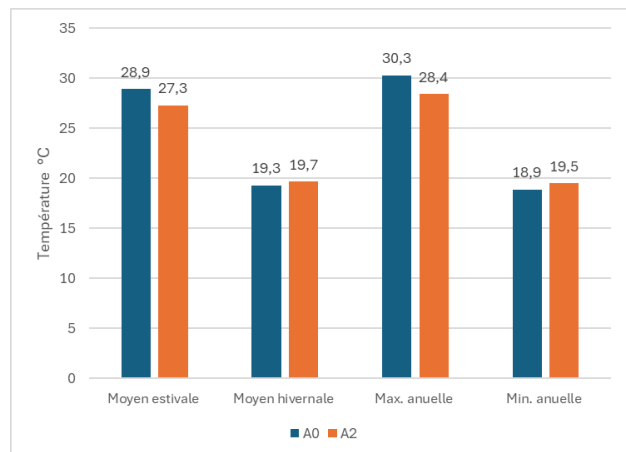


Figure 5-8 : DB, température opérative

Gain d'énergie solaire :

Le gain solaire atteint son pic en juillet, près de 2 200 kWh. Le minimum est observé en décembre, près de 870 kWh. Comme le montre la figure 5-9, les besoins en chauffage diminuent durant l'été. Il existe une forte corrélation entre le gain solaire et les besoins en chauffage.

Le total d'énergie nécessaire pour le chauffage des logements est de 29 753 kWh, soit 31 % de plus que l'énergie solaire gagnée (20 643 kWh). Le chauffage est nécessaire pendant 41 % du temps de l'année. Pour le reste du temps, soit 59 %, l'énergie solaire est suffisante pour le chauffage des logements (voir figure 5-9).

Les vitrages électrochromes filtrent les rayons solaires et améliorent le confort d'été, au détriment de l'augmentation de la consommation de chauffage pendant la période hivernale. Dans le cas de simple vitrage, le gain solaire a une **diminution de 67%**, et une **diminution de 54%** pour le besoin en chauffage.

Scénario A0

Gain solaire = **62.074 kWh**

Chauffage nécessaire = **65.566 kWh**

Scénario A2

Gain solaire = **20.643 kWh**

Chauffage nécessaire = **29.753 kWh**

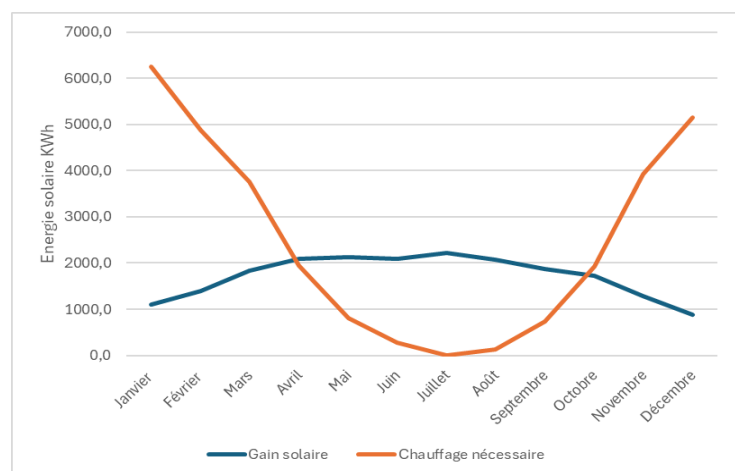


Figure 5-9 : DB, Gain d'énergie solaire mensuelle

Scénario A-3, triple vitrage basse émissivité sans isolation de parois

La consommation d'énergie :

Le total d'énergie nécessaire pour le scénario A2 s'élève à 22 845 kWh/an, soit 74 % de moins que dans la situation existante. Pour une surface de plancher chauffée de 492 m², cela équivaut à une consommation spécifique de 46 kWh/an·m². Dans une maison passive, la consommation de chauffage recommandée est de 15 kWh/an·m² (Maison passive, s.d.). Dans notre cas, on est bien loin de cette norme.

Scénario A0

Consommation gaz = **77.970KWh**

Consommation électricité = **8.427 KWh**

Scénario A3

Consommation gaz = **11.657 KWh**

Consommation électricité = **11.188 KWh**

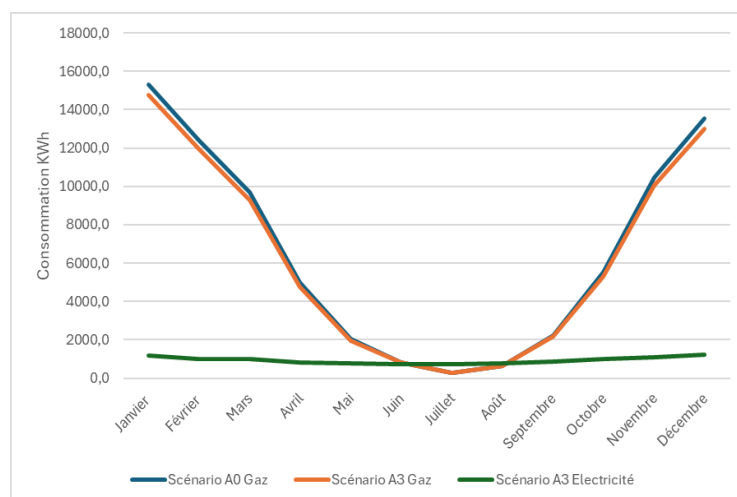


Figure 5-10 : DB, consommation mensuelle d'énergie

Comme indiqué, le total comprend une consommation de gaz de 11 657 kWh/an et une consommation d'électricité presque équivalente, à 11 188 kWh/an. Une réduction de l'énergie est constatée dans ce scénario, notamment grâce aux triples vitrages bas émissifs. Elle varie de presque 0 kWh en juillet-août et atteint une valeur maximale de 3 500 kWh durant les mois d'hiver. Cette variation est principalement due à la performance des vitrages, malgré le manque d'isolation des parois extérieures.

La diminution de la consommation de gaz pour ce scénario est donc modérée, et l'effet se ressent davantage en saison froide (voir figure 5-10).

Le confort thermique :

La figure 5-11 présente les températures opératives évaluées pour le scénario A3. En été, la température moyenne de 38,5 °C a augmenté de 3,9 °C par rapport à la situation de base et est nettement plus élevée que la norme, qui est de 25 °C. La température maximale annuelle de 40,2 °C a également augmenté de 4,1 °C. Une surchauffe n'a pas été observée, car la température élevée ne dépasse 25 °C que pour 3 % de l'année, ce qui est toujours inférieur à 5 %, comme recommandé.

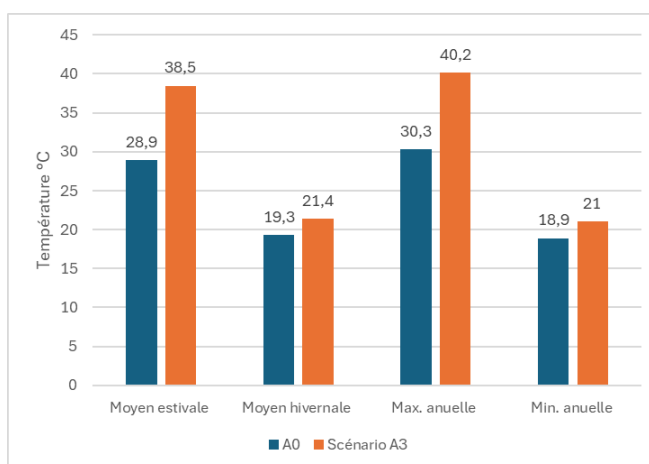


Figure 5-11 : DB, température opérative

Cependant, la différence entre le cas de base et le scénario A3 est de 1,8 % du nombre de mois. En hiver, la température moyenne de 21,4 °C et la température minimale annuelle de 21 °C ont augmenté de presque 1,5 °C.

Les triples vitrages bas émissifs reflètent la lumière et ont une capacité d'isolation plus grande que dans les scénarios précédents. Cependant, cette performance accrue augmente la température de confort en été (voir figure 5-16).

Gain d'énergie solaire :

Le gain solaire atteint son maximum en juillet, près de 1 000 kWh, ce qui représente 88 % de moins que dans le cas de base. Le minimum est observé en décembre, près de 124 kWh. Comme le montre la figure 5-12, les besoins en chauffage diminuent durant l'été et atteignent zéro pendant une période plus longue que dans la situation existante.

Le total d'énergie nécessaire pour le chauffage des logements est de 9 788 kWh, avec un gain solaire de 7 144 kWh. Cette valeur équivaut à 73 % de l'énergie de chauffage nécessaire.

Scénario A0

Gain solaire = **62.074 kWh**

Chauffage nécessaire = **65.566 kWh**

Scénario A3

Gain solaire = **7.144 kWh**

Chauffage nécessaire = **9.788 kWh**

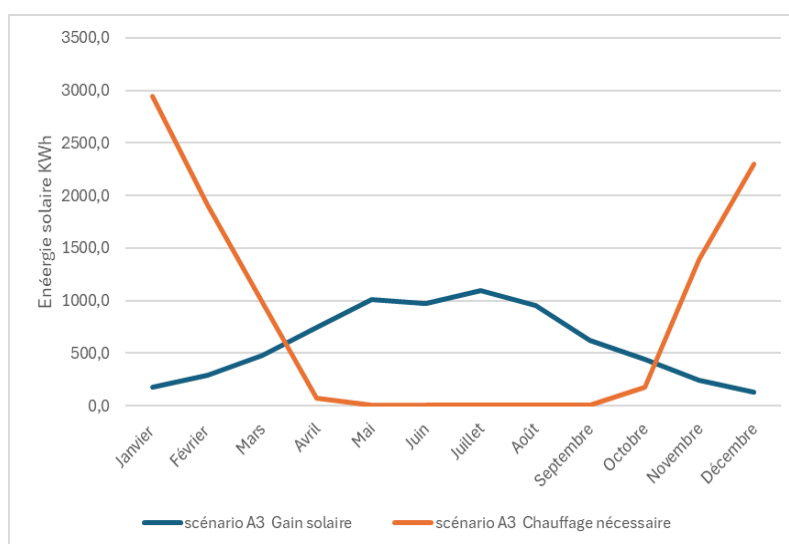


Figure 5-12 : DB, Gain d'énergie solaire mensuelle

Scénario A-4, triple vitrage pariétodynamique sans isolation de parois

La consommation d'énergie :

L'énergie totale requise pour le scénario A4 atteint **71 533 kWh/an**, soit une diminution de 17 % par rapport à la situation A0. Avec une surface de plancher chauffée de 492 m², cela correspond à une consommation spécifique de 145 kWh/an·m². Comme indiqué, le total comprend une consommation de gaz de 64 229 kWh/an et une consommation d'électricité de 7 304 kWh/an.

La consommation varie d'environ 200 kWh en juillet à un maximum de 12 000 kWh en janvier. Cette hausse de l'énergie est attribuée à l'utilisation de triples vitrages pariétodynamiques, qui assurent une ventilation constante. L'absence d'isolation des parois extérieures peut être une des raisons de la consommation élevée dans le cas A4.

La réduction de la consommation de gaz dans ce scénario reste modérée, avec un impact plus marqué en période hivernale (voir figure 5-20).

Scénario A0

Consommation gaz = 77.970KWh

Consommation électricité = 8.427 KWh

Scénario A4

Consommation gaz = 64.229 KWh

Consommation électricité = 7.304 KWh

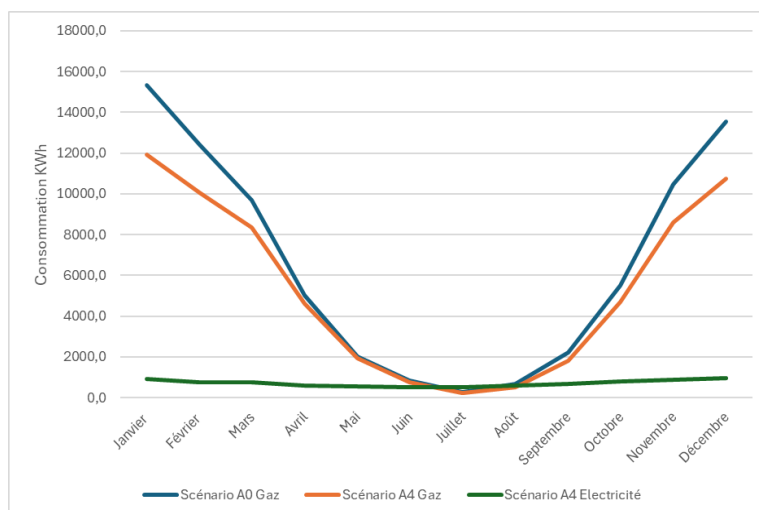


Figure 5-13 : DB, consommation mensuelle d'énergie

Le confort thermique :

La figure 5-14 présente les températures opératives évaluées pour le scénario A4. En été, la température moyenne de 27,1 °C a diminué de 7,5 °C par rapport à la situation de base, mais elle reste plus élevée que la norme, qui est de 25 °C. La température maximale annuelle de 28,3 °C a également diminué de 2 °C. Une surchauffe n'est pas observée, car la température élevée se maintient pour **0,92 %** de l'année, ce qui est toujours inférieur à 5 %, comme recommandé. Cependant, la différence entre le scénario A4 et le cas de base est de 0,31 % de moins. En hiver, la température moyenne est de 17,9 °C et la température minimale annuelle est de 17,4 °C.

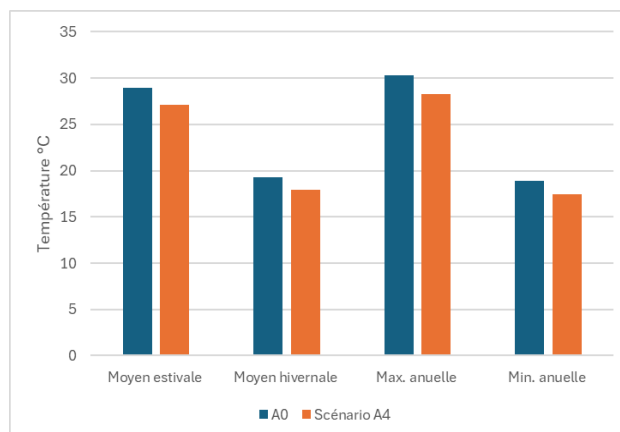


Figure 5-14 : DB, température opérative

Gain d'énergie solaire :

Le gain solaire atteint son maximum durant l'été, avec près de 5 000 kWh, et le minimum est observé en décembre, avoisinant les 700 kWh. Comme le montre la figure 5-15, les besoins en chauffage diminuent pendant l'été, atteignant 0 kWh durant une période plus courte (juillet-août).

Le gain solaire annuel est réduit de moitié par rapport au cas de référence, tandis que les besoins en chauffage augmentent de 19 %. Dans le scénario A4, les triples vitrages pariétodynamiques contribuent à améliorer le confort thermique en été, mais entraînent une augmentation de la consommation de gaz pour le chauffage (voir figure 5-22).

Scénario A0

Gain solaire = **62.074 kWh**

Chauffage nécessaire = **65.566 kWh**

Scénario A4

Gain solaire = **34.000 kWh**

Chauffage nécessaire = **54.141 kWh**

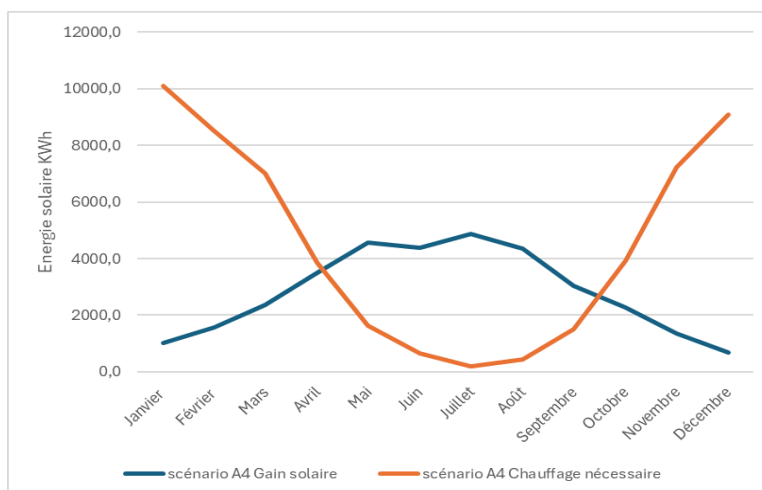


Figure 5-15 : DB, Gain d'énergie solaire mensuelle

Scénario B-1, double vitrage simple avec isolation côté intérieur de parois

La consommation d'énergie :

Scénario A0

Consommation gaz = **77.970 kWh**

Consommation électricité
= **8.427 kWh**

Scénario B1

Consommation gaz = **67.958 kWh**

Consommation électricité
= **8.314 kWh**

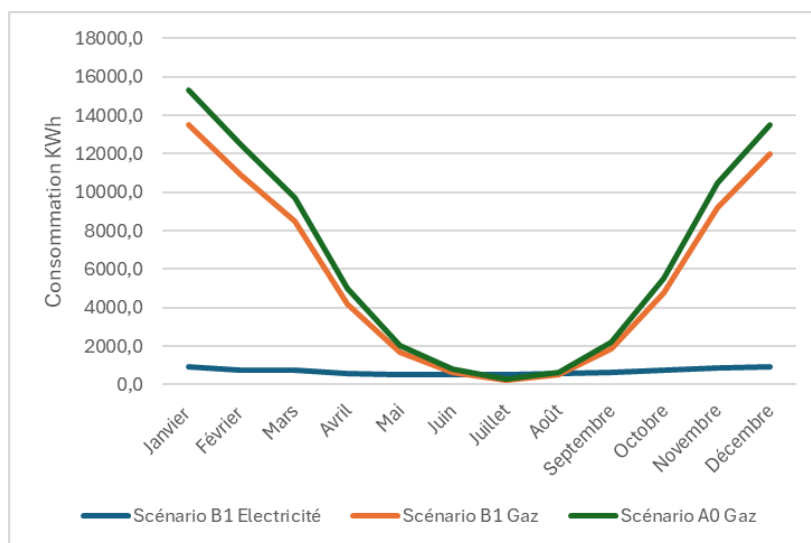


Figure 5-16 : DB, consommation mensuelle d'énergie

L'énergie totale requise pour le scénario B1 atteint **76 272 kWh/an**, soit une diminution de 12 % par rapport à la situation A0. Avec une surface de plancher chauffée de 492 m², cela correspond à une consommation spécifique de 155 kWh/an·m². Comme indiqué, le total comprend une consommation de gaz de 67 958 kWh/an et une consommation d'électricité de 8 314 kWh/an.

