



*Quantification des performances de
solutions pour la rénovation de châssis
à valeur historique en région bruxelloise*



Partenaires

 Buildwise


Société de menuiserie décorative - C. Scheppers
MAISON CABAY
Menuiserie • Ebénisterie

Subsidié par


we fund your future

Avant-propos

Le présent rapport décrit les actions menées, les méthodologies utilisées et les résultats obtenus dans le cadre du projet *PERCHE : Quantification des performances de solutions pour la rénovation de châssis à valeur historique en région bruxelloise*. Ce rapport est confidentiel et appartient aux trois partenaires : il ne peut être partagé qu'avec l'accord préalable de l'ensemble des partenaires du projet. Ce rapport d'étude contient 34 pages et 14 annexes et ne peut être reproduit que dans son intégralité.

Le projet voit collaborer 3 partenaires (Buildwise, Menuiserie Cabay et SMD – Société de Menuiserie Décorative) autour de la thématique de rénovation et restauration de menuiseries bois traditionnelles. Subsidé par la région Bruxelloise (Innoviris) dans le cadre de l'appel JRDIC (Ref : 2022-JRDIC-9a), PERCHE démarre de manière effective le 1^{er} septembre 2022 et se termine 3 ans plus tard, le 31 août 2025. Tout au long du projet, un comité d'experts s'est rassemblé de une à deux fois par an pour discuter de la qualité et la pertinence des résultats obtenus, permettant ainsi de se réorienter en cours de projet si nécessaire. En plus des trois partenaires du projet, le comité intègre : Arsis, CERAA, Direction Patrimoine de la ville de Bruxelles, Gevelinzicht, Homegrade, KIK-IRPA, Lutjeharms, UCLouvain et Urban.brussels.

Les partenaires du projet souhaitent remercier sincèrement toutes les personnes ayant contribué au projet. En particulier à **Jérôme Bertrand** (Homegrade), **Augustin Cardyn** (Sénat), **Julie Desarnaud** (KIK-IRPA), **Daniel De Vroey** (De Vroey sprl), **Vincent Heijmans** (Direction Patrimoine de la ville de Bruxelles), **Roel Hendrickx** (Gevelinzicht), **Aurélien Larcin** (ECAM), **Diederick Lutjeharms** (Lutjeharms), **Fabienne Rouby** (Origins), **Guido Stegen** (ARSIS), **Dorothée Stiernon** (CERAA/UCLouvain) et **Manja Vanhaelen** (Urban.Brussels).

Table des matières

1	Contexte.....	3
1.1	Le bâti bruxellois, entre patrimoine et énergie	3
1.2	Objectifs et livrables du projet PERCHE	3
1.3	Structure du rapport.....	4
2	Les menuiseries traditionnelles bruxelloises	5
2.1	Le châssis ancien en bois	5
2.1.1	Le châssis.....	5
2.1.2	La quincaillerie	5
2.1.3	Les vitrages	5
2.2	Typologie de châssis	6
2.3	Défauts fréquemment rencontrés.....	6
2.4	Score de détérioration	6
2.5	Amélioration possibles	8
3	Caractéristiques techniques des interventions.....	9
3.1	Fenêtres et performances	9
3.2	Étanchéité à l'air (q_{50}).....	9
3.3	Pertes par transmissions	10
3.3.1	Mesures en laboratoire avec HAMSTER (U_w)	10
3.3.2	Simulations numériques pour les pertes par le châssis (U_f)	12
3.4	Performance acoustique	12
3.5	Approches qualitatives	13
4	Évaluer l'impact des interventions pour le client.....	15
4.1	Critères de sélection	15
4.1.1	Critères économique.....	16
4.1.2	Critères environnementaux	17
4.1.3	Critères d'inconfort	17
4.1.4	Critères patrimoniaux	19
4.2	Matrice de performances et décision finale.....	19
5	Cas d'étude.....	21
5.1	Le double ouvrant de la maison des parlementaires.....	21
5.1.1	Description du cas d'étude	21
5.1.2	Source des données et caractéristiques techniques.....	22
5.1.3	Résultats.....	22
5.2	La bow window d'une maison mitoyenne	24
5.2.1	Description du cas d'étude	24
5.2.2	Source des données et caractéristiques techniques.....	25
5.2.3	Résultats.....	25
5.3	Autres cas d'étude	27
5.3.1	Impact de l'orientation	27
5.3.2	Impact de l'entretien	29
5.3.3	Impact des modèles et de la pondération	29
6	Liste des annexes	32
7	Références.....	33

1 CONTEXTE

1.1 LE BÂTI BRUXELLOIS, ENTRE PATRIMOINE ET ÉNERGIE

En 2023, le bilan énergétique de la Région Bruxelles-Capitale attribue 72% de la consommation énergétique finale de la région aux environnements bâtis (38% pour le résidentiel et 34% pour le tertiaire). La proportion de cette énergie dépensée pour le chauffage est de plus de 70% pour le résidentiel et 50% pour le tertiaire [Bruxelles Environnement 2025]. C'est dans ce contexte que s'inscrit la Stratégie Rénovation de la Région Bruxelles-Capitale, ayant pour objectif ambitieux que l'ensemble des logements bruxellois atteigne un niveau moyen de consommation énergétique primaire de 100 kWh/m²/an en 2050, soit un tiers de sa performance actuelle [Renolution 2024]. Atteindre un tel objectif nécessite une rénovation en profondeur du bâti existant, riche d'un important patrimoine architectural. Témoignage de notre histoire, cette architecture constitue également un atout majeur pour la région, en contribuant significativement à la qualité de l'environnement urbain.

En région Bruxelloise, plus de 60% des logements ont été construits avant 1945, avec la maison bourgeoise comme typologie la plus couramment rencontrée [Trachte et al. 2014]. Pour ce type de bâti, les menuiseries représentent un grand potentiel d'amélioration, tant au niveau économique et environnemental, que pour le confort et la santé des occupants. Par ailleurs, c'est également une intervention très importante d'un point de vue patrimonial : les menuiseries contribuent fortement à l'allure authentique d'une façade et sont souvent les témoins d'un travail artisanal qui les rendent unique. La mise en œuvre de solutions non-adaptées risque de compromettre la valeur de l'élément, mais également de l'ensemble du logement, voire même du quartier.

La coexistence des enjeux de performance énergétique et de conservation du patrimoine est une problématique importante et complexe rencontrée par une grande part des acteurs du secteur de la construction, en particulier dans la capitale. Chaque intervention représente une certaine amélioration énergétique et correspond à une certaine « perte » patrimoniale. Une importante difficulté rencontrée par les professionnels impliqués dans ces questions est de déterminer des valeurs chiffrées pour ces degrés d'amélioration et de pertes par rapport à l'ensemble d'interventions qu'ils proposent.

1.2 OBJECTIFS ET DÉLIVRABLES DU PROJET PERCHE

Le projet PERCHE s'inscrit dans ce contexte et a comme objectif général de

Faciliter le processus de rénovation et restauration de menuiseries en bois dans des logements représentatifs du bâti d'avant-guerre de la Région Bruxelloise.

Dans cette objectif général, on notera la limitation du champ d'action aux menuiseries traditionnelles en bois, mais pas de limitation au contexte de bâtiment classé, au contraire. Le projet a comme objectif spécifique de

Outiller le facilitateur¹ pour accompagner efficacement le client dans un processus de décision relatif à l'amélioration de ses menuiseries bois traditionnelles

Concrètement cet objectif spécifique se décline sous la forme de quatre livrables :

¹ Professionnel accompagnant un maître d'ouvrage dans sa prise de décision. En fonction de la taille et du type de projet, celui-ci peut être un architecte, un consultant, un menuisier, une structure d'accompagnement (type Homegrade), etc.

- **Un module de sensibilisation** d'une demi-journée qui a été éprouvé à deux reprises au cours du projet (14 et 21 mai 2025) auprès de différents acteurs-clé du paysage bruxellois (Homegrade, Urban.brussels et direction patrimoine de la ville de Bruxelles). Ce module a pour vocation d'être répété par un ou plusieurs partenaires du projet dans les années à venir. Le syllabus accompagnant le module de formation est présenté à l'annexe 1.
- **Un outil d'état sanitaire** (*RenoCheck*) a été mis à jour en y introduisant un nouvel élément : « Menuiserie bois traditionnelle ». Cet outil reprend l'ensemble des questions (checklist) pertinentes pour faire un état sanitaire de ce type d'éléments de construction. Un guide d'utilisateur de l'outil est produit à l'annexe 2, celui-ci reprend également l'ensemble des questions spécifique à ce projet-ci.
- **Des fiches solutions** qui regroupent, pour un ensemble d'interventions données, les caractéristiques techniques (ex : U_w , q_{50} , etc.) et l'impact pour le client (ex : impact environnemental, valeur patrimoniale, risque d'inconfort, etc.). Deux cas d'études disposent chacun de deux fiches solutions : une courte, limitée aux résultats principaux, et une longue plus détaillée. Ces fiches solutions sont reprises aux annexes 3 à 6, et se basent sur les méthodologies développées aux sections 3 et 4. Le contenu des fiches solution est également résumé dans la section 5.
- **Un protocole de mesure** in-situ de l'étanchéité à l'air des menuiseries existantes. Contrairement aux autres livrables, celui-ci a un impact indirect sur le facilitateur. En effet, il est pertinent pour le professionnel de connaître l'existence de ce type de test pour pouvoir y faire appel, mais il n'est a priori pas courant qu'il soit amené à les réaliser lui-même. Le protocole complet est décrit à l'annexe 7, et les résultats de son application sur 15 cas différents sont présentés à la section 3.2.

1.3 STRUCTURE DU RAPPORT

Le présent rapport s'articule autour de quatre grandes parties. La section 2 présente la menuiserie traditionnelle bois, le vocabulaire associé, les typologies courantes, et les défauts fréquemment rencontrés. La section 3 décrit les méthodes utilisées dans le projet PERCHE pour estimer les caractéristiques techniques des différents scénarios d'intervention. La section 4 présente la méthodologie pour évaluer l'impact des différents scénarios pour le maître d'ouvrage, sur base des caractéristiques techniques évaluées à la section précédente. Pour finir, la section 5 présente les résultats de l'application des méthodes présentées aux sections 3 et 4 sur quatre cas d'études différents.

2 LES MENUISERIES TRADITIONNELLES BRUXELLOISES

2.1 LE CHÂSSIS ANCIEN EN BOIS

Dans le cadre de cette recherche, nous désignons par « châssis ancien en bois », une menuiserie destinée à porter des vitrages et dont la conception technique est antérieure à celle des châssis actuels à triple frappe et quincaillerie intégrée. En menuiserie, d'une manière générale, un châssis est un cadre. Par extension, le terme peut désigner une fenêtre, notamment.

2.1.1 LE CHÂSSIS

S'il existe des dizaines de modèles châssis anciens en bois, le principe reste toujours le même : un ou des cadr(e)s, appelé(s) « ouvrant(s) » lorsqu'ils sont mobiles et « fixes » dans le cas contraire, qui porte(nt) des vitrages, se rencontrent en un battement et viennent se loger dans les frappes d'un cadre fixe appelé « dormant ».