La consommation varie d'environ 500 kWh en période estivale à un maximum de 13 500 kWh en janvier. Malgré une isolation et un double vitrage, la consommation d'énergie reste élevée. La réduction de la consommation de gaz dans ce scénario reste modérée, avec un impact plus marqué en période hivernale (voir figure 5-16).

Le confort thermique :

La figure 5-17 présente les températures opératives évaluées pour le scénario B1. En été, la température moyenne est de 29,6 °C, avec très peu de différence par rapport au cas A0. Elle reste toutefois plus élevée que la norme, qui est de 25 °C. La température maximale annuelle de 31 °C a augmenté de 1,3 °C. Théoriquement, une surchauffe n'est pas observée, car la température élevée est enregistrée pendant trois mois, soit **1,23 %** de l'année, ce qui est toujours inférieur à 5 %, comme recommandé.

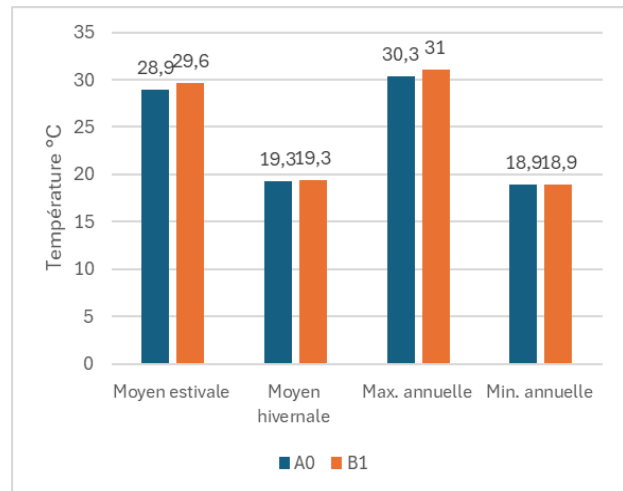


Figure 5-17 : DB, température opérative

Cependant, il n'y a pas de différence notable entre le scénario B1 et le cas A0. Ainsi, nous n'observons pas d'amélioration au niveau du confort thermique malgré l'utilisation d'un isolant et de double vitrage. La raison pourrait être la position de l'isolant et le manque de ventilation adéquate.

En hiver, la température moyenne est de 17,9 °C, et la température minimale annuelle est de 17,4 °C.

Gain d'énergie solaire :

Le gain solaire atteint son maximum durant l'été, avec près de 8 000 kWh, et le minimum est observé en décembre, avoisinant les 1 200 kWh. Comme le montre la figure 5-18, les besoins en chauffage diminuent pendant l'été, atteignant zéro kWh durant une période plus courte en juillet-août.

Le gain solaire annuel est réduit de **1,2 %** par rapport au cas de référence (A0), tandis que les besoins en chauffage **augmentent de 13 %**.

Scénario A0

Gain solaire = **62.074 kWh**

Chauffage nécessaire = **65.566 kWh**

Scénario A4

Gain solaire = **61.282 kWh**

Chauffage nécessaire = **57.100 kWh**

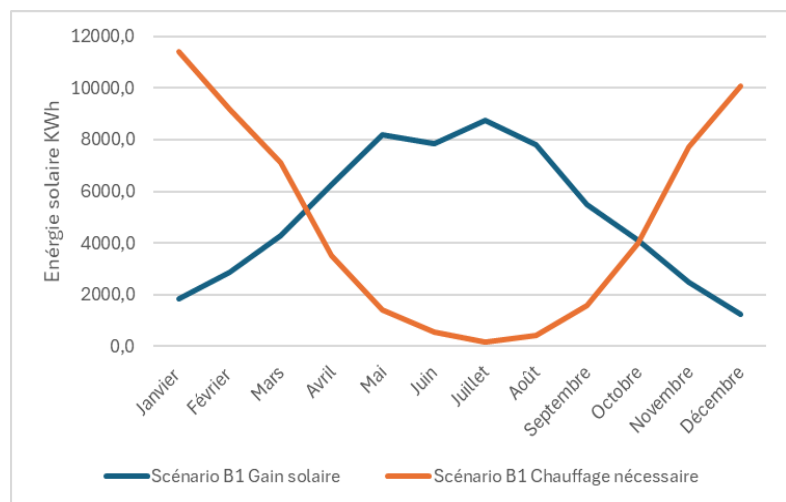


Figure 5-18 : DB, Gain d'énergie solaire mensuelle

Scénario B-2, double vitrage électrochrome avec isolation côté intérieur de parois

La consommation d'énergie :

Scénario A0

Consommation gaz = **77.970 kWh**

Consommation électricité = **8.427 kWh**

Scénario B2

Consommation gaz = **26.970 kWh**

Consommation électricité = **8.427 kWh**

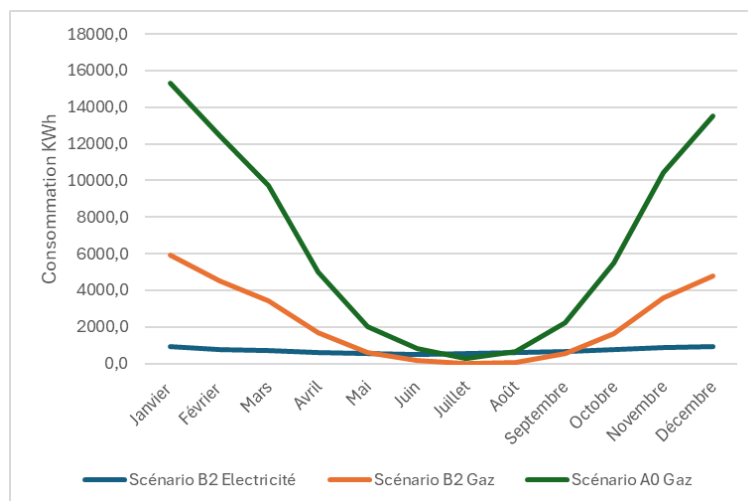


Figure 5-19 : DB, consommation mensuelle d'énergie

L'énergie totale requise pour le scénario B1 atteint **35 397 kWh/an**, soit une diminution de 59 % par rapport à la situation de base. Avec une surface de plancher chauffée de 492 m², cela correspond à une consommation spécifique de 71,3 kWh/an·m². Comme illustré dans la figure 5-24, ce total comprend une consommation de gaz de 26 970 kWh/an et une consommation d'électricité de 8 427 kWh/an. La différence entre les deux cas est remarquable : la présence d'un isolant et d'un vitrage plus performant a un impact plus important sur la consommation annuelle.

La consommation varie d'environ 0 kWh en juillet à un maximum de 6 000 kWh en janvier.

La réduction de la consommation de gaz dans ce scénario reste importante, avec un impact plus marqué en période hivernale (voir figure 5-19).

Le confort thermique :

La figure 5-20 présente les températures opératives évaluées pour le scénario B2. En été, la température moyenne est de 28,4 °C, ce qui représente une diminution de 6,2 °C par rapport à la situation de base. Cependant, elle reste plus élevée que la norme recommandée de 25 °C. La température maximale annuelle de 29,6 °C a également diminué de 6,5 °C. Une surchauffe n'est pas observée, car la température dépasse 25 °C seulement pendant 3 mois de l'année, soit 1,23 % de l'année, ce qui est toujours inférieur à 5 %, comme recommandé.

Cependant, il n'y a pas de différence notable entre le scénario B2 et le cas de base (A0). Les deux présentent une période chaude de 1,23 % pendant l'année. En hiver, la température moyenne est de 20,2 °C, et la température minimale annuelle atteint 19,9 °C.

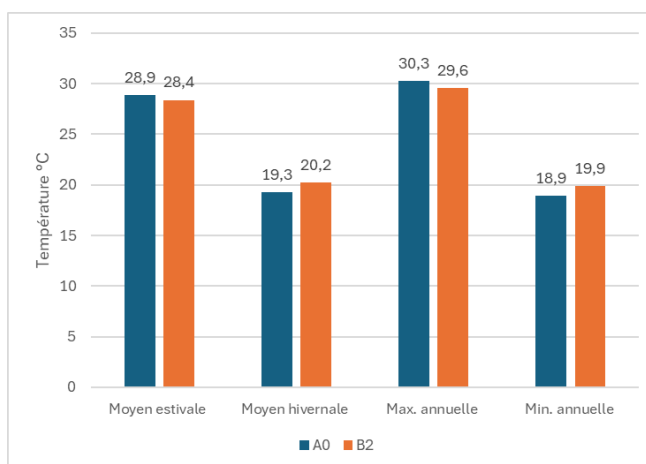


Figure 5-20 : DB, température opérative

Gain d'énergie solaire :

Le gain solaire atteint son maximum durant l'été, avec près de 2 000 kWh, et son minimum est observé en décembre, près de 1 000 kWh.

Comme indiqué, les besoins en chauffage pour le cas B2 ont diminué de presque un tiers par rapport au cas A0. La situation est similaire pour les besoins en chauffage.

L'énergie totale nécessaire pour chauffer les logements est de 20 676 kWh, avec un gain solaire de 20 344 kWh, ce qui équivaut à 98 % des besoins en chauffage.

Dans le scénario B2, les vitrages électrochromes ont la capacité de diminuer l'apport thermique du soleil et d'améliorer le confort d'été.

Scénario A0

Gain solaire = 62.074 KWh

Chauffage nécessaire = 65.566 KWh

Scénario B2

Gain solaire = 20.344 KWh

Chauffage nécessaire = 20.676 KWh

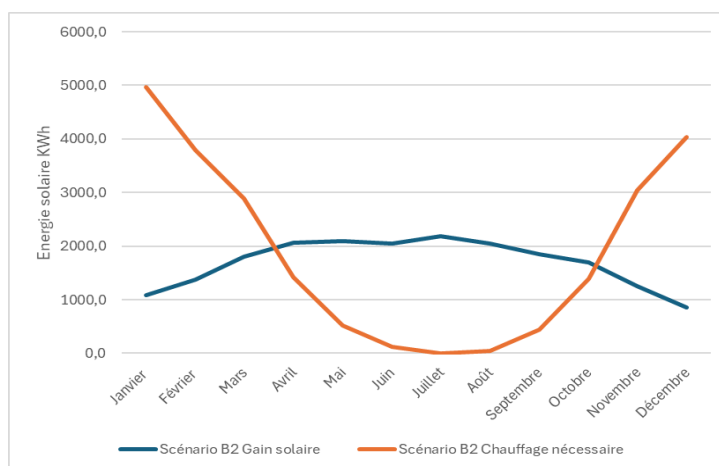


Figure 5-21 : DB, Gain d'énergie solaire mensuelle

Scénario B-3, triple vitrage basse émissivité avec isolation côté intérieur de parois

La consommation d'énergie :

L'énergie totale requise pour le scénario B3 atteint 13 496 kWh/an, soit une diminution considérable de 84 % par rapport à la situation de base A0. Avec une surface de plancher chauffée de 492 m², cela correspond à une consommation spécifique de 27,4 kWh/an·m². Cette valeur est supérieure à la valeur recommandée de 15 kWh/an·m² pour une maison passive (Maison passive, s.d.). La consommation varie d'environ 0 kWh pendant une période de quatre mois à un maximum de 2 500 kWh en janvier. La réduction de la consommation de gaz dans ce scénario reste importante, avec un impact plus marqué en période hivernale (voir figure 5-22).

Scénario A0

Consommation gaz = 77.970KWh

Consommation électricité

= 8.427 KWh

Scénario B3

Consommation gaz = 6.087 KWh

Consommation électricité

= 7.409 KWh

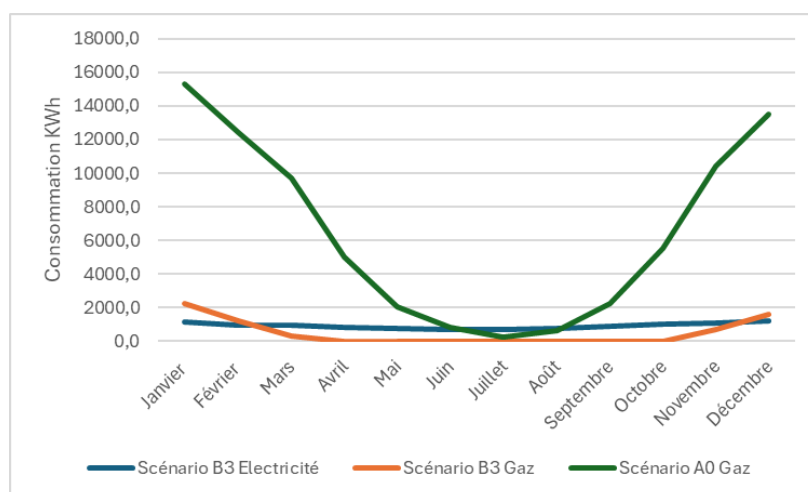


Figure 5-22 : DB, consommation mensuelle d'énergie

Le confort thermique :

La figure 5-23 présente les températures opératives évaluées pour le scénario B3. En été, la température moyenne est de 44,7 °C, ce qui représente une augmentation de 10 °C par rapport à la situation de base et dépasse la norme recommandée de 25 °C. La température maximale annuelle de 46,8 °C a également augmenté de 10,7 °C.

Théoriquement, une surchauffe n'est pas observée, car la température dépasse 25 °C pendant presque la moitié de l'année, soit **3 %** du temps annuel, ce qui est toujours inférieur à 5 %, comme recommandé. Cependant, ces températures ne sont pas négligeables pour la période estivale. La différence annuelle entre le scénario B3 et le cas de base est de **1,77 % de plus**.

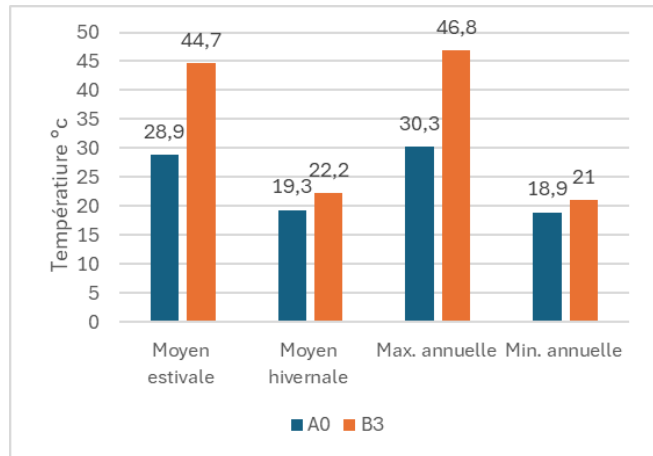


Figure 5-23 : DB, température opérative

En hiver, la température moyenne est de 22,2 °C, et la température minimale annuelle est de 21 °C. Cette hausse pourrait être liée à l'installation d'isolants et de triples vitrages. Ces équipements restreignent les échanges de chaleur et d'air. L'installation d'un système de ventilation est donc indispensable pour assurer un confort optimal durant l'été.

Gain d'énergie solaire :

Le gain solaire est réduit de manière significative de 88 % par rapport au cas de référence. Son minimum est observé en décembre et atteint presque la valeur de 0 kWh.

Comme le montre la figure 5-33, le chauffage est recommandé seulement pour les périodes hivernales, atteignant sa valeur maximale de 2 000 kWh. Le gain solaire annuel est réduit de presque 67 % par rapport au cas de référence A0. En revanche, la différence entre le gain solaire et les besoins en chauffage pour le cas B3 est très faible.

Scénario A0

Gain solaire = **62.074 kWh**
Chauffage nécessaire = **65.566 kWh**

Scénario B3

Gain solaire = **20.344 kWh**
Chauffage nécessaire = **20.676 kWh**

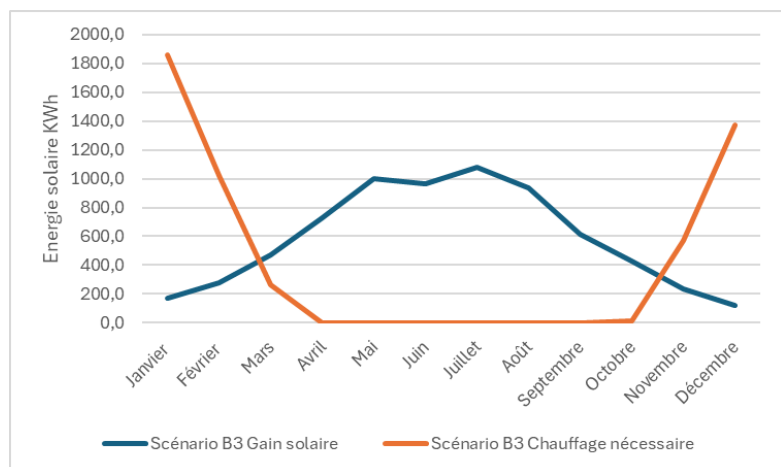


Figure 5-24 : DB, Gain d'énergie solaire mensuelle

Scénario B-4, triple vitrage pariétodynamique avec isolation côté intérieur de parois

La consommation d'énergie :

Scénario A0

Consommation gaz

= 77.970 kWh

Consommation électricité

= 8.427 kWh

Scénario B4

Consommation gaz

= 51.360 kWh

Consommation électricité

= 7.304 kWh

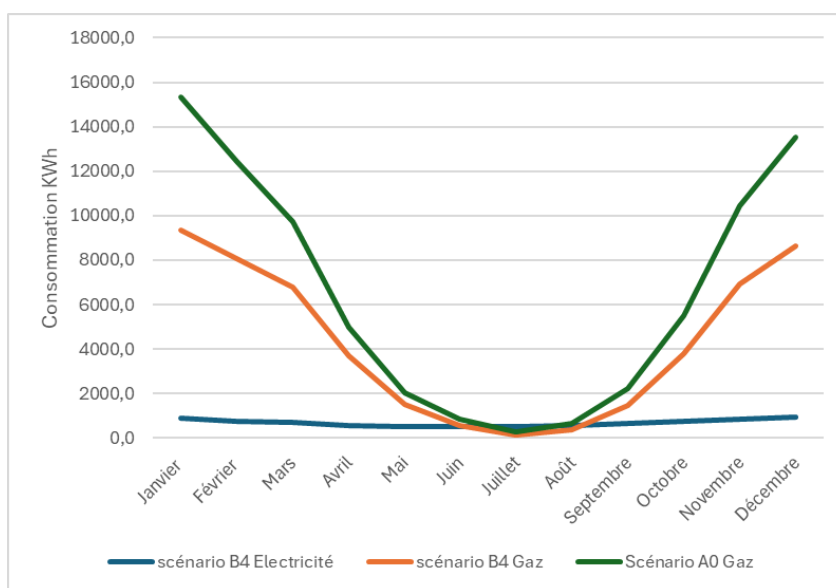


Figure 5-25 : DB, consommation mensuelle d'énergie

La consommation d'énergie totale pour le scénario B4 s'élève à 57 664 kWh/an, soit 33 % de moins que la situation existante A0. Pour une surface de plancher chauffée de 492 m², cela correspond à une consommation spécifique de 117 kWh/an·m². Comme indiqué, ce total comprend une consommation de gaz de 51 360 kWh/an et une consommation d'électricité de 7 304 kWh/an.