Chaque cadre se compose d'une série d'éléments constitutifs assemblés et maintenus solidaires par une fixation mécanique (chevilles ou vis). Les pièces verticales sont appelées « montants » et les pièces horizontales « traverses ». L'intérêt de ce type de construction réside dans le fait qu'elle peut être désassemblée entièrement et que chaque élément constitutif peut être remplacé par une nouvelle pièce, façonnée à l'identique ou éventuellement adaptée à un cas particulier. Chacune de ces pièces porte un nom spécifique : pièce d'appui, (re)jet d'eau, sabot, petit bois, imposte, cochonnet, feuillure, ..., de même que chaque profil : mouton, gueule-de-loup, noix, contre-noix, doucine, contre-doucine, ... À Bruxelles, le battement le plus courant est celui dit « gueule-de-loup » et les essences que l'on retrouve le plus sont le chêne et le pitchpin.

2.1.2 LA QUINCAILLERIE

Les parties ouvrantes des châssis sont articulées sur les parties dormantes au moyen d'éléments de quincaillerie. On parle du ferrage » du châssis. Pour les châssis « à gueule de loup », ce sont généralement des charnières dites « briquets », vissées en applique ou dans un défonçage accueillant l'épaisseur de l'aile. D'autres systèmes existent et/ou ont préexisté comme par exemple les fiches à larder qui sont insérées dans une mortaise percée en biais dans les montants ou les paumelles dégonnables.

Les châssis sont maintenus fermés et se manipulent généralement grâce à une « crémone » qui peut être soit à « pompe » soit à « bouton ». On rencontre également des « targettes », sortes de verrous ou des « espagnolettes », plus courantes en France.

2.1.3 LES VITRAGES

Il existe plusieurs types de vitrages actuellement pour garnir les parties ouvrantes des châssis :

- Le simple vitrage, qui fait actuellement généralement 6mm d'épaisseur ;
- Le simple vitrage feuilleté, qui se compose de minimum deux feuilles de verre assemblées l'une contre l'autre à l'aide de films plastiques (PVB), ce qui le rend plus solide et ce qui limite les risques de coupures en cas de bris ;
- Le double vitrage, qui se compose de minimum deux feuilles de verre assemblées l'une proche de l'autre grâce à un intercalaire, la chambre étanché ainsi créée est remplie d'un gaz qui améliore le pouvoir isolant de l'ensemble ;
- Le double vitrage sous vide d'air, qui se compose de deux feuilles de verre également mais dans ce cas, la chambre étanche est vidée de son air. Des petits plots en céramique sont nécessaires pour éviter que les feuilles de verre ne se touchent l'une l'autre. C'est un produit avec un haut pouvoir isolant.

Dans les châssis anciens, on retrouve du simple vitrage, soufflé, étiré ou float, et/ou des vitraux (ou panneaux de vitrerie), posés en « plein bain » de mastic pour assurer la tenue des vitrages et l'étanchéité de la rencontre bois-verre.

2.2 TYPOLOGIE DE CHÂSSIS

Il existe plusieurs typologies de châssis et plusieurs façons d'aborder ces typologies. On peut classer les châssis suivant leur époque, les styles des bâtiments, leur composition technique, leur dessin, leur profil ... Dès que l'on entre dans le détail d'une classification, on peut remarquer que toutes ces données se conjuguent et rendent les possibilités de création - et donc de catégorisation typologiques - quasi infinies. Ce qui est intéressant comme approche pour le projet PERCHE qui nous occupe, c'est de distinguer le nombre de cadres, leur caractère mobile ou fixe et les profils de rencontre entre ces cadres.

On peut ainsi catégoriser entre :

- Châssis simples ouvrants, c'est-à-dire des châssis ne comportant qu'un seul cadre ouvrant ;
- Châssis doubles ouvrants, c'est-à-dire des châssis comportant deux cadres ouvrants et ainsi de suite ;
- Châssis avec imposte, l'imposte étant un cadre placé en partie supérieure dans le dormant, généralement fixe et vitré mais qui peut aussi être plein et/ou mobile ;
- Châssis avec partie latérale, lorsque la composition d'ensemble fait se juxtaposer un/des ouvrant(s) avec une/des partie(s) fixes ;
- Châssis avec (allège, l'allège étant un cadre en partie inférieure, soit fixe, soit ouvrant, soit entrant dans la composition d'une porte-fenêtre, vitré ou plein.

2.3 DÉFAUTS FRÉQUEMMENT RENCONTRÉS

Les dégradations des châssis anciens en bois sont dues à l'exposition aux intempéries (pluie, soleil, vent) du matériau bois sans protection et/ou au maintien dans des conditions humides sans possibilité de séchage. Les défauts d'étanchéité au niveau du joint entre maçonneries et châssis ou entre châssis et vitrages laissent pénétrer l'eau de pluie à l'intérieur des profils.

Le bois est un matériau qui continue à bouger en fonction des conditions hygrométriques dans lesquelles il se trouve, ce même après mise en oeuvre. Par conséquent, les pièces d'un châssis ancien en bois peuvent se déformer. Par ailleurs, on peut aussi retrouver toute une série de dégradations liées à l'utilisation des châssis ou à des interventions techniques malencontreuses.

La restauration consiste à réparer ou remplacer les pièces dégradées et à reconditionner l'ensemble du châssis pour le régler. Lorsqu'une pièce est remplacée partiellement, on parle de « greffe ». Il est également possible d'imbiber le bois de résine si l'on souhaite conserver un élément existant sans procéder à un remplacement partiel ou complet. Toutes les pièces constitutives peuvent être copiées et fabriquées à l'identique. La remise à l'équerre des différents cadres et le réglage sont des étapes cruciales pour garantir la bonne tenue du châssis et son fonctionnement.