Malgré la présence d'un isolant et de vitrages performants, la consommation annuelle de gaz n'atteint pas la valeur idéale de 25 kWh/an·m².

La consommation varie d'environ 150 kWh en juillet à presque 9 000 kWh en janvier. Ce phénomène peut s'expliquer par le fonctionnement des vitrages pariétodynamiques, qui permettent une ventilation continue du logement. Ce phénomène peut être compensé par une analyse du confort d'été.

Le confort thermique :

La figure 5-26 présente les températures opératives évaluées pour le scénario B4. En été, la température moyenne est de 27,6 °C, ce qui représente une diminution de 1,3 °C par rapport à la situation de base, mais dépasse de 2,6 °C la norme recommandée de 25 °C. La température maximale annuelle de 28,9 °C a également baissé de 1,4 °C. Théoriquement, une surchauffe n'est pas observée, car la température dépasse 25 °C pendant deux mois de l'année, soit 0,82 % du temps, ce qui est toujours inférieur à 5 %, comme recommandé. En hiver, la température moyenne est de 17,2 °C, et la température minimale annuelle est de 16,5 °C. Cette amélioration du confort pourrait être liée à l'installation d'isolants et de triples vitrages pariétodynamiques. Ce vitrage permet les échanges d'air nécessaires à la ventilation du logement.

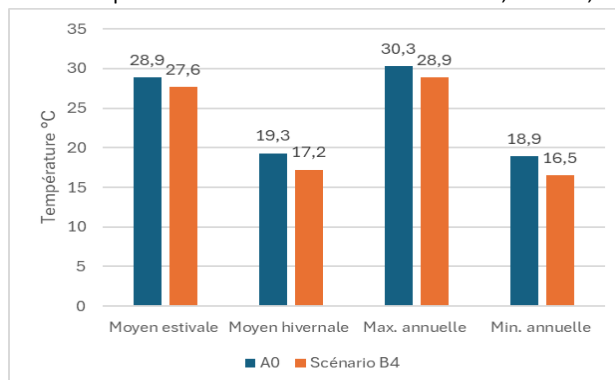


Figure 5-26 : DB, température opérative

Gain d'énergie solaire :

Scénario A0

Gain solaire = **62.074 KWh**

Chauffage nécessaire
= **65.566 KWh**

Scénario B4

Gain solaire = **20.343 KWh**

Chauffage nécessaire
= **22.656 KWh**

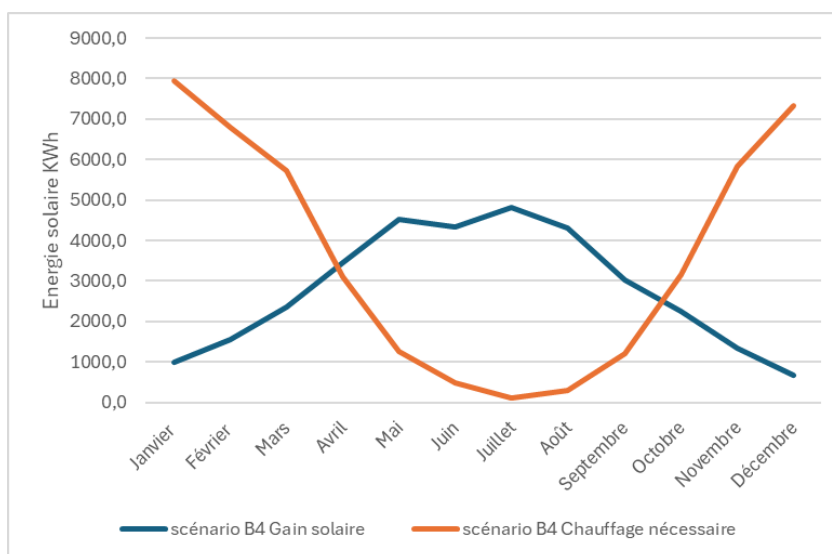


Figure 5-27 : DB, Gain d'énergie solaire mensuelle

Le gain solaire est réduit de manière significative, avec une diminution de presque un tiers par rapport au cas de référence A0. Son minimum est observé en décembre, atteignant la valeur de 700 kWh.

Comme le montre la figure 5-27, le chauffage est recommandé uniquement pour les périodes hivernales, atteignant sa valeur maximale de presque 8 000 kWh.

Scénario C-1, double vitrage simple avec isolation côté extérieur de parois

La consommation d'énergie :

Scénario A0

Consommation gaz = **77.970KWh**

Consommation électricité
= **8.427 KWh**

Scénario C1

Consommation gaz = **68.132 KWh**

Consommation électricité
= **8.314 KWh**

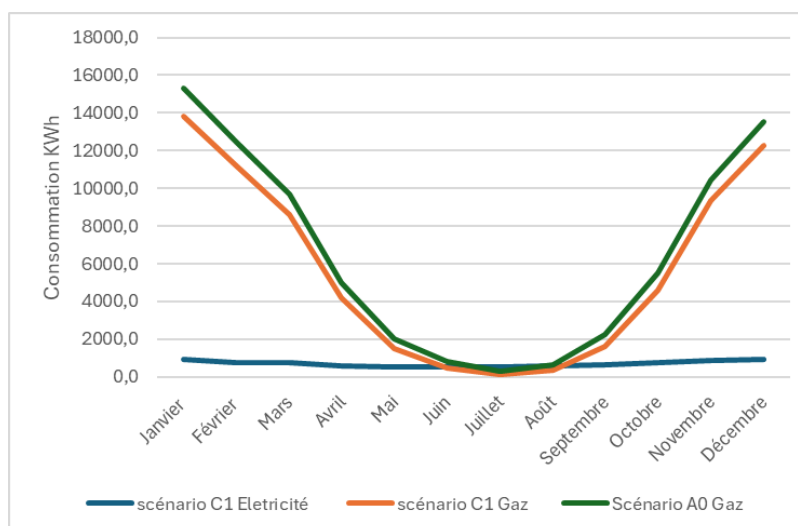


Figure 5-28 : DB, consommation mensuelle d'énergie

La consommation d'énergie totale obtenue pour le scénario C1 s'élève à **76.446 KWh/an**, soit **12 % de moins** que la situation existante. Pour une surface de plancher chauffée de 492 m², cela équivaut à une consommation spécifique de 119 KWh/an.m². Le total comprend une

consommation de gaz de 68.132 KWh/an et une consommation d'électricité identique de 8.314 kWh/an.

La présence d'un isolant et le vitrage performants la consommation annuelle de gaz reste élevé et n'atteint pas sa valeur idéale de 25 KWh/an.m²

La consommation varie d'environ 100 KWh en juillet à un maximum de presque 13.000 KWh en janvier. Ce phénomène peut s'expliquer par le fonctionnement de vitrage pariétodynamique qui permet d'avoir une ventilation en continue dans le logement. Elle peut être calibrer par la suite en analysant le confort d'été.

Le confort thermique :

La Figure 5-29 présente les températures opératives évaluées pour le scénario C1. En été, la moyenne des températures, 29.2°C ce qui a une petite diminution par rapport à la situation de base A0. Cependant sur le moyen annuel on remarque une légère diminution. (Voir Figure 5-29)

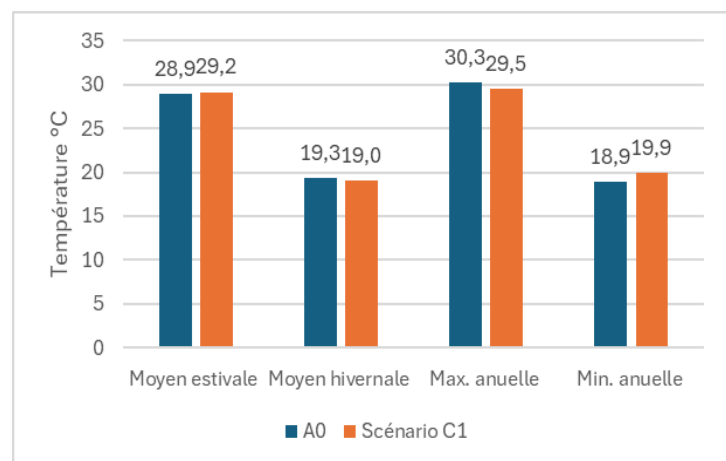


Figure 5-29 : DB, température opérative

Théoriquement une surchauffe n'est pas évoluée car la température est élevée de 25 °C pendant trois mois, elle présente **1.23%** du temps de l'année ce qui est toujours inférieur à 5%, comme recommandé. La différence annuelle entre le scénario C1 et A0 est nulle. En hiver, la moyenne des températures est de 19°C, et la température minimale annuelle est de 19.9 °C.

Gain d'énergie solaire :

Scénario A0

Gain solaire = **62.074 KWh**

Chauffage nécessaire

= **65.566 KWh**

Scénario C1

Gain solaire = **62.074 KWh**

Chauffage nécessaire

= **43.707 KWh**

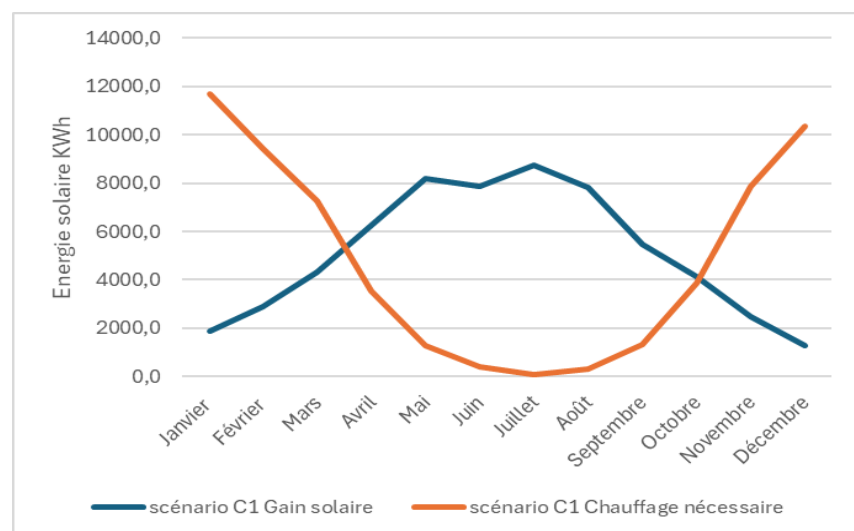


Figure 5-30 : DB, Gain d'énergie solaire mensuelle

Le gain solaire est identique au cas de référence, mais le besoin en **chauffage diminue** dans le cas C1 de **33%**.

Son minimum est observé en décembre, et atteint la valeur 1.200 KWh en hiver.

Comme le montre la Figure 5-30, le chauffage est recommandé seulement pour les périodes hivernales et touche sa valeur maximum de presque 11.600 KWh.

Scénario C-2, double vitrage électrochrome avec isolation côté extérieur de parois

La consommation d'énergie :

Total d'énergie nécessaire obtenue pour le scénario C2 s'élève à **34.439 KWh/an**, soit **60 %** de moins que la situation existante A0. Pour une surface de plancher chauffée de 492m², cela équivaut à une consommation spécifique de 70 KWh/an.m². Dans une maison passive la consommation de chauffage recommandé est de 15KWh/an.m² (Maison passive, s.d.). Dans ce scénario nous sommes 4 fois plus que la norme.

Scénario A0

Consommation gaz = **77.970KWh**

Consommation électricité

= **8.427 KWh**

Scénario C2

Consommation gaz = **26.939 KWh**

Consommation électricité

= **7.500 KWh**

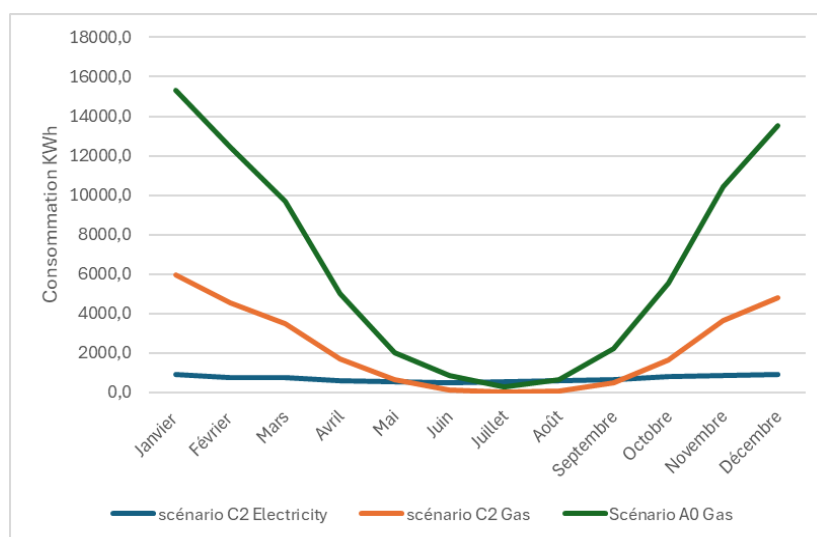


Figure 5-31 : DB, consommation mensuelle d'énergie

Une réduction de l'énergie pour le chauffage est prévue dans ce scénario, grâce à l'installation de vitrages plus performants et une isolation extérieure. Cette amélioration aide également à obtenir le confort d'été.

Le total d'énergie est composé de 26.939 KWh pour le gaz et 7.500 KWh pour l'électricité. Le besoin du chauffage varie de presque 0 KWh en juin-août à 6.000 KWh durant les mois d'hiver.

Le confort thermique :

La Figure 5-32 présente les températures opératives évaluées pour le scénario C2. En été, la moyenne des températures, 28,4°C identique au cas A0, elle reste plus élevée que la norme recommandée 25°C.

La température maximale annuelle 29,5 °C. Une surchauffe n'est pas évoluée car la température est élevée de que 25 °C pendant 3 mois de l'année soit la période estivale, elle

présente **1,23 %** de l'année ce qui est toujours inférieur à 5%, comme recommandé. Cependant la différence entre le scénario C1 et le cas A0 est nulle.

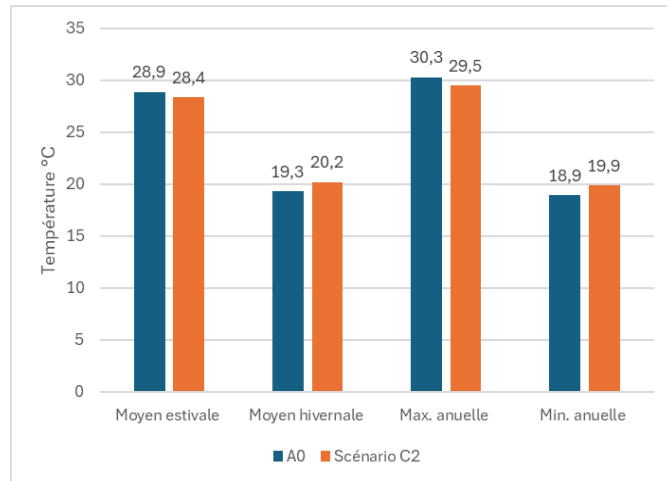


Figure 5-32 : DB, température opérative

Gain d'énergie solaire :

Le gain solaire **33.641KWh** atteint une réduction de **48 %** par rapport au cas de référence, son minimum est observé en décembre près de 900kWh et son maximum et juillet près de 2.200 KWh.

L'énergie totale nécessaire pour chauffer les logements est de 43.274 KWh ce qui a une **diminution de 34%**.

Dans le scénario C2, les vitrages électrochromes ont la capacité d'améliorer le confort thermique en été en reflétant les rayons solaires. Vu la présence de l'isolant la consommation pour le chauffage diminue également contrairement à la situation A2 où nous avons eu également un gain solaire moins important mais une augmentation de consommation de gaz pour la raison de manque d'isolant.

Scénario A0

Gain solaire = **62.074 KWh**

Chauffage nécessaire

= **65.566 KWh**

Scénario C2

Gain solaire = **33.641 KWh**

Chauffage nécessaire

= **43.274 KWh**

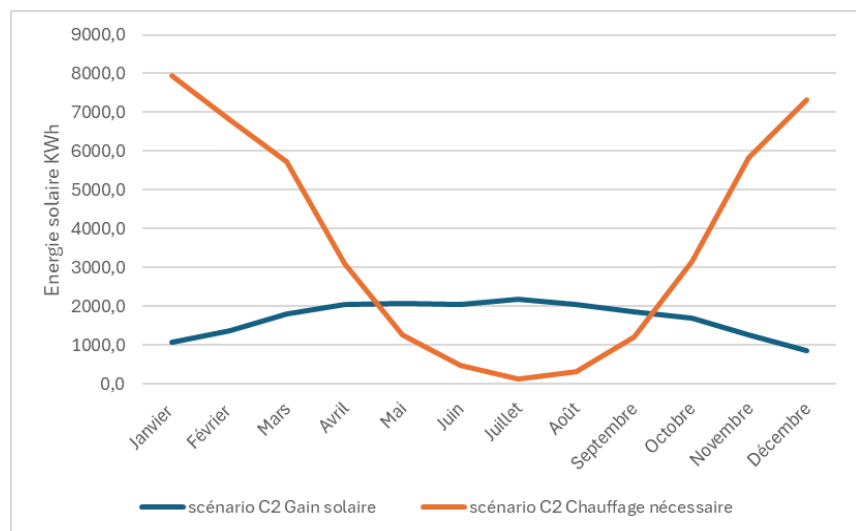


Figure 5-33 : DB, Gain d'énergie solaire mensuelle

Scénario C-3, triple vitrage basse émissivité avec isolation côté extérieur de parois

La consommation d'énergie :

L'énergie totale requise pour le scénario C3 atteint **13 597 kWh/an**, soit une diminution considérable de 83 % par rapport à la situation de base. Avec une surface de plancher chauffée de 492 m², cela correspond à une consommation spécifique de 28 kWh/an·m². Cette valeur est bien supérieure à la valeur recommandée de 15 kWh/an·m² pour une maison passive (Maison passive, s.d.).

La consommation varie d'environ 0 kWh pendant une période de sept mois de l'année, avec un maximum de 2 000 kWh en janvier et décembre. La réduction de la consommation annuelle de gaz dans ce scénario est très importante, avec une différence de 84 % de moins par rapport au cas A0.

Scénario A0

Consommation gaz

= **77.970KWh**

Consommation électricité

= **8.427 KWh**

Scénario C2

Consommation gaz

= **6.097 KWh**

Consommation électricité

= **7.500 KWh**

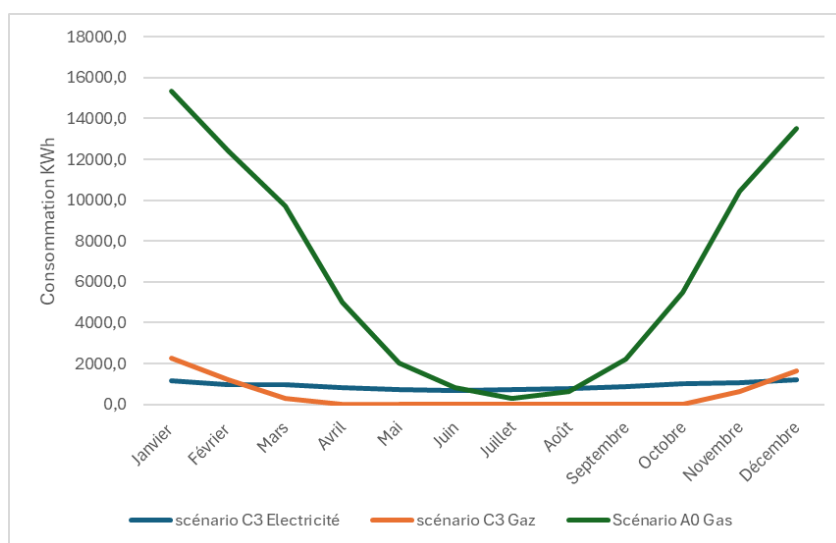


Figure 5-34 : DB, consommation mensuelle d'énergie

Le confort thermique :

La figure 5-35 présente les températures opératives évaluées pour le scénario C3. En été, la température moyenne est de 27,6 °C, soit une diminution de 7 °C par rapport à la situation de base, mais elle reste supérieure à la norme recommandée de 25 °C. La température maximale annuelle, de 28,9 °C, a également diminué de 7,2 °C. Théoriquement, une surchauffe n'est pas observée, car la température dépasse 25 °C pendant quatre mois de l'année, représentant **1,6 %** du temps annuel, ce qui reste inférieur à la recommandation de 5 %. Cependant, les températures doivent encore diminuer pour respecter les normes. Le confort dans ce scénario pourrait être amélioré en ajoutant une ventilation mécanique. La différence annuelle entre le scénario C2 et le cas de base est de 0,37 %.

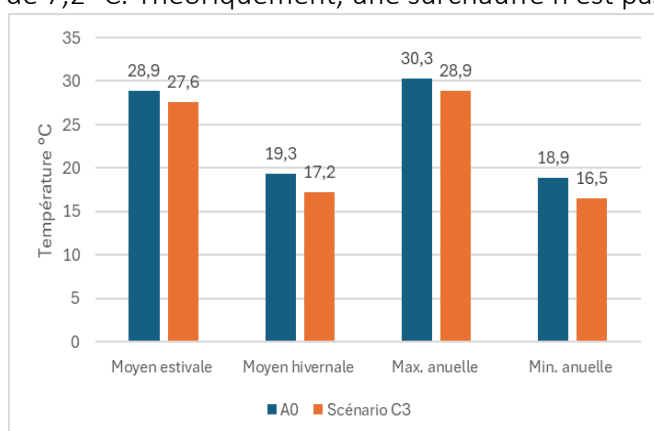


Figure 5-35 : DB, température opérative

Gain d'énergie solaire :

Scénario A0

Gain solaire = **62.074 kWh**

Chauffage nécessaire

= **65.566 kWh**

Scénario C2

Gain solaire = **7.039 kWh**

Chauffage nécessaire

= **22.656 kWh**

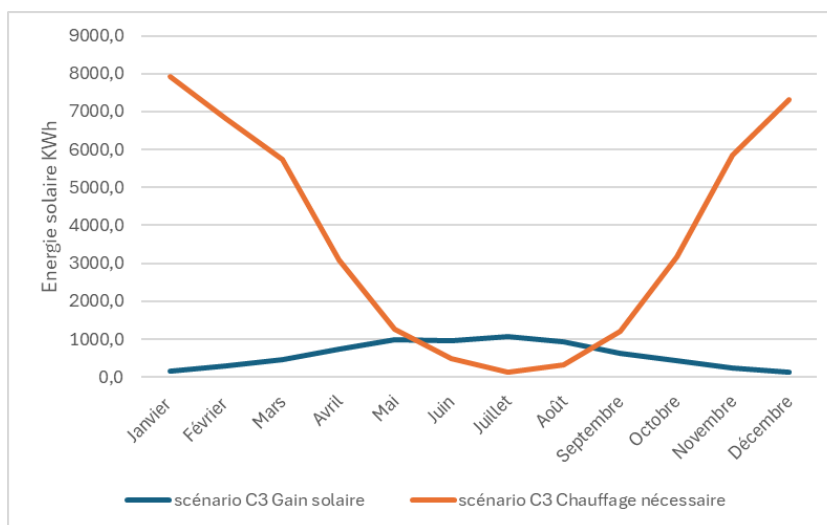


Figure 5-36 : DB, Gain d'énergie solaire mensuelle

Le gain solaire subit une réduction importante de 89 % par rapport au cas de référence. Son minimum est observé en décembre, atteignant presque 0 kWh. Comme le montre la figure 5-36, le chauffage est recommandé uniquement pour les périodes hivernales, avec un maximum de 1 000 kWh. Le gain solaire annuel est de 7 039 kWh, soit 31 %, tandis que l'énergie totale nécessaire pour chauffer les logements est de 22 656 kWh. La raison de cette demande accrue de chauffage pourrait être la réduction du gain solaire, ce qui signifie moins d'énergie gratuite disponible !

Scénario C-4, triple vitrage pariétodynamique avec isolation côté extérieur de parois

La consommation d'énergie :

La consommation d'énergie totale obtenue pour le scénario C4 s'élève à **58 696 kWh/an**, soit **28 % de moins** que dans la situation existante. Pour une surface de plancher chauffée de 492 m², cela équivaut à une consommation spécifique de 119 kWh/an.m². Le total inclut une consommation de gaz de 51 196 kWh/an et une consommation d'électricité de 7 500 kWh/an. La diminution de la consommation de gaz par rapport au cas A0, soit une réduction de 32 %, reste modérée, avec un effet plus marqué pendant la saison froide (voir figure 5-37).

Scénario A0

Consommation gaz = 77.970KWh

Consommation électricité

= 8.427 KWh

Scénario C2

Consommation gaz = 51.196 KWh

Consommation électricité

= 7.500 KWh

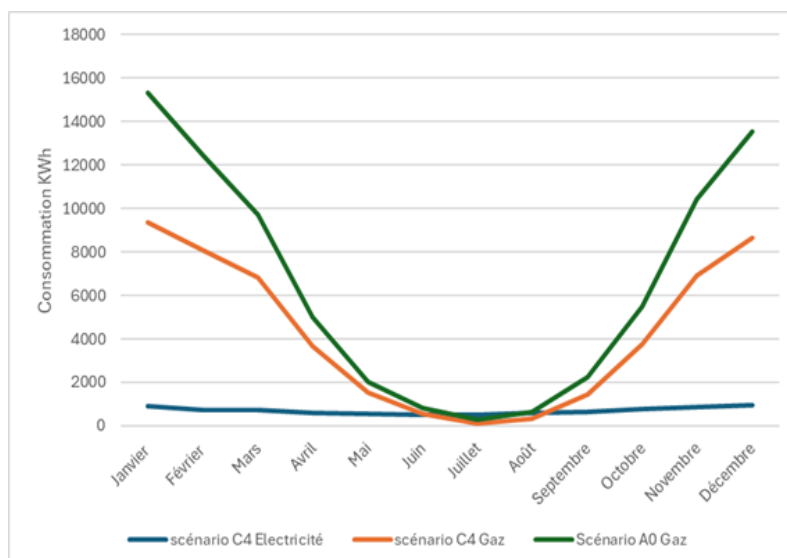


Figure 5-37 : DB, consommation mensuelle d'énergie

La consommation varie d'environ 150 kWh en juillet à un maximum de presque 9 500 kWh en janvier. Ce phénomène peut s'expliquer par le fonctionnement des vitrages pariétodynamiques, qui permettent une ventilation continue du logement. Cette consommation pourrait être compensée par une analyse plus approfondie du confort en été.

Le confort thermique :

La Figure 5-38 présente les températures opératives évaluées pour le scénario C4. En été, la moyenne des températures est de 28 °C, ce qui représente une diminution de 6,6 °C par rapport à la situation de base, mais elle dépasse de 3 degrés la norme recommandée de 25 °C. Théoriquement, une surchauffe n'est pas constatée, car la température dépasse 25 °C pendant deux mois de l'année, ce qui représente **0,82 %** du temps total, toujours inférieur à la limite recommandée de 5 %.

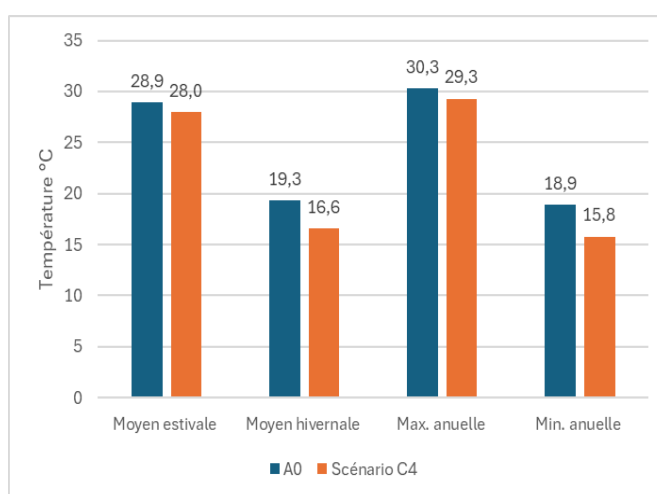


Figure 5-38 : DB, température opérative

La différence entre le scénario C4 et le cas de base A0 est de **0,41 %**. En hiver, la moyenne des températures est de 16,6 °C, et la température minimale annuelle est de 15,8 °C.

Cette amélioration du confort pourrait être liée à l'installation d'isolants et de vitrages triples pariétodynamiques. Ce type de vitrage permet un échange d'air pour la ventilation du logement. Pour un meilleur résultat, il serait conseillé d'installer une ventilation mécanique afin d'optimiser le confort thermique !

Gain d'énergie solaire :

Le gain solaire montre une réduction significative, presque de 50 % par rapport au cas de référence. Son minimum est atteint en décembre, avec une valeur proche de 0 kWh.

Comme l'illustre la Figure 5-39, le chauffage est principalement recommandé pour les périodes

hivernales, atteignant un maximum de près de 1.000 kWh en juillet-août. Dans le scénario C4, le gain solaire s'élève à 33.641 kWh, représentant environ 78 % des besoins en chauffage, qui totalisent 43.274 kWh.

Cette situation montre l'impact du vitrage pariétodynamique et des solutions d'isolation, tout en soulignant l'importance d'une gestion optimisée du chauffage pour maximiser l'efficacité énergétique.

Scénario A0

Gain solaire = **62.074 kWh**

Chauffage nécessaire
= **65.566 kWh**

Scénario C2

Gain solaire = **33.641 kWh**

Chauffage nécessaire
= **43.146 kWh**

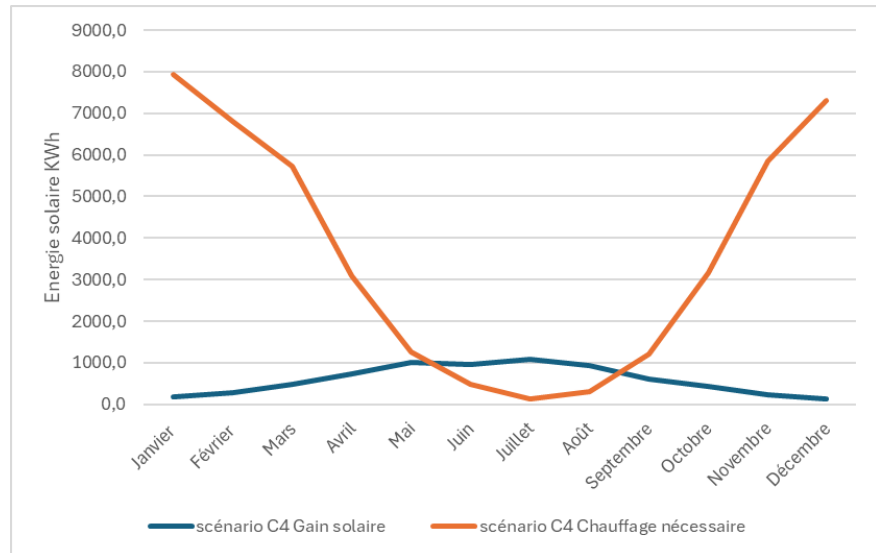


Figure 5-39 : DB, Gain d'énergie solaire mensuelle

4.2 Analyse comparative

Dans cette partie, nous procédons à une analyse approfondie des résultats obtenus à partir des différents scénarios envisagés. Nous comparons ces scénarios sous plusieurs aspects, notamment la consommation d'énergie annuelle, la température de confort ainsi que le gain solaire. L'objectif est de mettre en lumière les différences et similitudes entre les scénarios, en identifiant les plus performants en termes d'efficacité énergétique et de confort thermique. Cette comparaison permet de mieux comprendre l'impact des choix techniques ou architecturaux sur les performances globales du bâtiment, et ainsi d'orienter les décisions vers des solutions plus durables et optimisées.

La consommation d'énergie :

La Figure 5-40 présente une comparaison des résultats de consommation énergétique annuelle entre le cas de référence et les 13 scénarios analysés. Les résultats, classés du plus performant au moins performant, se présentent comme suit :

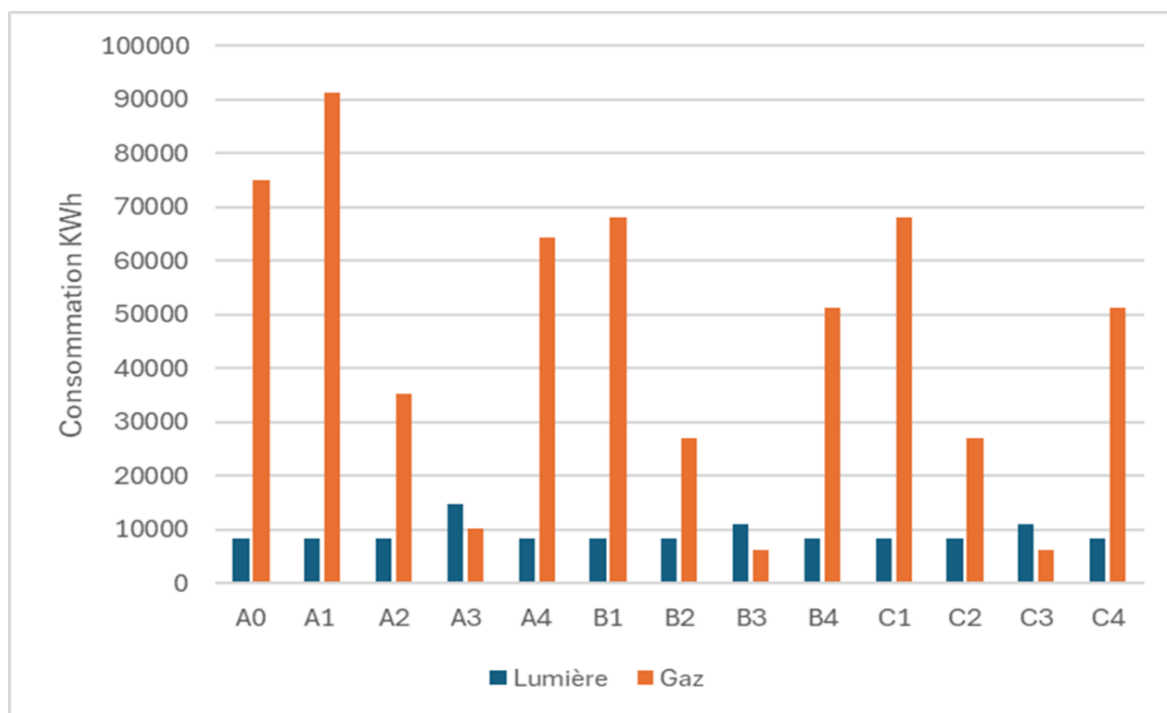


Figure 5-40 : DB, consommation annuelle

Scénarios	Lumière KWh	Gaz KWh	Total KWh
B3	11.027	6.087	17.114
C3	11.027	6.098	17.125
A3	14.646	10.193	24.839
C2	8.354	26.939	35.293
B2	8.354	26.966	35.320
A2	8.468	35.327	43.795
C4	8.268	51.195	59.463
B4	8.268	51.360	59.628
A4	8.383	64.229	72.612
B1	8.314	67.958	76.272
C1	8.314	68.132	76.446
A0	8.426	75.011	83.437
A1	8.304	91.260	99.564

Figure 5-41 : DB, tableau des données de consommation annuelle

Dans tous les scénarios, on observe une diminution de la consommation, plus ou moins importante. Le scénario B3, qui utilise une isolation intérieure et des vitrages électrochromes, arrive en première position. Avec une différence minimale, on trouve le scénario A3, qui utilise le même type de vitrage que B3. On remarque que le même type de vitrage, combiné avec une isolation, peut réduire la consommation de manière plus significative.

La consommation d'électricité reste relativement constante dans tous les scénarios. En effet, les paramètres de consommation d'électricité n'ont pas été modifiés ; cette consommation est uniquement influencée par le gain solaire.

Les scénarios de catégorie A, qui ne comportent pas d'isolation des parois, représentent les cas d'intervention les plus simples. Ils montrent des valeurs diverses, mais on note que la consommation peut diminuer de presque moitié si les vitrages sont performants, comme dans le cas A3 avec les triples vitrages bas émissifs. En revanche, un vitrage performant combiné à un système de ventilation intégré, sans isolation des parois, comme dans les scénarios A4, B4 et C4, entraîne une augmentation significative de la consommation, bien que celle-ci reste inférieure à celle du cas de base.