2.4 SCORE DE DÉTÉRIORATION

La norme néerlandaise NEN 2767-1 propose une méthodologie pour déterminer de manière objective l'état technique des éléments de construction (les éléments de construction comprennent les parties du bâtiment et des installations) et pour l'enregistrer de façon univoque. Une partie importante de cette méthodologie est constituée par les listes standardisées de défauts.

Malheureusement, la norme ne contient pas de liste spécifique de défauts de fenêtres et portes. L'outil Renocheck ne permettant pas l'ajout de scores de détérioration, cela n'a finalement pas été poursuivi dans le projet. Cependant les principes de la norme sont évoqués ci-après.

Dans la logique de la norme, une menuiserie est une partie constructive (bouwdeel), qui fait partie d'un élément (le mur extérieur) et consiste soi-même de plusieurs composants (par exemple ouvrant, crémone, ...). On peut attribuer un score à cette partie constructive.

Le score final dépend de trois aspects : la gravité (ernst), la grandeur relative et l'intensité des défauts.

La gravité peut prendre une des trois valeurs : gering (peu grave), serieus (sérieux) ou grave (ernstig).

La grandeur relative est déterminée selon ce tableau :

Omvangscore	Percentage	Beschrijving
Omvang 1	< 2 %	Het gebrek komt <u>incidenteel</u> voor
Omvang 2	2 % tot 10 %	Het gebrek komt <u>plaatselijk</u> voor
Omvang 3	10 % tot 30 %	Het gebrek komt <u>regelmatig</u> voor
Omvang 4	30 % tot 70 %	Het gebrek komt <u>aanzienlijk</u> voor
Omvang 5	≥ 70 %	Het gebrek komt <u>algemeen</u> voor

Pour finir, l'intensité donne une valeur à l'état d'avancement de la dégradation :

Intensiteitsscore	Benaming	Toelichting
Intensiteit 1	Beginstadium	Het gebrek is doorgaans nauwelijks waarneembaar en oppervlakkig aanwezig
Intensiteit 2	Gevorderd stadium	Het gebrek is duidelijk waarneembaar en in het oppervlak aanwezig
Intensiteit 3	Eindstadium	Het gebrek is zeer duidelijk waarneembaar, onomkeerbaar en kan niet of nauwelijks toenemen

Il existe ensuite un tableau pour chaque niveau de gravité qui permet de déterminer un score entre 1 et 6, sur base de la grandeur relative et de l'intensité :

Geringe gebreken					
Omvang	1) Incidenteel	2) Plaatselijk	3) Regelmatig	4) Aanzienlijk	5) Algemeen
Intensiteit	(< 2 %)	(2 % tot 10 %)	(10 % tot 30 %)	(30 % tot 70 %)	(≥ 70 %)
1) Beginstadium	1	1	1	1	2
2) Gevorderd stadium	1	1	1	2	3
3) Eindstadium	1	1	2	3	4

Serieuze gebreken					
Omvang Intensiteit	1) Incidenteel (< 2 %)	2) Plaatselijk (2 % tot 10 %)	3) Regelmatig (10 % tot 30 %)	4) Aanzienlijk (30 % tot 70 %)	5) Algemeen (≥ 70 %)
1) Beginstadium	1	1	1	2	3
2) Gevorderd stadium	1	1	2	3	4
3) Eindstadium	1	2	3	4	5

Ernstige gebreken					
Omvang Intensiteit	1) Incidenteel (< 2 %)	2) Plaatselijk (2 % tot 10 %)	3) Regelmatig (10 % tot 30 %)	4) Aanzienlijk (30 % tot 70 %)	5) Algemeen (≥ 70 %)
1) Beginstadium	1	1	2	3	4
2) Gevorderd stadium	1	2	3	4	5
3) Eindstadium	2	3	4	5	6

2.5 AMÉLIORATION POSSIBLES

Il est possible d'intégrer des doubles vitrages dans des châssis anciens en bois en approfondissant la feuillure d'origine. Les possibilités de mise en oeuvre dépendent de l'épaisseur du cadre ouvrant et de la mouluration de son profil. La finesse des doubles vitrages sous vide d'air permet de limiter l'approfondissement de la feuillure voire de s'en passer, suivant l'épaisseur d'origine des profils du châssis.

Il est également possible de placer très simplement des joints d'étanchéité à l'air dans les frappes de rencontre entre parties ouvrantes et parties dormantes. Ces deux opérations améliorent également l'isolation acoustique des châssis anciens en bois.

3 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES INTERVENTIONS

3.1 FENÊTRES ET PERFORMANCES

Dans le cadre de ce projet, nous limitons la questions des performances des fenêtres aux aspects thermiques : transmission, gains solaires, infiltration et ventilation ; et acoustiques : affaiblissement acoustique (Figure 1). Ces performances, traduites sous forme de caractéristiques techniques, sont ensuite utilisées pour évaluer différentes conséquences pour le client (section 4).