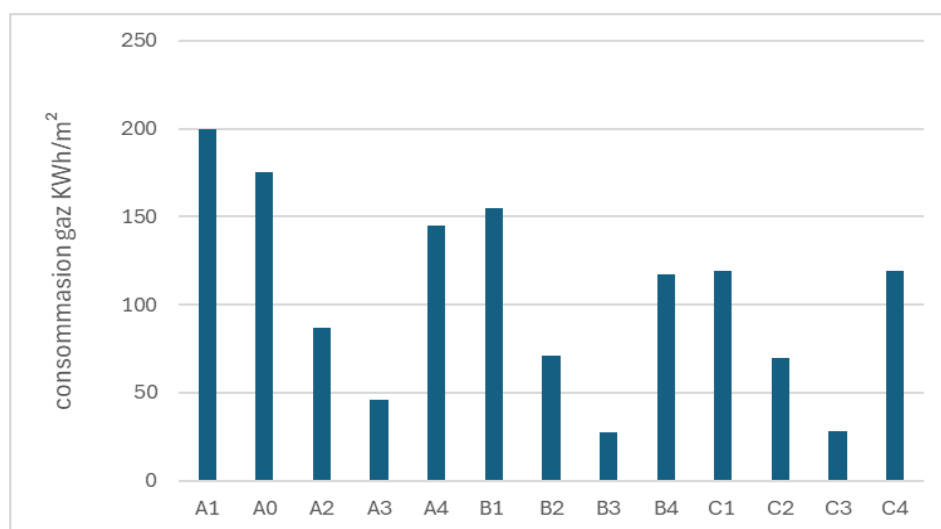


Figure 5-42 : DB, tableau des données de consommation en KWh/m².an

Le confort thermique :

Les températures opératives liées au confort estival pour tous les scénarios sont présentées dans la Figure 5-43. Bien que la température intérieure maximale observée au cours de l'année dépasse toujours 25°C, la température moyenne estivale reste en dessous de ce seuil. Les valeurs des différents scénarios sont relativement proches, se situant autour de 26°C. Cependant, les scénarios A2, B2 et la situation existante se distinguent avec une température moyenne d'environ 39°C. Ce phénomène s'explique par un niveau d'isolation plus élevé et des vitrages moins performants.

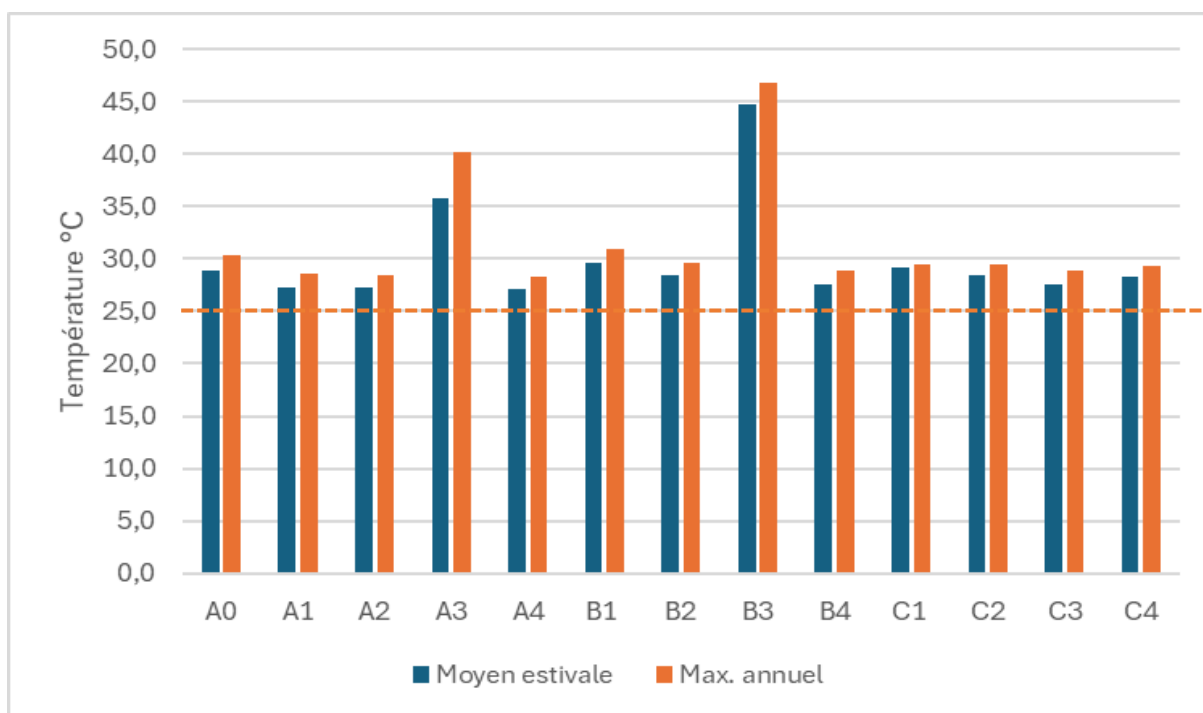


Figure 5-43 : DB, température opérative

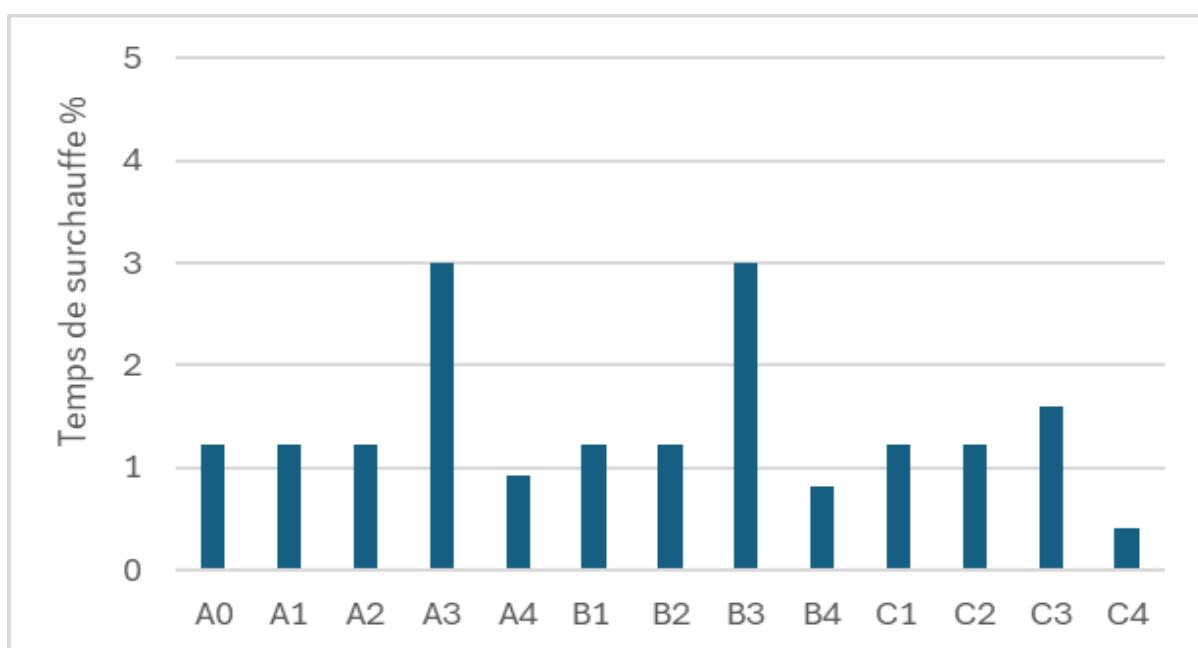


Figure 5-44 : DB, Temps de surchauffe

En été, la chaleur captée par les ouvertures reste piégée dans l'enveloppe du bâtiment, et si les vitrages n'offrent pas une isolation thermique adéquate, cela peut augmenter la chaleur à l'intérieur. La Figure 5-44 montre la durée de surchauffe pour chaque scénario. Avec des valeurs souvent inférieures à 1.23 %, elles restent bien en dessous du maximum recommandé de 5%. Il y a des cas comme A3 et B3, les températures sont plus élevées, cette augmentation peut-être s'expliquer par l'inertie des matériaux et un mauvais fonctionnement de la ventilation.

Comme il ne semble pas y avoir de risque de surchauffe, l'accent est mis sur le confort thermique des scénarios en ce qui concerne le confort hivernal, qui est plus préoccupant en Belgique. La Figure 5-45 compare les températures opératives relatives au confort en hiver. Les scénarios sont classés en fonction de la température moyenne hivernale, selon l'ordre suivant :

	Moyen hivernale	Min. annuelle
A3	19,3	21
B3	22,2	21
B2	20,2	19,9
C1	19,0	19,9
C2	20,2	19,9
A2	19,7	19,5
A0	19,3	18,9
B1	19,3	18,9
A1	20,2	18,6
A4	17,9	17,4
B4	17,2	16,5
C3	17,2	16,5
C4	16,6	15,8

Figure 5-45 : DB, tableau de température opérative classé

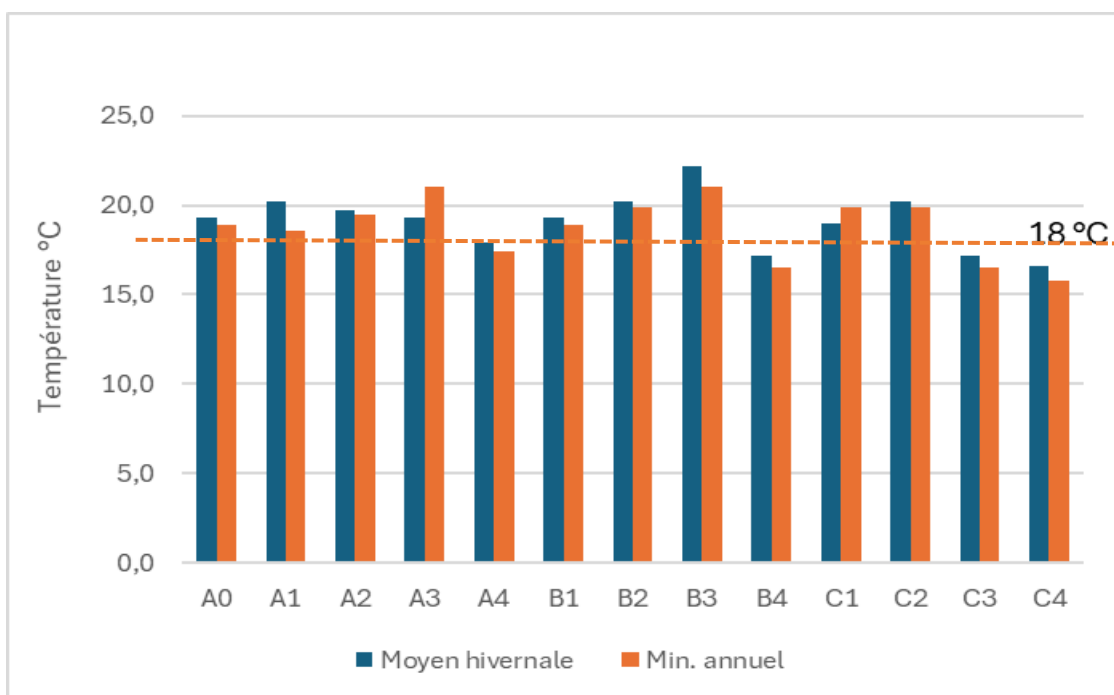


Figure 5-46 : DB, température opérative

La température minimale et moyenne hivernale varie considérablement au cours de l'année, mais seules celles des scénarios A4, B4, C3 et C4 sont inférieures à 18°C, les rendant ainsi les moins performants. La valeur de 18°C est définie comme le seuil, et on observe que les scénarios avec un vitrage pariétodynamique sont moins efficaces durant cette saison. Cela s'explique par le fait que ce type de vitrage intègre un système de ventilation, entraînant ainsi des pertes de chaleur.

Gain d'énergie solaire :

Le lien de gain solaire et le besoin de chauffage pour tous les scénarios sont présentés dans la Figure 5-56. De manière générale on constate une diminution de gain solaire et le besoin de chauffage dans les interventions proposés.

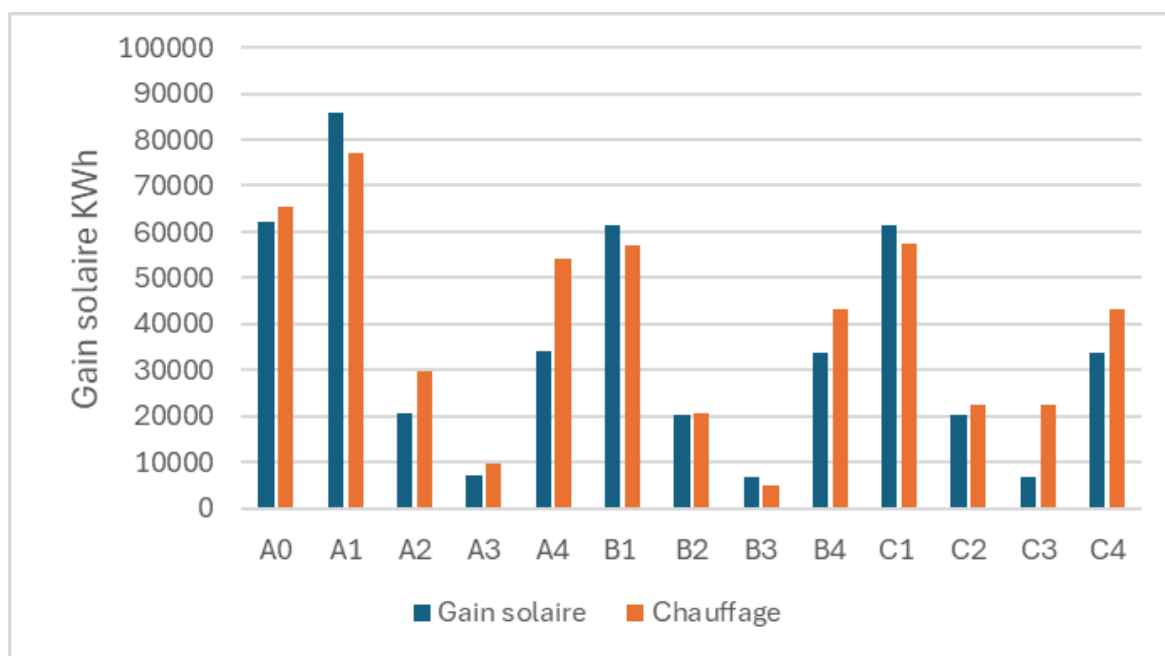


Figure 5-46 : DB, gain solaire

e qu'on peut en conclure, c'est que les scénarios utilisant des triples vitrages ne permettent pas de bénéficier d'un gain solaire très élevé. Cependant, ils sont plus efficaces pour la consommation de gaz, avec une demande en chauffage très faible par rapport aux autres scénarios.

Les vitrages pariétodynamiques, comme dans les scénarios C4 et B4, présentent un gain solaire et un besoin en chauffage similaires. Cependant, le même vitrage sans isolation, comme dans le cas du scénario A4, génère une quantité de gain solaire identique, mais avec un besoin en chauffage plus élevé.

Dans les scénarios A2, B2 et C2, les vitrages électrochromes offrent un gain solaire similaire, mais le besoin en chauffage augmente dans le cas du scénario A2, où l'isolation thermique des parois extérieures est absente.

En résumé, les scénarios avec isolation et un même type de vitrage ont souvent un gain solaire et un besoin en chauffage identiques (comme B2-C2, B4-C4). En revanche, un même type de vitrage sans isolation n'assure qu'un gain solaire identique, mais entraîne un besoin en chauffage plus élevé, ce qui est logique.

Résumé

- **La catégorie A**, sans isolation, le cas A2, avec double vitrage électrochrome, est le plus performant.
- **La catégorie B**, avec isolation côté intérieur, le cas B2, avec double vitrage électrochrome, est également le plus performant.
- **La catégorie C**, avec isolation côté extérieur, le cas C3, avec triple vitrage bas émissif, se montre performant.

Un vitrage performant, tel qu'un triple vitrage bas émissif, influence grandement la consommation d'énergie. Cependant, cela peut impacter le confort thermique en été, surtout si les murs ne sont pas isolés ou si l'isolant est installé du côté intérieur.

Les triples vitrages parietodynamiques montrent des résultats plus efficaces que les autres types de vitrage, mais seulement lorsqu'il y a une isolation de l'enveloppe du bâtiment.

Selon les analyses, nous recommandons uniquement de remplacer les vitrages et les châssis par les plus performants, comme dans le scénario A3. Cette rénovation est simple, ne nécessite pas de modifications majeures, peut être réalisée dans un délai plus court et évite le problème de relogement des habitants durant les travaux.

5 CONCLUSION

Avant de s'intéresser à la principale question de recherche, il faut répondre à la question qui avait été élaborées.

Quelle est la sensibilité de ces paramètres (consommations, confort et gain d'énergie) envers les variations étudiées ?

Les scénarios de catégorie B et C montrent que les trois paramètres sont assez peu sensibles aux variations de l'emplacement d'isolant (côté intérieur/ côté extérieur) dans les parois. Les valeurs exactes choisies pour caractériser ces mesures n'ont donc pas d'influence majeure sur les principaux résultats obtenus.

Les scénarios A4, B4 et C4 prouvent que le confort d'été peut être assuré avec des vitrages performants avec trois lames et un système de ventilation en détriment de l'augmentation de la consommation de gaz pendant les saisons froides.

Un risque de surchauffe est élevé dans le cas B3, où les vitrages sont des triples bas émissive et une isolation côté intérieur avec épaisseur de 10cm sans une ventilation mécanique. La consommation en gaz de ce scénario est très basse mais le confort d'été n'est pas assuré.

Pour le scénario A3 c'est la raison de manque de l'isolant dans la bonne position fait que la température soit plus élevée.

Si on souhaite avoir minimum d'intervention dans les logements comme dans les catégories A, un vitrage plus performant est toujours mieux qu'un double vitrage ordinaire. Pour le confort d'été la valeur ne dépasse pas plus de 3 degrés de la valeur recommandée dans les scénarios analysés.

Il est maintenant temps d'apporter une réponse à la principale question de recherche :

Quelle est l'impact du type de vitrage dans la rénovation énergétique des logements typique de liège des années après-guerre ?

Dans le contexte de la réduction de la consommation énergétique des bâtiments, l'amélioration de l'isolation thermique et des vitrages joue un rôle crucial. En particulier, le passage des doubles vitrages traditionnels aux triples vitrages performants se révèle être une solution efficace pour diminuer la consommation de gaz dédiée au chauffage. Cependant, cette avancée technologique n'est pas sans conséquence sur le confort thermique, notamment durant les périodes estivales. Ce texte explore les impacts de ces changements sur la consommation énergétique, le confort thermique, ainsi que les solutions possibles pour optimiser l'efficacité des systèmes de ventilation et maintenir un environnement intérieur agréable tout au long de l'année.