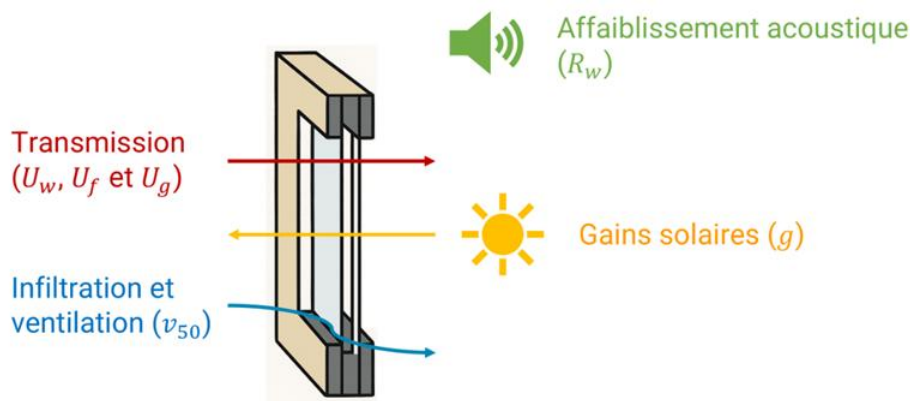


FIGURE 1. SCHÉMA DES PERFORMANCES DE LA FENÊTRE

3.2 ÉTANCHÉITÉ À L’AIR (q_{50})

L’étanchéité à l’air des menuiseries peut être évaluée en laboratoire, en suivant le protocole de test présenté dans la norme [ISO 1026 2016], ou sur site par la méthode directe, plus précise, ou indirecte, plus facile à mettre en œuvre. Le protocole de test pour l’utilisation de la méthode directe, ainsi que les résultats détaillés des tests réalisés dans le cadre de ce projet sont disponibles à l’annexe 7 de ce rapport. Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet sont repris dans le Tableau 1.

TABEAU 1. TESTS D’ÉTANCHÉITÉ À L’AIR SUR MENUISERIE EN BOIS RÉALISÉS DANS LE CADRE DU PROJET PERCHE

Typologie	Présence de joints	Année de construction	Aire de la menuiserie [m²]	Longueur de joint d'ouvrant [m]	Résultat [m³/h]
Double ouvrant	Non	Pré-1950	3.4	7.0	> 100
	Non	1950-2000	2.5	6.0	19
	Oui	Pré-1950	3.4	7.0	20
	Oui	Pré-1950	5.6	10.0	15
	Oui	Pré-1950	5.6	10.0	23
	Partiel	Pré-1950	5.6	10.0	72*
	Oui	Post-2000	5.6	10.0	12
	Oui	Post-2000	5.6	10.0	12
Pivotant	Non	1950-2000	2.9	6.7	36
	Oui	1950-2000	2.9	6.7	16
	Oui	1950-2000	2.9	6.7	60*
Simple ouvrant	Non	Pré-1950	2.0	3.6	> 100
	Oui	Pré-1950	2.0	3.6	23
	Non	Pré-1950	2.0	3.6	> 100
	Oui	Pré-1950	2.0	3.6	57
Guillotine	Non	Pré-1950	2.5	4.7	> 100
	Non	Pré-1950	2.0	3.6	> 100
	Oui	Pré-1950	2.0	3.6	80

L'ensemble des résultats de tests obtenus a également été soumis pour publication et présentation pour la conférence IEQ 2025 [Labrousche, Prignon 2025], et est repris à l'annexe 8. Si les cas testés ne conviennent pas au cas qui intéresse l'utilisateur, les partenaires du projet ont également réalisé une revue de la littérature publiée lors de la conférence AIVC 2024 [Prignon 2024], également disponible à l'annexe 9.

3.3 PERTES PAR TRANSMISSIONS

Les pertes par transmission d'une fenêtre (U_w) est la combinaison des pertes par transmission du vitrage (U_g), du châssis (U_f) et des intercalaires (ψ_p). Ces différents éléments sont pondérés par leurs dimensions comme suit :

$$U_w = U_g * A_g + U_f * A_f + \psi_p * L_p$$

Il est possible de mesurer la valeur U_w directement en laboratoire avec un système de Hot Box – Cold Box selon la norme ISO 12412-2 (section 3.3.1) ou par calculs numériques (section 3.3.2) tel que décrit après.

3.3.1 MESURES EN LABORATOIRE AVEC HAMSTER (U_w)

HAMSTER est un poste d'essais de type boîte chaude - boîte froide situé à Greenbizz, dans le cœur de Bruxelles. Cet équipement unique en Europe est utilisé pour réaliser des essais de type « HAM » (Heat-Air and Moisture) sur des parois de 3 m x 3 m. L'équipement est composé de deux chambres : une boîte froide pour reproduire le climat extérieur et une boîte chaude pour simuler les conditions intérieures. La Figure 2 présente une vue schématique du poste et des plages de performances atteignable pour les différentes parties.