Le remplacement des doubles vitrages classiques par des triples vitrages plus performant offre des avantages notables, et diverse en matière de réduction de la consommation de gaz pour le chauffage. Les triples vitrages offrent une meilleure isolation thermique, limitant les pertes de chaleur à travers les fenêtres, ce qui réduit la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir une température agréable à l'intérieur du bâtiment. Cette efficacité accrue se traduit par une diminution des besoins en chauffage et, par conséquent, par une consommation de gaz réduite. Lorsque ces vitrages performants sont combinés avec une isolation renforcée des parois extérieures, la consommation de gaz pour le chauffage diminue encore davantage.

L'amélioration de l'isolation des murs extérieurs réduit les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur, conservant plus efficacement la chaleur en hiver et réduisant les besoins en chauffage.

Cependant, cette amélioration de l'efficacité énergétique peut impacter le confort thermique en été. Avec une meilleure isolation et des vitrages plus performants, la chaleur tend à être piégée à l'intérieur du bâtiment pendant les périodes chaudes, ce qui peut entraîner une augmentation de la température intérieure. Pour éviter une surchauffe et garantir un confort optimal, l'installation d'un système de ventilation mécanique devient nécessaire. Ce type de ventilation permet de réguler la température en assurant une circulation d'air suffisante pour évacuer l'excès de chaleur.

En ce qui concerne les vitrages pariétodynamiques, leur système de ventilation continue apporte une amélioration notable du confort estival. Ce dispositif aide à mieux gérer la chaleur en été en assurant une circulation constante d'air frais. Cependant, malgré cette amélioration, il est difficile d'atteindre la valeur de température recommandée de 25 °C. La ventilation continue des vitrages pariétodynamiques contribue à réduire la température intérieure, mais elle ne suffit pas à atteindre le seuil idéal, particulièrement lors des journées de forte chaleur. L'ajout d'une ventilation mécanique traditionnelle, en plus de ce système, peut légèrement augmenter la consommation de gaz, mais elle est essentielle pour maintenir un environnement intérieur confortable tout au long de l'année, en particulier pendant les mois d'été. Cela garantit une température plus stable et agréable, même si les performances idéales ne sont pas toujours obtenues.

Il faut savoir que le confort thermique dépend de la stabilité de la température intérieure, qui est influencée par l'inertie thermique des matériaux et par la qualité de la ventilation. (Comme cas B2). Une bonne inertie thermique aide à amortir les variations de température, tandis qu'une ventilation bien gérée permet de maintenir une atmosphère saine et agréable, évitant la surchauffe en été et la perte excessive de chaleur en hiver. Ensemble, ces facteurs contribuent à créer un environnement intérieur confortable, où les occupants se sentent bien, indépendamment des conditions climatiques extérieures.

5.1 FORCES ET LIMITATIONS DE L'ÉTUDE

Validité des résultats

Pour assurer la validité et la précision des résultats finaux, plusieurs stratégies ont été adoptées tout au long de la recherche. En premier lieu, il est essentiel de s'appuyer sur des données provenant de sources pertinentes et fiables, une étape incontournable dans toute recherche rigoureuse. Que ce soit pour établir l'état de l'art ou pour collecter des données nécessaires à la méthodologie, toutes les sources ont été soigneusement sélectionnées et recoupées. La priorité a été accordée aux ouvrages imprimés, aux articles de revues scientifiques ou techniques, ainsi qu'aux rapports de recherche. L'utilisation de pages web a été restreinte et limitée, autant que possible, aux sites reconnus, tels que Liège-Énergie, la Région wallonne, Energie Plus Le Site, et la CREG.

Pour ancrer les résultats obtenus dans la réalité, l'étude s'inscrit dans un contexte concret : elle se base sur un cas d'étude existant, respecte la réglementation wallonne, et utilise des données à l'échelle régionale ou nationale. Des experts et professionnels ont été sollicités pour obtenir des conseils et des ressources utiles. Une collaboration a été établie avec « La Maison Liégeoise

», un acteur clé dans le domaine de l'habitation. Cette collaboration a permis d'éclairer la réalité du terrain, de faciliter la sélection d'un cas d'étude pertinent, et de contribuer à la collecte des données nécessaires

Par ailleurs, la méthodologie conçue pour atteindre les résultats escomptés a été élaborée de manière à être aussi rigoureuse et scientifique que possible. D'une part, une revue approfondie de la littérature a permis de formuler des hypothèses de départ pertinentes, notamment en ce qui concerne les critères de sélection du cas d'étude, les variables et paramètres à examiner, ainsi que la caractérisation des scénarios. Les données collectées ont ensuite été analysées en suivant des standards reconnus et adaptés. D'autre part, l'outil principal utilisé a été choisi pour garantir une modélisation et une simulation de haute qualité, parfaitement alignées avec les objectifs de cette recherche. EnergyPlus, ici utilisé via le logiciel DesignBuilder, est un programme largement reconnu et apprécié dans le domaine de la recherche sur l'énergie et le bâtiment.

L'étude a accordé une attention particulière à la validation du modèle de base, une étape cruciale pour s'assurer qu'il représente fidèlement le cas d'étude réel, du moins en termes de résultats de consommation énergétique. Lors de la modélisation de la géométrie et de l'encodage des paramètres, de nombreuses simplifications et hypothèses ont été nécessaires. Il était donc essentiel de vérifier la correspondance entre les résultats de consommation issus de la simulation et les données réelles, obtenues à partir des relevés de consommation du bâtiment. Ce modèle servant de fondement pour toute la suite de l'étude—exploration des scénarios de rénovation, collecte et analyse des résultats, conclusions et recommandations—il devait être aussi représentatif que possible du cas réel. Les premiers résultats de simulation ne correspondant pas suffisamment aux relevés réels, le modèle a dû être ajusté. Des modifications ont été apportées au paramétrage initial afin de corriger ou réduire les erreurs et imprécisions détectées. Après plusieurs itérations, les résultats simulés se sont rapprochés suffisamment des données réelles, permettant ainsi de valider le modèle pour la suite de l'étude.

5.2 LIMITE DE L'ETUDE

Cette section traite des limitations de l'étude qui ne résultent pas de choix délibérés. Les restrictions volontaires de la recherche ont déjà été présentées dans le chapitre consacré à la méthodologie, en particulier dans la section 3.2.2.

La première limitation découle du type de méthodologie adoptée : l'analyse d'un cas d'étude existant. Bien que l'habitation ait été choisie pour représenter au mieux la typologie ciblée, elle possède des particularités spécifiques : deux tours de 19 et 14 étages, une combinaison de bureaux et de logements, ainsi qu'une surface très réduite pour les murs de retour, ce qui influence la forme générale de l'immeuble. Ces caractéristiques particulières peuvent avoir un impact, plus ou moins significatif, sur les résultats obtenus, rendant ceux-ci applicables uniquement comme ordres de grandeur pour ce type d'habitation.

5.3 PISTES DE RECHERCHE

L'étude réalisée dans ce travail se divise en trois grandes parties : « sélection et modélisation du cas d'étude », « élaboration et modélisation des scénarios » et « traitement des données ». Chacune de ces parties pourrait donner lieu à des orientations de recherche différentes de celles retenues ici. Pour la première partie, le bâtiment choisi comme cas d'étude pourrait être remplacé par un autre bâtiment :

- Répondant aux mêmes hypothèses, ce qui permettrait d'obtenir de nouveaux résultats à comparer avec ceux de cette étude pour en évaluer la représentativité.
- Situé dans une autre région, avec potentiellement une réglementation ou des conditions météorologiques différentes.
- Accueillant une fonction différente (bureau, école, commerce, etc.), avec les exigences spécifiques qui s'y rattachent.
- Présentant une typologie de cas d'étude différente.

Pour la deuxième partie, des scénarios supplémentaires pourraient être explorés : par exemple, l'utilisation de différents types d'isolants, y compris des isolants écologiques, l'installation de vitrages variés en fonction de l'orientation, l'intégration de systèmes de ventilation mécanique, ainsi que différents types de protections solaires.

Les scénarios pourraient également être élaborés en tenant compte des primes de rénovation disponibles en Belgique. Ces primes, accordées sous certaines conditions et pour des types spécifiques de travaux, selon des barèmes prédéfinis, pourraient influencer la conception d'un projet de rénovation.

De plus, une étude de sensibilité pourrait être réalisée en incluant davantage de variables (comme la valeur λ des isolants) ou en décomposant plus finement les scénarios (en étudiant l'isolation pour les différents types de parois : toitures, façades, plafonds, planchers sur cave, etc.). Cette étude pourrait même aller jusqu'à une optimisation des scénarios, en ajustant certaines variables pour déterminer les valeurs offrant la meilleure rentabilité ou le meilleur compromis.

Quant à la troisième partie, le traitement des données pourrait se focaliser sur un autre paramètre, tel que l'analyse du cycle de vie et l'impact environnemental des matériaux et équipements. Avec l'importance croissante des préoccupations environnementales, cet aspect devient de plus en plus pertinent dans la recherche. En effet, à mesure que la performance énergétique des bâtiments s'améliore et que la consommation d'énergie diminue, l'impact environnemental des matériaux utilisés prend une place de plus en plus significative (Energie Plus Le Site, 2021).

6 BIBLIOGRAPHIE

- Christine . (s.d.). Récupéré sur Logement social: étude d'une société coopérative "la Maison Liégeoise".
- Architecture et Climat. (2020). Récupéré sur Architecture et Climat. (2020). Guide de la rénovation énergétique et durable des logements en Wallonie : Analyse du bâti » P.134: <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/guide-de-la-renovation-energetique-et-durable-des-logements-en-wallonie-chapitre4-analyse-du-bati.pdf?ID=42042>
- Admin . (2020, February 6). Récupéré sur Récapitulatif des caractéristiques des vitrages- Energie Plus Le Site. Energie Plus Le Site.: <https://energiepluslesite.be/donnees/enveloppe44/enveloppe2/recapitulatif-des-caracteristiques-des-vitrages/>
- AGC. (s.d.). Récupéré sur Isolation thermique (basse émissivité) : le froid gardé à l'extérieur. (s. d.-b): <https://www.agc-yourglass.com/fr-LU/page-daccueil/architectes-et-prescripteurs>
- Alin Makhour. (2021, July 13). Récupéré sur Étude expérimentale des performances énergétiques d'une fenêtre pariétodynamique équipée d'un vitrage chauffant.: <https://theses.hal.science/tel-03635119v1>
- ambiacs, E. d. (2012). *Norme NF EN ISO 7726: Ergonomie des ambiances thermiques - Appareils de mesures*.
- André. (2022). *La méthodologie de recherche en sciences humaines et sociales. Support de cours en méthodologie de la recherche en architecture*. La méthodologie de recherche en sciences humaines et sociales. Support de cours en méthodologie de la recherche en architecture 2021-2022, p.16.
- Appelfeld, D. (2011). *S. Svendsen, Experimental analysis of energy performance f a ventilated window for heat recovery under controlled conditions, Energy and Buildings. 3200–3207*.
- ASHRAEH. (s.d.). Récupéré sur Air-conditioning system design Manual.: <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=Er9bMAytaF4C&oi=fnd&pg=PP1&dq=American+Society+of+Heating,+Refrigerating+and+Air-Conditioning+Engineers++Handbook+&ots=eP6PpLHebs&sig=O6ktSITIWauPTw>
- Baetens R. (2010). Récupéré sur Jelle, B.P., Gustavsen, A., 2010. Properties, requirements and possibilities of smart: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.08.021>
- Baker, P. (2000). *M. McEvoy, Test cell analysis of the use of a supply air window as a passive solar component, Solar Energy. p113–130*.
- Balaras, E. D. (2007). *HVAC and indoor thermal conditions in hospital. P 454-470*.
- Beaumont, F., & Beaumont, F. (2024, mars 21). Récupéré sur tour Bois-le-Prêtre bd Bois-le-Prêtre Paris 17 Lacaton Vassal. Paris Promeneurs - Découvrir l'architecture et l'histoire de Paris. : <https://paris-promeneurs.com/la-rehabilitation-de-la-tour-bois/>
- Bilan domestique et assimilés. (2019). Récupéré sur Site énergie du Service public de Wallonie. (s. d.). Site Énergie du Service Public de Wallonie.: <https://energie.wallonie.be/fr/bilan-domestique-et-assimiles-2019.html?IDC=6288&IDD=158620>
- Bilan énergétique. (2005). Récupéré sur consommation secteur logement Wallon. Retrieved March 14, 2023, from: https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/baa070328-logement2005_1318.pdf?ID=8982

- Bruxelles Environnement*. (2020). Récupéré sur Renolution : Une stratégie pour rénover le bâti bruxellois. Bruxelles.: <https://environnement.brussels/citoyen/nos-actions/plans-et-politiques-regionales/renolution-une-strategie-pour-renover-le-bati-bruxellois>
- Carlos. (2013). *Corvacho, H. (2014). Evaluation of the thermal performance indices of a ventilated double window through experimental and analytical procedures : Uw-values. Renewable Energy*, P 63, p747-754. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.031>
- Carlos, J. (2011). *H. Corvacho, P.D. Silva, J.P. Castro-Gomes, Modelling and simulation of a ventilated double window, Applied Thermal Engineering. p.93–102.*
- CERAA. (s.d.). Récupéré sur Centre d'Etude, de Recherche et d'Action en Architecture: <http://ceraa.be/>
- Charlot-Valdieu, C. &. (2018). *Réhabilitation énergétique des logements (2ème édition). Éditions du Moniteur. p.321.*
- Choisir le vitrage*. (s.d.). Récupéré sur Energie Plus le Site: <https://energieplus-lesite.be/concevoir/fenetres2/choisir-le-vitrage/>
- (s.d.). Récupéré sur <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/guide-de-la-renovation-energetique-et-durable-des-logements-en-wallonie-chapitre-1-cadre-general-de-l-etude.pdf?ID=42034>
- cité de Droixhe*. (2022, août). Récupéré sur Requalification de la cité de Droixhe : Quel avenir pour les équipements du quartier ? Etude de cas sur l'école fondamentale communale.: <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/15874>
- Climat. (2050). Récupéré sur Service Changements climatiques. (n.d.). 2050. Klimaat: <https://climat.be/2050-fr>
- Confort thermique*. (s.d.). Récupéré sur généralité. (s. d.). Energie Plus le Site. : <https://energieplus-lesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/>
- confort thermique* . (s.d.). Récupéré sur Conception d'un projet - Apports gratuits.: <https://www.lamaisonpassive.be/apports-gratuits>
- D, V. D.* (2002). Récupéré sur Thermal and solar modelling and characterisation : the role of IEA SHC Task 27. Dans National Research Council Of Canada, Ottawa, ON (Canada). Inst. For Research In Construction.: <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/20324254>
- Département de l'Energie* . (2020). Récupéré sur Bâtiment durable, Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme du bâtiment: <https://energie.wallonie.be/fr/strategie-de-renovation.html?IDC=9580>
- Elise*. (2023, juillet 20). Récupéré sur Tout savoir sur la réglementation PEB en Belgique. BOBEX (Bobex-web007). : <https://www.bobex.be/fr-be/certification-peb/reglementation/>
- Energie plus* . (s.d.). Récupéré sur Analyse de cycle de vie : <https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/totem/totem-analyse-du-cycle-de-vie/>
- Energy Cities* . (2022, August 2). Récupéré sur Ville de Liège - Energy Cities. : <https://energy-cities.eu/fr/membre/ville-de-liege/>
- Energy Technologies Area Publications*. (s.d.). Récupéré sur Testing of Air-Flow Windows for Evaluation and Application : <https://eta-publications.lbl.gov/publications/testing-air-flow-windows-evaluation>

- Enoprimes* . (2022, august 11). Récupéré sur Remplacement de fenêtre : quels critères prendre en compte ? Enoprimes | Enoprimes: <https://www.enoprimes.lu/fr/residentiels/travaux-eligibles/ameliorer-mon-isolation-thermique/remplacement-des-fenetres/>
- Fanger, P. (1970). *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*.
- Feist, W., & Schnieders, J. (2009). Récupéré sur Energy efficiency – a key to sustainable housing. The European Physical Journal Special Topics, 176(1), p.141-153.: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2009-01154-y>
- Fisk Brevet. (1938). Récupéré sur Sound excluding ventilating window, 2125669, 1938.
- FIV. (s.d.). Récupéré sur Fédération de l'industrie du verre. La FIV regroupe les entreprises belges qui ont, à l'échelle industrielle, une activité de production et/ou de transformation du verre.: <https://www.vgi-fiv.be/>
- G.A. Powel, Brevet . (1962). Récupéré sur Automatic ventilator window, 3034416.
- Gan, G. . (2001). Récupéré sur Thermal transmittance of multiple glazing : computational fluid dynamics prediction. Applied Thermal Engineering, 21(15), 1583 1592.: [https://doi.org/10.1016/s1359-4311\(01\)00016-3](https://doi.org/10.1016/s1359-4311(01)00016-3)
- Gosselin, J. (2008). Q. (Yan) Chen, A computational method for calculating heat transfer and airflow through a dual-airflow window, *Energy and Buildings*. 452-458 453.
- Greffet, R. (2016, mars 31). Récupéré sur Études expérimentale et numérique des performances énergétiques d'une fenêtre pariétodynamique. : <https://theses.hal.science/tel-02085932>
- Habitat. (2020, novembre 30). Récupéré sur Durée de vie d'une fenêtre : savoir quand les changer ou les rénover.: https://www.m-habitat.fr/fenetres/changement-et-renovation/duree-de-vie-d-une-fenetre-savoir-quand-les-changer-ou-les-renover-4829_A
- Habitos. (s.d.). Récupéré sur Presque tout le parc immobilier belge doit être rénové d'ici 2050. : <https://www.habitos.be/fr/construire-et-renover/presque-tout-le-parc-immobilier-belge-doit-etre-renové-dici-2050>
- Impacts environnementaux* . (s.d.). Récupéré sur focus sur les fenêtres. Energie Plus le Site. : <https://energieplus-lesite.be/techniques/enveloppe7/types-de-parois/toitures/totem-comparaison-fenetres/>
- Indicateurs de puissance thermique*. (1979-2020). Récupéré sur Température moyenne radiante: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/fr/metadata/indicators/thermal-comfort-indices-mean-radiant-temperature-1979-2019>
- J.S. Carlos, H. C.-G. (2012). H. Corvacho, P.D. Silva, J.P. Castro-Gomes, Heat recovery versus solar collection in a ventilated double window, *Applied Thermal Engineering*. 258 266.
- LA MAISON PASSIVE. (s.d.). Récupéré sur Conception d'un projet - Apports gratuits.: <https://lamaisonpassive.be/apports-gratuits>
- Lacaton & Vassal . (2007). Récupéré sur PLUS - Les grands ensembles de logements – Territoire d'exceptio. Editorial Gustavo Gili.: Druot, F., Lacaton, A., Vassal, J-P. (2007). PLUS- Les grands ensembles de logements – Territoire d'exceptio. Editorial Gustavo Gili.