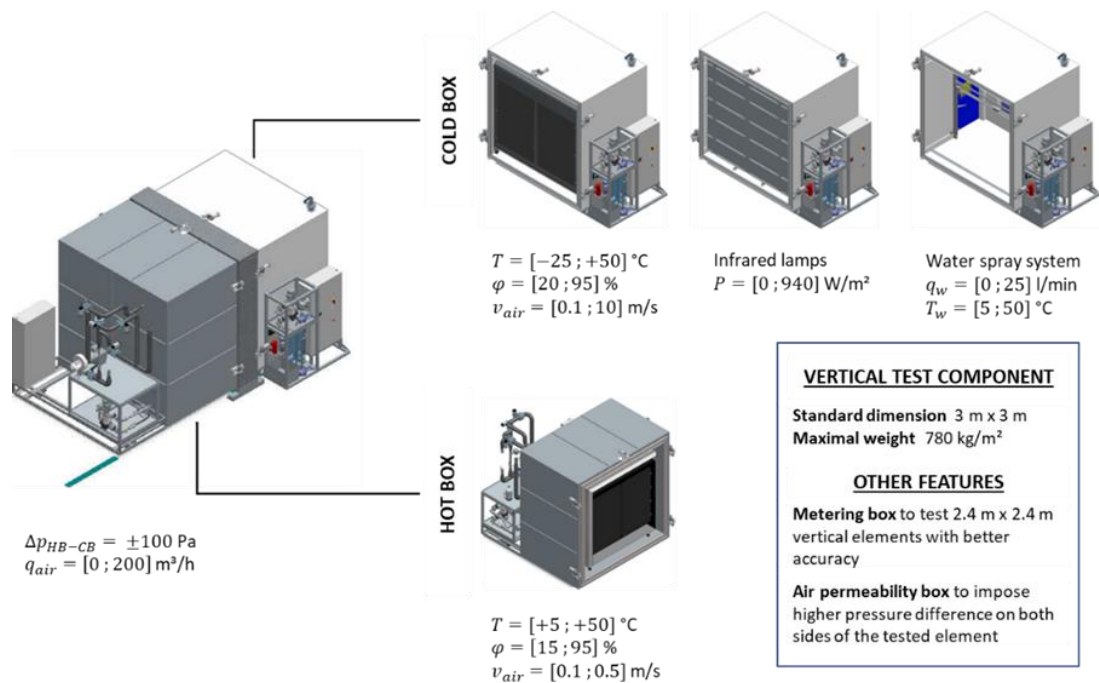


FIGURE 2. SCHÉMA DU POSTE D'ESSAI HAMSTER ET PLAGES DE MESURES POSSIBLES

Dans le contexte du projet PERCHE le poste HAMSTER est utilisé pour évaluer la performance thermique (U_w) des différentes solutions, et ce en plusieurs étapes (Figure 3).

Le mur de test est construit avec une baie aux dimensions du châssis testé.



Test 1 → Le mur est testé en remplissant la baie d'un isolant connu (test de calibration)



Tests 2+ → Le mur est testé avec la fenêtre, et le résultat est déduit grâce au test de calibration



FIGURE 3. ÉTAPES DU PROTOCOLE HAMSTER POUR L'ÉVALUATION DE LA VALEUR U_w DES FENÊTRES

Pour chaque test, le principe de la mesure est assez simple : la puissance de chauffe nécessaire pour maintenir une différence de température donnée (ici 20°C) entre la chambre chaude et la chambre froide est mesurée (P_m). Celle-ci est comparée à la puissance nécessaire pour le test de calibration (P_0), et la résultante est attribuée à la fenêtre (P_w). Cette puissance est ensuite divisée par la surface de fenêtre (A_w) et la différence de température (ΔT) pour obtenir le coefficient de transmission pour la fenêtre dans son ensemble (U_w).

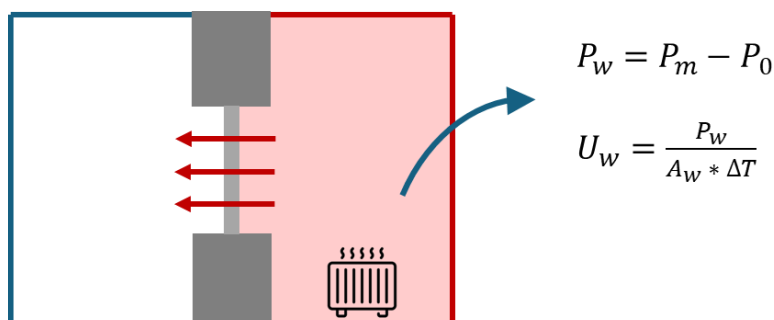


FIGURE 4. CONCEPT SCHÉMATISÉ POUR LE TEST VALEUR U DANS HAMSTER

Les tests HAMSTER ont été réalisés sur deux menuiseries différentes : double ouvrant avec imposte fixe, et simple ouvrant sans imposte et avec croisillons. La description détaillée des tests réalisés et des résultats obtenus sont repris à l'annexe 10, et sont résumés dans le Tableau 2. Ceux-ci sont comparés aux résultats obtenus en suivant la méthode de calcul PEB, qui peut être réalisée à l'aide de l'outil simplifié Uw4wood².

² Uw4wood – <https://www.buildwise.be/fr/expertise-soutien/buildwise-tools/uw4wood/>

TABLEAU 2. RÉSULTATS PRINCIPAUX (VALEUR U_w) OBTENUS PAR LES TESTS HAMSTER

Typologie	Type de vitrage	$U_{w,HAM}$ [W/(m²K)]	$U_{w,App}$ [W/(m²K)]
Double ouvrant avec imposte fixe	Simple vitrage	4.42	4.59
	Double vitrage fin	1.33	1.21
	Double vitrage performant	1.37	1.64
	Vitrage sous-vide	1.63	1.70
Simple ouvrant	Simple vitrage avec croisillons	5.09	4.22
	Double vitrage fin avec croisillons	3.68	2.12
	Double vitrage fin sans croisillons	3.43	1.95

3.3.2 SIMULATIONS NUMÉRIQUES POUR LES PERTES PAR LE CHÂSSIS (U_f)

Le calcul des pertes par le châssis (U_f) selon la norme EN ISO 10777:2-2012 nécessite un calcul détaillé de chaque traverse et de chaque montant. Dans le cadre de ce projet, le calcul des valeurs U_f a été réalisé via l'outil BISCO. Ce type de calculs permet également d'identifier les isothermes, pour ainsi évaluer le point le plus froid du châssis (et la zone à risque de condensation). Des résultats types sont présentés à la Figure 5.