- le vecteur air*. (s.d.). Récupéré sur Inard, C. Etude expérimentale et numérique du traitement des ambiances par le vecteur air dans les bâtiments à très basse consommation d'énergie. : <https://theses.fr/2013LAROS396>
- Lemoine. (2017). Récupéré sur La réhabilitation des immeubles des trente glorieuses : Entre démarche écologique et valeur historique. [Mémoire de master, Ecole nationale supérieure Architecture]. ISSUU.: https://issuu.com/louise.lemoine/docs/m__moire_impression_31 Ibid.
- Loonen. (2013). Récupéré sur R.C.G.M., Trčka, M., Cóstola, D., Hensen, J.L.M. Climate adaptive building shells.: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>
- Magali Bodar. (s.d.). Récupéré sur Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physiques, économiques et écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique | DIAL.pr - BOREAL. Création D'un Outil D'aide Au Choix Optimisé: <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:185581>
- Maison Liégeoise. (s.d.). Récupéré sur Think'In. (s. d.): <https://www.maisonliegeoise.be/>
- Maison passive. (s.d.). Récupéré sur Le standard, la maison passive - Présentation du concept: <https://lamaisonpassive.be/standard-maison-passive>
- Matheo. (2013). Récupéré sur La rénovation énergétique des bâtiments à intérêt patrimonial. (2013). Matheo ; Uliege. Consulté le 30 juin 2014, à l'adresse : https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/2423/1/2013_2014_OLIVIER_Anne-Claire.pdf
- MOLEY, C. (2017). Récupéré sur (Ré)concilier architecture et réhabilitation de l'habitat. Éditions du Moniteur, p.40: https://issuu.com/infopro/docs/_r__concilier_architecture_et_r__h
- Morse. (s.d.). Récupéré sur E S. Warming, and ventilation appartements by Sun's rays. United States.
- National Research Council Canada. (2024, avril 11). Récupéré sur Government of Canada. Comparison of the monthly thermal performance of a conventional window and a supply-air window- NRC Publications Archive. Canada.ca.: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/obj>
- Pathways. (2009, janvier 21). Récupéré sur to world-class energy efficiency in Belgium. McKinsey & ; Company.: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/pathways-to-world-class-energy-efficiency-in-belgium>
- Pérez-Lombard. (2008). Récupéré sur L, Ortiz, J., & Pout, C. A review on buildings energy consumption information. Energy And Buildings, 40(3), 394 398.: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Performance énergétique des bâtiments . (2017). Récupéré sur Energie Plus le Site. : <https://energieplus-lesite.be/reglementations/le-batiment3/performance-energetique-des-batiments-pen-2017/>
- Pousse, J.-F. (2012). (2012). *Vers de nouveaux logements sociaux : Tome 2. Ed. Silvana.*
- Protection thermique. (s.d.). Récupéré sur Toile pour protection thermique et solaire | Sunscreen Mermet, stores solaires en extérieur anti UV. (s. d.): <https://www.sunscreen-mermet.fr/support-technique/protection-solaire-performance-thermique-et-visuelle-des-tissus.html>
- Qui a Inventé les Fenêtres . (s.d.). Récupéré sur Historique d'un Élément de Notre Quotidien. (s. d.). Les conseils de Maison Energy.: <https://conseil.maison-energy.com/comment-choisir-ses-fenetres/qui-fabrique-les-fenetres/qui-a-invente-les-fenetres/>

- Rebts, P.M. (2023, mai 17). Récupéré sur Pourquoi la rénovation des bâtiments a besoin d'un coup d'accélérateur.: <https://www.lesoir.be/513892/article/2023-05-17/pourquoi-la-renovation-des-batiments-besoin-dun-coup-daccelerateur#:~:text=Le%20taux%20actuel%20de%20r%C3%A9novation,moyen%20d'ici%20%C3%A0%202050>.
- rénovation et énergie* . (2018). Récupéré sur SPW, Hauglustaine, J.-M., & Simon, F. Guide pratique pour les architectes : <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/guide-bleu-renovationoptimise.pdf?IDR=41650>
- Rosencrantz. (2005). Récupéré sur T., Bülow-Hübe, H., Karlsson, B., & Roos, A. (2005). Increased solar energy and daylight utilisation using anti-reflective coatings in energy-efficient windows. *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 89(2-3), 249-260. : <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.12.007>
- SageGlass* . (s.d.). Récupéré sur Où le vitrage intelligent peut-il être utilisé ? Industry Insights : <https://www.sageglass.com/fr/industry-insights/ou-vitrage-intelligent-peut-il-etre-utilise>
- Schouten. (2023, March 8). Récupéré sur L'année de la rénovation énergétique. Construire La Wallonie: <https://www.construirelawallonie.be/article/2023-lannee-de-la-renovation-energetique/>
- Siitonen. (2014, avril 2). Récupéré sur Air intake arrangements of the supply air window from the view of comfort and ventilation efficiency. AIVC. : <https://www.aivc.org/resource/air-intake-arrangements-supply-air-window-view-comfort-and-ventilation-eff>
- Southall R. (2006). Récupéré sur McEvoy, M. Investigations into the functioning of a supply air window in relation to solar energy as determined by experiment and simulation. *Solar Energy*, 80(5), 512-523.: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.04.016>
- Southall, R. (2006). *M.E. McEvoy, Investigations into the functioning of a supply air window in relation to solar energy as determined by experiment and simulation, Solar Energy. 512–523.*
- Souviron. (2022, septembre 2). Récupéré sur Glazing Beyond Energy Efficiency : An Environmental Analysis of the Socio-Technical Trajectory of Architectural Glass.: <https://hal.science/tel-04144337/>
- SPW . (2014, janvier 12). Récupéré sur Guide de la rénovation énergétique et durable des logements en Wallonie - Site énergie du Service public de Wallonie.: https://r.search.yahoo.com/_ylt=Awr.nqg8vbtmZQAAXXEk24lQ;_ylu=Y29sbwNpcjl
- SPW . (2016). Récupéré sur Guide pratique : Rénover pour consommer moins d'énergie: <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/1-guide-pratiqueintroduction.pdf?ID=61574>
- SPW . (2016 b). Récupéré sur energie Mon Quickscan. Mon Quickscan.: <https://monquickscan.be/>
- SPW. (2018). Récupéré sur rénovation énergétique, Guide pratique pour les architectes (p. 140). Wallonie Énergie SPW: <https://energie.wallonie.be/fr/la-renovation-et-l-energie.html?IDC=9642&IDD=130588>
- SPW. (2019). Récupéré sur Wallonie Energie Bilan domestique et assimilés du site énergie du Service public: Bilan domestique et assimilés 2019 - Site énergie du Service public de Walhttps://energie.wallonie.be/fr/bilan-domestique-et-assimiles-2019.html?IDC=6288&IDD=158620

- SPW. (2020). Récupéré sur Analyse du bâti. En ligne : (2014, Septembre). Wallonie Énergie SPW. : <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/g>
- SPW. (2021 a). Récupéré sur Obtenir une prime pour son habitation. Wallonie SPW.: <https://www.wallonie.be/fr/demarches/obtenir-une-prime-pour-son-habitation-partir-du-1er-juin-2019>
- Statbel. (2023, octobre 16). Récupéré sur parce de logement: <https://statbel.fgov.be/fr/themes/construction-logement/parc-des-batiments>
- Sutter . (2003 a, June 20). Récupéré sur Etude analytique et experimentale du pilotage de stores vénitiens en vue d'obtenir des conditions de confort visuel optimales dans le cas du travail sur écran de visualisation: <https://hal.science/tel-02472529>
- Sutter . (2003 c, June 20). Récupéré sur Etude analytique et experimentale du pilotage de stores vénitiens en vue d'obtenir des conditions de confort visuel optimales dans le cas du travail sur écran de visualisation: <https://hal.science/tel-02472529>
- Sutter. (2003 b, June 20). Récupéré sur Etude analytique et experimentale du pilotage de stores vénitiens en vue d'obtenir des conditions de confort visuel optimales dans le cas du travail sur écran de visualisation: <https://hal.science/tel-02472529>
- SWCS . (2019). Récupéré sur Rénover—Que proposons-nous ? Prêts à taux zéro. SWCS - Société Wallonne du Crédit Social. : <https://www.swcs.be/renover/que-proposons-nous/>
- SWL. (2023). *Wallon Logement* . Récupéré sur <https://www.swl.be/index.php/qui-contacter/la-swl/477-la-maison-liegeoise>
- Température opérative. (2023, août 12). Récupéré sur Contributeurs aux projets: https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature_op%C3%A9rative
- The passive house* . (s.d.). Récupéré sur Challenges and opportunities of the passive house concept for retrofit | TU Delft Repositories. (s. d.): <http://resolver.tudelft.nl/uuid:415efa15-0995-4f8d-a7be-845860b21181>
- Thomasrambaud. (2022, March 22). Récupéré sur Verre intelligent : innovations & confort | Article. Batiadvisor.: <https://batiadvisor.fr/verre-intelligent/>
- Trachte S. (2010). Récupéré sur Advanced and Sustainable Housing Renovation – A guide for Designers and planners.: https://task37.ieashc.org/Data/Sites/1/publications/Advanced_and_Sustainable_Housing_Renovation.pdf
- UFME. (2020, septembre 25). Récupéré sur Les coefficients thermiques des fenêtres: <https://www.ufme.fr/la-fenetre-de-qualite/les-coefficients-thermiques-des-fenetres>
- Verre et vitrages*. (s.d.). Récupéré sur Post-war building materials. (s. d.-b). Post-war building materials. P68-195: <https://researchportal.vub.be/en/publications/post-war-building-materials-in-housing-in-brussels-1945-1975-naoo>
- Verre et vitrages*. (s.d.). Récupéré sur Post-war building materials. (s. d.-b). Post-war building materials. P68-198: <https://researchportal.vub.be/en/publications/post-war-building-materials-in-housing-in-brussels-1945-1975-naoo>

- Verre et vitrages.* (s.d.). Récupéré sur Post-war building materials. (s. d.-b). Post-war building materials. P68-198: <https://researchportal.vub.be/en/publications/post-war-building-materials-in-housing-in-brussels-1945-1975-naoo>
- Vitrage haut rendement.* (s.d.). Récupéré sur prix du HR, HR+, HR++ et HR+++. (n.d.): <https://www.economie-energie.be/fenetres-et-portes/vitrage-haut-rendement/>
- Vitrage isolant thermique et vitrage isolant acoustique.* (s.d.). Récupéré sur Energie Plus le Site. : <https://energieplus-lesite.be/techniques/enveloppe7/composants-de-l-enveloppe/vitrages/vitrage-isolant-thermique-et-vitrage-isolant-acoustique/>
- Vlaanderen. (2020). *Ik BENOver. Energiesparen.* Récupéré sur <https://www.energiesparen.be/ikbenoveer>
- W.S. WHITE. (1975). Récupéré sur Heat exchanger window, 925945.
- Wallonie. (2011, avril). *SOLATION THERMIQUE PAR L'INTERIEUR DES MURS EXISTANTS EN BRIQUES PLEINES, GUIDE D'AIDE A LA cONcEPTION.* Récupéré sur https://www.researchgate.net/publication/283568752_ISOLATION_THERMIQUE_PAR_L%27INTERIEUR_DES_MURS_EXISTANTS_EN_BRIQUES_PLEINES
- Wallonie énergie. (2011). Récupéré sur ISOLATION THERMIQUE PAR L'INTERIEUR DES MURS EXISTANTS EN BRIQUES PLEINES : GUIDE d'AIDE A LA CONCEPTION.: https://www.researchgate.net/publication/283568752_ISOLATION_THERMIQUE_PAR_L%27INTERIEUR_DES_MURS_EXISTANTS_EN_BRIQUES_PLEINES
- Walloreno. (2021). Récupéré sur Guide pratique pour rénover votre logement avec Walloreno P. 40: <https://www.walloreno.be/assets/dist/documents/guidepratique-pour-renover-votre-logement-avec-walloreno.pdf>
- Walloreno. (2021a). *Guide pratique pour rénover votre logement avec Walloreno (p. 40).* Walloreno. Récupéré sur [https://www.walloreno.be/assets/dist/documents/guide pratique-pour-renover-votre-logement-avec-walloreno.pdf](https://www.walloreno.be/assets/dist/documents/guide%20pratique-pour-renover-votre-logement-avec-walloreno.pdf)
- Wei, J. (2010). *J. Zhao, Q. Chen, Energy performance of a dual airflow window under different climates, Energy and Buildings. p111–122.*
- Wright, J. L. . (1986, juin 1). Récupéré sur Effective U-values and Shading Coefficients of Preheat/Supply Air Glazing Systems. : <http://hdl.handle.net/10012/11624>
- Ye, H, Meng, X, Long, L & Xu, B. (2013). Récupéré sur The route to a perfect window. Renewable Energy: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.003>

7 ANNEXE

Dans le cadre de l'université et de l'atelier "Habitat/Habiter" du master 1, semestre 1, les étudiants ont réalisé une enquête sur la perception du confort par les résidents. Au cours de nombreuses interventions, les habitants ont souligné les problèmes de surchauffe en été et de froid en hiver dans leurs appartements. Chaque résident a dû prendre des initiatives pour résoudre ces problèmes et ajuster son comportement habituel. Cette section met en lumière des extraits des entretiens réalisés avec les habitants.

Habitant 1 : Bernadette BOSQUÉE interviewé par : Boutet Antoine S190751 & O'Driscoll Abigail S191303

« Est-ce que vous trouvez que ce logement est bien ensoleillé ?

- *Oh oui (rires). Oui, non nickel. Ce qui est bien c'est que moi je suis très bien mise, c'est parce que moi, le soleil tourne à 10h et va dans les chambres. En hiver, c'est pratique parce que les chambres sont chauffées. Mais en été il fait fort chaud mais écoute... Voilà enfin moi, je mets mes tomates du côté du soleil comme ça il y a des bonnes tomates. Ce sont mes tomates hein de mon jardin. Eh oui non, non, non, je trouve ça la hauteur, c'est extraordinaire. Moi j'aurai du mal à revenir à une maison de plain-pied avec des voisinages. J'aurais du mal, j'aurais dû mal.*

Et je vois que vos rideaux ils sont ouverts vous les laisser tout le temps ouvert ?

- *Les rideaux je les ferment en été plus qu'en hiver, en été pour le chaud... le soir et en hiver chez moi, j'ai mis des occultants thermiques, je les ferme parce que je fais attention à l'énergie... Encore plus maintenant. Maintenant, je les ferme, j'allume le chauffage, je laisse une demi-heure et ça tient chaud et je crois vraiment que ça marche parce que dans les chambres, je n'ai pas ce système là et il fait froid dans mes chambres. Mais bon dans les chambres moi je ne me chauffe pas quoi, mais tu vois trouver des solutions ou je ne sais pas ou peut-être faire des vitres thermiques, je ne sais pas si ça existe, je ne sais pas. Ça découle tout ça toute façon.*

Et vous regardez souvent par la fenêtre ?

- *Tout le temps, tout le temps, tout le temps... En plus on a plein de lever de soleil différent plein de couleurs tout le temps, tout le temps, tout le temps. Ah moi je ne saurais plus vivre dans un espace clos, sans lumière, ce n'est pas possible, ce n'est pas possible.*
- *C'est vrai que la vue elle est pas mal.*
- *On est bien ici attendu. On est bien*

Et vos fenêtres elles sont souvent ouvertes ?

- *Tout le temps, c'est pour ça que j'ai des moustiquaires. Tu vois ? C'est pour ça que moi je veux faire avec les rideaux parce que même en hiver, la nuit, je ferme mes chauffages et j'aère dans mon salon quoi. Pour qu'il y ait un... parce que moi la journée allumer le chauffage et mettre*

le... allumer le chauffage et ouvrir les fenêtres je trouve ça ridicule donc j'ai choisi d'aérer la nuit. »

Habitant 2 : Madame Bartoshina interviewé par Mathilde Martinez & Hugo Hermans.

« M (en souriant) : Donc c'est utile quand même d'être au 18ème pour pouvoir avoir un œil sur les enfants qui vont à l'école !

- (En rigolant) : Oui voilà c'est ça !

Et vos rideaux vous les fermez quand même souvent ?

- *Oui parce qu'il fait vraiment super chaud quand il y a du soleil, c'est mortel.*

Ah oui d'accord ça tape tout de suite. A midi il fait trop chaud ?

- *Aujourd'hui on n'a pas de soleil sinon vous auriez senti. Mais vous voyez que les fenêtres sont ouvertes.*
- En été oui c'est à mourir.

Comment est-ce que vous faites ? Vous avez un petit ventilateur ou quoi ?

- *Oui sinon ici vous allez mourir. Même si tous les fenêtres sont ouvertes on bloque les portes pour que l'air passe et tout ça. Donc voilà... Mais chaque fois quand quelqu'un me demande le 18 c'est toujours « Ah il fait chaud » ...*
- Ah oui d'accord c'est vraiment la première remarque qu'on vous fait.
- C'est pour ça aussi peut être que des petits...
- Elle nous mime des auvents devant les fenêtres.

Des auvents ou quelque chose ?

- *Oui ça pouvait aider aussi les choses qui sont bien installées que les gens puissent fermer. »*

Habitant 3 : madame PIRMOLIN Alix interviewé par DE PAOLI Aliciane & LEROY Madeleine

- *Oui. Donc, il y a trois ans, quand il y avait eu la canicule, c'était atroce parce que le soleil tournait. Donc il commence à l'Est, là, et ça se termine à l'Ouest. Donc j'avais le soleil qui me tapait dessus. J'ai cru mourir de chaud, hein ! Et où miracle ! Cette année, quand il a eu la canicule, il tapait sur le toit. Je n'y comprends rien. Et il n'a jamais voulu donner sur la vitre. Et comme j'ai un étage au-dessus, je n'ai pas eu de problème.*
- C'est peut-être, qu'il a fait chaud plus tôt aussi

C'est qu'il a pu changer de place ou quoi ?

- *Bah tant mieux !*
- *Oui, tant mieux.*
- *Oui, heureusement pour moi ! Et même quand il fait froid, que les gens disent « il fait très froid », ici, ça va.*

Ça va, vous n'avait pas trop besoin de chauffer, du coup ?

- *Ah non. Vous avez froid ?*
- *Ah non, non. Moi, je n'ai jamais froid.*
- Ah oui, d'accord.