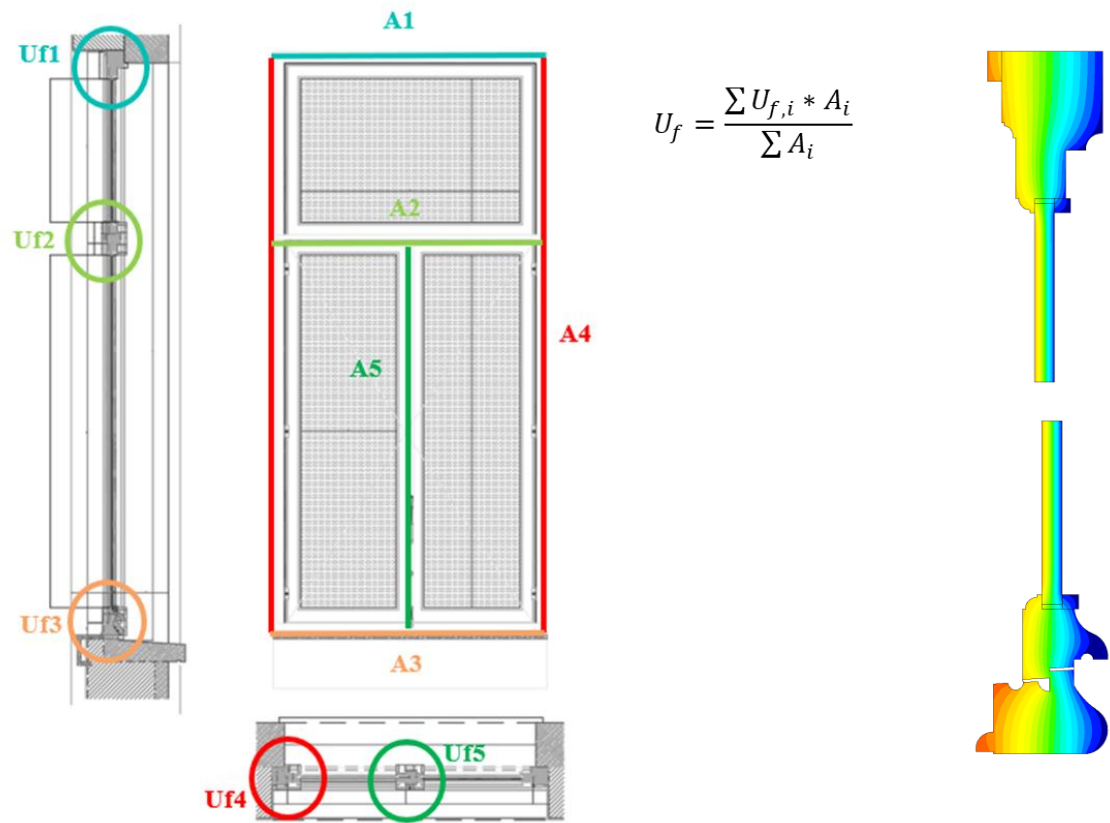


FIGURE 5. REPRÉSENTATION DU CALCUL NUMÉRIQUE (U_f) ET DES ISOTHERMES POUR IDENTIFICATION DES POINTS FROIDS DU CHÂSSIS.

On utilise alors généralement les données fournies par le fabricant du vitrage (ψ et U_g) en plus des résultats des calculs numériques pour déduire la valeur U_w de la fenêtre. Cette méthode a été utilisée dans le cas d'étude #1 (maison des parlementaires), décrit à la section 5.1.

3.4 PERFORMANCE ACOUSTIQUE

La méthode avec haut-parleur (la norme ISO 16283-3 [REF]) est destinée à mesurer l'isolation aux bruits aériens d'une façade complète directement sur site. Cela se fait en déterminant la différence de niveau de pression acoustique extérieur-intérieur lorsqu'une source sonore artificielle génère un bruit à l'extérieur.

Le haut-parleur est placé à au moins 5 mètres de la façade, sous un angle de 45° par rapport au centre de la surface testée. Il génère un signal à large bande (par exemple du bruit rose). À l'extérieur, le niveau de pression acoustique est mesuré à 2 mètres de distance perpendiculairement au centre de la façade testée. À l'intérieur de la pièce, le niveau de pression acoustique moyen est déterminé par balayage de la pièce à l'aide d'un sonomètre.

Enfin, le temps de réverbération doit également être mesuré à l'intérieur pour un certain nombre de positions de source et de sonomètre. Les valeurs spectrales mesurées sont ensuite converties en une valeur unique telle que le DAt_r, conformément à la norme ISO 717-1 [REF].

3.5 APPROCHES QUALITATIVES

En plus de l'évaluation quantitative des performances, il existe des approches qualitatives intéressantes pour la qualité des fenêtres. Dans le cadre du projet PERCHE, deux approches ont été utilisées : la thermographie infrarouge et la caméra acoustique. Les deux applications ayant des objectifs similaires, la caméra acoustique (Figure 6) permet d'identifier les fuites d'air de la menuiserie et la caméra infrarouge (Figure 7) permet d'identifier certains défauts thermiques, par exemple aux bords des vitrages.



FIGURE 6. IMAGE TYPE DE CAMÉRA ACOUSTIQUE AVEC SOURCE SONORE PLACÉE À L'EXTÉRIEUR DU BÂTIMENT



FIGURE 7. IMAGE TYPE DE CAMÉRA INFRAROUGE PRISE DEPUIS L'EXTÉRIEUR PENDANT LA PÉRIODE HIVERNALE

La thermographie infrarouge est une méthode non destructive permettant de visualiser les variations de température à la surface des objets. Elle repose sur la détection du rayonnement infrarouge émis par tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu. Les caméras thermiques convertissent cette énergie en images, où chaque pixel correspond à une mesure de température. Son utilisation dans le domaine du bâtiment permet de détecter les pertes de chaleur, les infiltrations d'air, les ponts thermiques, l'humidité, ou encore des défauts de structure. L'interprétation exige des conditions appropriées : contraste thermique suffisant, absence de vent fort, faible ensoleillement

direct, stabilité des températures ; et une expertise technique adaptée. En effet, des paramètres comme l'émissivité des matériaux et la température apparente réfléchie doivent être correctement réglés pour éviter des erreurs de mesure.