Mais vous trouver qu'il fait bon ?

- *Là, c'est agréable, oui. On a la chance qu'il fasse encore très doux dehors. »*

Habitant 4 : occupant de l'étage 4 interviewé par Norig BUET & Mehdi DUNON

« - Et niveau ensoleillement, luminosité...

- *Oh oui tout l'après-midi moi, à partir de 2 :00 jusqu'à la tombée ouai*

Parce que là vous êtes...

- *Ouest... Au 4ème... non on est bien, enfin bon moi je suis bien... j'ai mon petit confort...*

Et pareil en été vous n'avez pas trop chaud ?

- *J'ai les stores-là qui me font du bien, et j'ai l'appareil la... La clim...- La clim ouai je l'ai, je l'ai rangé seulement...*

Et les stores étaient déjà là ?

- *Non, c'est moi qui les ai installés, normalement j'aurai du encore en mettre là et là (Elle nous montre les stores qu'elle a installés sur toute la largeur de la baie vitrée, mais ils s'arrêtent de chaque côté avant les extrémités laissant une partie non protégée à chaque extrémité de la baie) ... mais c'est bon comme ça, c'est surtout le noir qui est bien, c'est bon le noir, mieux que le blanc par exemple...*

Ah oui ?

- *Ah oui vraiment ça fait du bien...*

Et au niveau du chauffage...

- *Je ne fais pas de chauffage... je fais, avec un pull et le soir mon peignoir, peut-être décembre-janvier pas complets. (On regarde le radiateur bas positionné au pied de la baie vitrée) ...Non de ce côté-ci ils sont agréables, les chambres ils sont plus froids...*

Donc vous chauffez plus là-bas... ?

- *Non je ne chauffe pas à part en hiver, 1h ou 2h sinon je n'en ai pas besoin. D'ailleurs je n'ai jamais repayé, j'ai toujours retouché... »*

Entretien avec les responsables de la Maison Liégeoise

Au sein de cette section, vous découvrirez un extrait de l'entretien réalisé avec La Maison Liégeoise, nous fournissant des informations sur l'état des logements et le fonctionnement de la société. Cet échange a eu lieu avec M. Jean Baptiste Lardot, responsable du service technique et social.

Pouvez-vous partager des détails sur l'histoire du complexe des écoliers, son origine, ses premières fonctions, et comment il est devenu un espace résidentiel ?

- *Il est prévu dès le départ comme des bureaux pour la Maison liégeoise et des logements. Donc la fonctionne qui a pour le moment était déjà là. L'immeuble est construit est inauguré en 1980.*

Quels sont les critères qui font que le bâtiment est conservé il n'est pas démoli ou transformé ?

- *Le problème de le démolir c'est le nombre de logement, le parking en dessous, mais au niveau énergétique c'est une passoire. C'est une structure béton.... Les murs intérieurs sont très peu porteurs toute est en structure béton même à l'extérieur les balcons sont compris dans la structure béton. Le tout problème est d'isoler le bâtiment. C'est un passoir énergétique et cela coûterait pour la rénovation mais le démolir... On parle quand même de 200 logements ce qui serait un peu compliqué à mettre en œuvre.*

Il y a comme bien d'habitant dans ces tours ?

- *Il y a en 72 à parvis 3 et 107 à parvis 2.*
- *On peut ajouter que la démolition ce qu'on déjà fait à sur les tours Droixhe n'est pas oublier que dans ces building il y a des habitants et tout un accompagnement qui devrait être mis en place et en outre une démolition et reconstruction on va perdre un certain nombre de logement ainsi il faut reloger ces personnes dans le patrimoine ou dans d'autre société de logement, des partenariat avec la Régie Foncière ou d'autre partenaire qui gère des logements comme agence immobilière sociale... donc c'est une question qui est difficile à gérer !*

Quel type de famille habite ces logements ? ils sont plus tôt des petites familles personne seule ? ...

- *Il y a un peu de tout, je vais vite faire un tour sur la liste, je pense que les tours ici n'ont pas de particularité à ce niveau-là. Il faut comprendre que la taille prévue dans le logement est ce que les gens font que les différents types de publique : d'origine étrangère, précarisé des regroupement familial ou les gens ne disent pas j'ai deux chambres je n'ai pas la capacité d'avoir des enfants supplémentaires ou faire revenir ma famille et donc même si on a des gabarits qui sont adaptés à des certain nombre de personne n'est pas toujours respecté.*

Et au niveau de la rénovation est-ce que vous en avez fait pour la mise en norme ou pas de tout ?

- *En effet quand on fait des rénovations ici dans le bâtiment c'est à la suite de départ locatif. Voilà une mise en état du logement comme le revêtement du sol ou la réparation des murs, la mise en état des installations électrique, incendie, des installations de chauffage ou des chaudières collectif ou passer pour un radiateur ce sont les seules rénovations qu'on fait ici. En gros sont les parachèvements et les installations techniques.*

Alors au niveau de rénovation énergétique, thermique et le confort il n'y a pas de tous des interventions ? et pour dans le futur vous avez un projet pour le faire ?

- *Pas un projet pour ces buildings mais un autre qui vise la rénovation de 650 logements du patrimoine de la Maison Liégeoise. Mais les tours ne font pas partie. Sur le subside que nous avons reçu pour rénover les logements on aurait brûlé tout le subside rien que pour les deux tours ici alors qu'on doit faire à la base au minimum 600 logements. On a eu un rabe sur*

l'augmentation de coût des matériaux ce qui permet d'arriver à 650 logements mais ici on que 200 logements ! Le seul moyen ici dans les deux tours l'idéal c'est d'isoler tous l'enveloppe extérieur.

L'isolation par extérieur est plus favorable dans ce cas-ci par l'intérieur est ce que la taille des logements le permet ?

- *Le problème que l'isolation par l'intérieur a c'est l'emprise sur la taille des logements, il ne faut pas oublier qu'on est dans les logements publique et ne sont pas de grande taille. Il y a des chambres qui font 6 m² et si on retire une épaisseur de cloison et l'isolant de minimum de 8 cm. Vitrages que nous avons ici oui ils sont un peu fumés, jaunâtre tant dit que les nouveau n'nt pas cela. Si non il n'y a pas un plan prévu pour remplacer les vitrages.*

Vous avez parlé d'un système de chauffage centrage c'est en quoi exactement gaz ou mazout ?

- *C'est au gaz et il y a une chaudière sur le toit de chaque bâtiment dans une chaudière pour parvis 3 et une chaudière pour parvis 2.*

Et vous avez une idée de la consommation d'une famille type dans l'établissement ?

- *Oui ça franchement on sait regarder aussi dans le dossier c'est le département financier qui s'en charge. Pour électricité c'est un compteur commun et ne peut pas le savoir on accède aux informations sur les communs.*
- *Si vous dite une famille type est ce que ça vous convient qu'on vous donne les informations seulement sur quelque appartement ? parce qu'ils sont quand même nombreux 107 et 72 habitants ça va être compliqué.*
- *Oui pas de problème l'idée c'est d'avoir une estimation de leur consommation énergétique.*
- *Le moyen des occupants est de 2,25 pour 30 logements dans le parvis. Il faut dire qu'au niveau d'humidité sur la partie sociale on peut dire qu'il n'y a pas de tous des retours de la part des locataires alors qu'il y a dans d'autre bâtiment du patrimoine. Soit totalement ou partiellement influencer par la manière d'habiter et le Surpeuplement, imaginez 6 personnes dans le ménage*

Donc on perd vite le 15 cm sur la pièce plus des retours pour éviter les ponts thermiques ce n'est pas jouable pour la cette configuration.

La taille des logements fait combien de mètre carré en effet ?

- *Cela je n'ai pas vraiment vérifié mais on peut regarder sur les plans mais on va dire que les logements en moyen ici pour le petit logement on est sur 50 – 55 m² et les grands font peut-être 75.*
- *Ah oui je pensais qu'ils sont plus grands de l'ordre de 100 m² pour les 3 chambres.*
- *Non pas de tout il faut penser que sur les étages on a 6 appartements, oui quand on regarde la tour on se dit que c'est grand mais pas de tout.*

Vous savez quel type de vitrage il y a dans les logements ?

- *C'est du double vitrage aluminium mais vieux, les vitrages alu des années 80 ce qui étaient très bien pour époque.*

Qu'entendez-vous souvent de la part des locataires sur les problèmes de vitrage ?

- *Le problème qui vient souvent c'est l'étanchéité à l'air. Oui il fait très chaud, tous ce qui sont exposé au sud il très chaud ! et les résident l'aperçoivent lorsqu'il y a une panne dans la chaudière le logement refroidi très vite aussi avec les entrées de l'air par les châssis.*

Sur les façades on remarque des vitrages de couleurs différents est ce qu'ils ont été choisis pour des raisons particulières ?

- *Oui il y eu éventuellement quelques remplacements de vitrage parce qu'ils étaient cassés ou autre mais rien d'autre. Ce qui peut expliquer une petite décoloration c'est que dans les vieux.*
- *qui dégage un litre d'eau/humidité dans un logement prévu pour 3 personnes ça entraîne des conséquences. En générale les deux tours ici sont moins peuplées que les autres logements.*

Le loyer que les habitants paient est de combien approximativement ?

- *De mémoire ici c'est 280 euros en moyen. A savoir que le loyer moyen chez nous est plus bas que le moyen des logements sociaux dans le Wallonie. Ce qui est à l'impact pour nous.*
- *En effet c'est la règle de la Maison Liégeoise : on est limité à 20% de revenu. A Liège les locataires ont des revenus faibles et sont des personnes précarisées c'est pourquoi le loyer n'est pas très haut.*

Dans l'immeuble il y a-t-il une ventilation ou pas de tout ?

- *Ce n'est pas une ventilation VMC, ce n'est pas mécanique centraliser dans le bâtiment, ils ont chacun des extracteurs d'air classique dans ce qui est WC et extracteur d'air dans les cuisines et salle de bains.*
- *Ils étaient mis plus tard dans nos logements dans les années 80 il n'y avait pas ça. A cette époque il y avait des petites grilles manuelle.*

Ces extracteurs sont suffisants pour les logements ?

- *Oui ça améliore la qualité de l'air d'ailleurs le PEB il y tient compte. C'est équivalent à système C+ de base. On des extracteurs dans les pièces humides et des talonnages des portes dans les autres pièces pour le passage de l'air. Mais ils ne sont pas reliés à un ensemble technique.*

Sur les plans de base des architectes on voit un groupe de ventilation ils existent encore, et il fonctionne ?

- *Il y avait effectivement un groupe de ventilation pour tirer l'air des colonnes. Mais on a dû l'arrêter pour des raisons acoustiques. Dans les étages supérieurs on les entend très fort, il était dérangeant. Donc on l'a arrêté.*

Si vous devez rénover les tours un jour vous pensez ce qui est plus important / urgent sur le plan de rénovation ?

- *La première rénovation à faire c'est le remplacement des chaudières collective qui ont plus de 40 ans. Mais après pour le reste il faut vraiment faire appel à une étude à une société d'ingénieur spécialisé qui eux vont vraiment dire les points d'intention et qui vont faire une évaluation de plan PEB complète de l'enveloppe.*

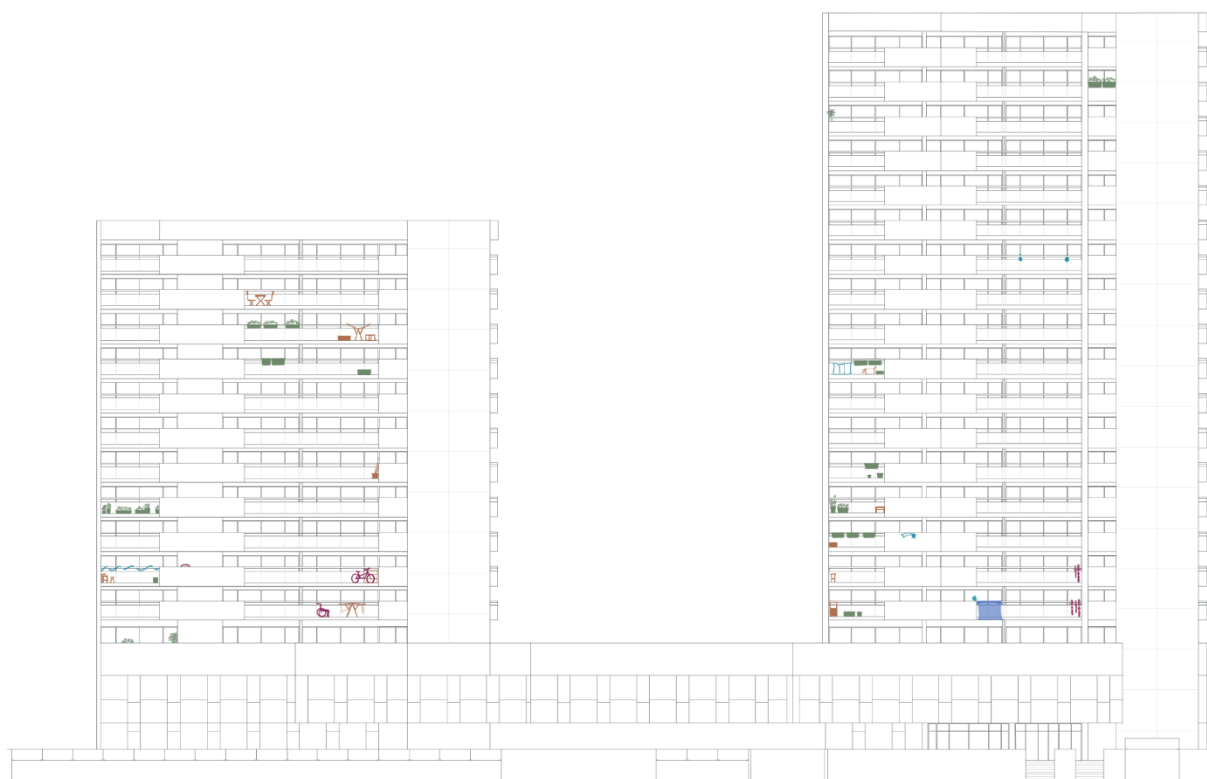
Comment fonctionne les subsides que vous recevez pour un plan de rénovation ?

- *En générale le subside couvre 75% des dépenses et 25% reste à notre charge. Ici les chiffres ne sont pas secrets pour le plan de rénovation 29 million et tout le reste est à notre charge en sachant que le plan est prévu pour 47million donc on 17 millions à notre charge on doit payer 25 % minimum. Pour amener tout le logement à PEB B et mettre au norme électrique, incendie, système de ventilation aménagement intérieur et extérieur et si jamais à la fin du chantier selon l'étude PEB les logements ne sont pas eu PEB B mais C, sur ce chantier là il faut rembourser le subside. Parce qu'il est un des critères à respecter pour obtenir le subside.*
- *En moyen un logement mise en norme dans le plan de rénovation arrive à un budget de 65 miles euros en sachant qu'on ne fait pas de parachèvement à l'intérieur des logements, pas de peinture pas d'installation cuisine, pas de finition sol.... On fournit le logement tout vide. Le reste c'est l'aménagement locatif.*
- *A se rappeler que les locataires qui ont dépensé pour tous les aménagements intérieurs doivent les enlever et rendre le logement vide comme le début. Si non le travail sera fait par nous et il sera facturé.*

Tableau de consommation annuelle du chauffage au gaz

NOMBRE DE PERSONNE	CONSOMMATION EN KWh/an
1	4.600
5	23.500
2	10.000
1	4.200
1	5.000
5	24.000
	71.800

Ensuite, nous trouvons le relevé des différentes façades des deux tours, réalisé par un groupe d'étudiants de master 1 dans le cadre de l'atelier de projet Habitat/Habiter. FERNANDEZ Louise - LAMBORELLE Marie.



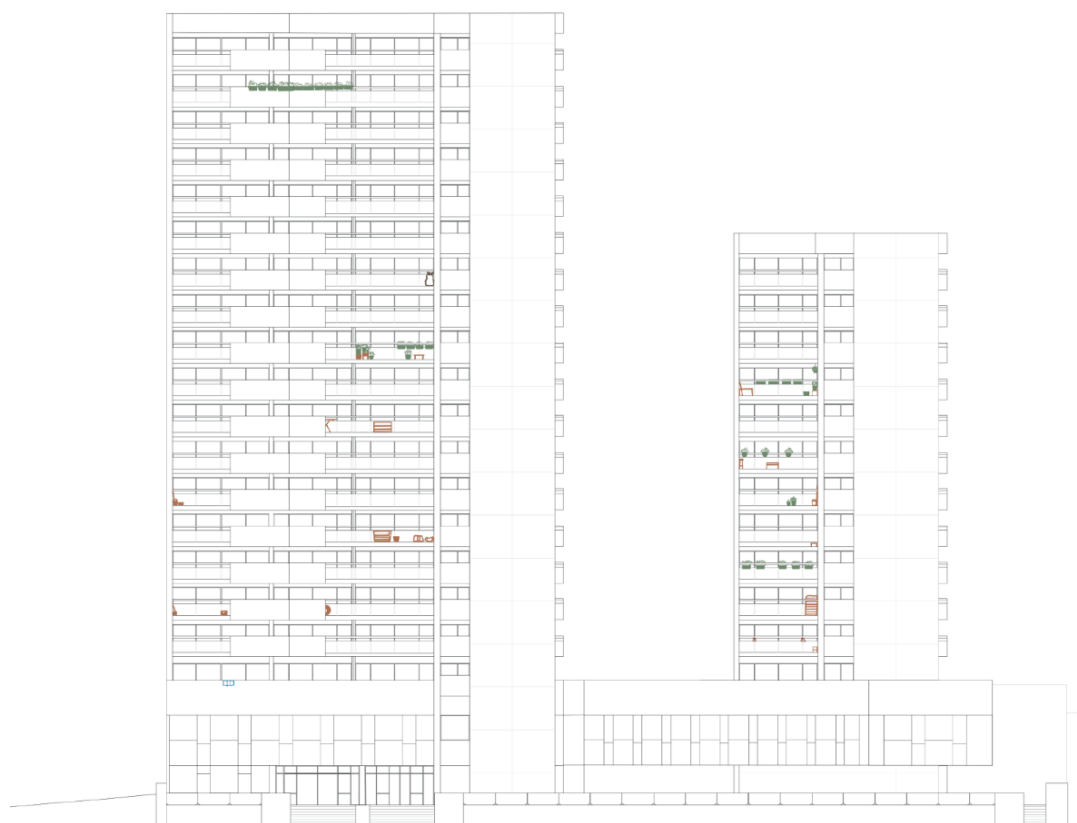
Façade nord



Façade sud



Façade est



Façade ouest