Les caméras acoustiques sont un dispositif qui permet de localiser et visualiser les sources sonores dans l'espace. Elle est composée d'un réseau de microphones (souvent plusieurs dizaines). Chaque microphone capte le son avec un léger décalage temporel selon la position de la source par rapport à lui. Le système calcule ainsi la localisation précise des sources sonores dans le champ observé. Les résultats sont superposés sur une image en temps réel, sous forme de taches colorées. Les caméras acoustiques permettent également de détecter les points faibles acoustiques, dont les infiltrations d'air.

4 ÉVALUER L'IMPACT DES INTERVENTIONS POUR LE CLIENT

Lorsque l'hétérogénéité des conséquences d'une décision est claire, c'est-à-dire qu'aucune conséquence n'est prédominante au point que les autres puissent être négligées, il est préférable d'aborder une problématique décisionnelle sous forme d'approche multicritère. On utilise l'expression *aide multicritère à la décision* pour désigner le processus d'accompagnement – plus ou moins formalisé – menant à une décision pour laquelle on a comparé un ensemble de scénarios possibles sur base de plusieurs critères. Cette forme d'analyse est souvent réalisée, de manière consciente ou pas, par les professionnels accompagnant un client dans le processus de décision.

Lors d'une enquête réalisée en 2024 via les réseaux LinkedIn, 64 personnes ont dû classer par ordre d'importance les différents enjeux liés à une intervention sur les fenêtres extérieures en bois, datant des années 1930. Bien que la méthode d'enquête présente plusieurs biais, dont celui lié au média utilisé, les résultats de cette enquête (Figure 8) illustrent la coexistence des enjeux économiques, environnementaux, de confort et architecturaux.

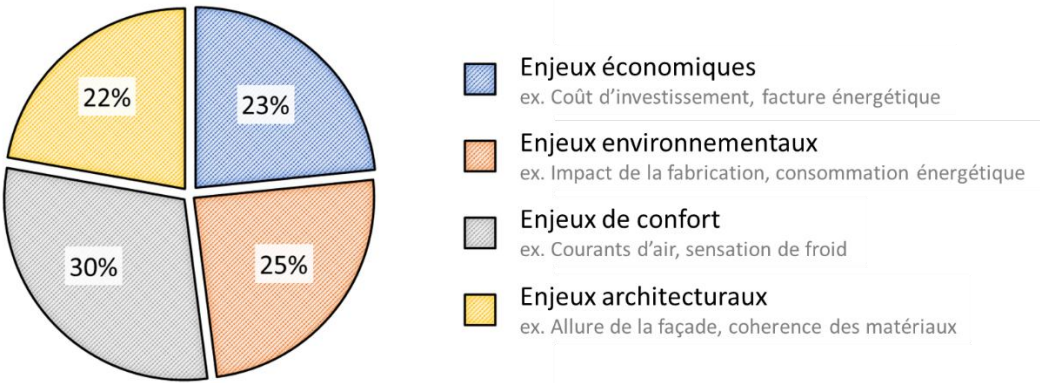


FIGURE 8. IMPORTANCE RELATIVE DES DIFFÉRENTES CATÉGORIES D'ENJEUX SELON LES 64 PARTICIPANTS DE L'ÉTUDE LINKEDIN RÉALISÉE EN 2024

Les méthodes d'analyse multicritère ont gagné en popularité ces dernières années dans le secteur de la construction, en particulier dans un contexte de rénovation énergétique. Par exemple : [Daniel, Ghiaus 2023; Egiluz et al. 2021; Napoli et al. 2020; Ongpeng et al. 2022; Rocchi et al. 2018; Stephan 2014]. Cependant, aucune étude à ce jour ne semble avoir investigué l'application de ces méthodes d'analyse dans un processus de décision au niveau de composants spécifiques du bâtiment, tels que les menuiseries. L'approche multicritère a été utilisée sur un cas fictif en cours de projet, et cela a été publié à travers deux articles, disponibles en annexe de ce rapport : [Stiernon, Prignon 2025] – Annexe 11 et [Labrousse, Stiernon, Prignon 2024] – Annexe 12.

L'analyse multicritère formalisée nécessite de définir deux groupes d'intervenants : le groupe négociant (décisionnaire) et l'équipe experte (accompagnant) ; et de suivre un processus fait d'étapes distinctes et clairement définies [Capacity4dev 2014]. C'est l'étapes d'identification et de sélection des critères d'évaluation qui nous intéresse particulièrement dans cette section. Pour le lecteur intéressé par plus de détails sur l'analyse multicritère, nous le renvoyons aux ouvrages de référence de la littérature : *Méthodologie multicritère d'aide à la décision* [Roy 1985], *Aide multicritère d'aide à la décision : méthodes et cas* [Roy, Bouyssou 1993] et *multicriteria analysis : a manual* [Communities 2009].

4.1 CRITÈRES DE SÉLECTION

Pour définir un ensemble de critère pertinent et cohérent, il est important de les lier à des conséquences réelles. En plus d'une description claire du critère, il faut également définir la méthode d'évaluation et

les unités utilisées. Dans la littérature (Tableau 3), on compte près de 40 critères, que nous avons répartis en 5 axes thématiques : économique, environnemental, technique, social et architectural.

TABLEAU 3. LISTE DES CRITERES REPRIS DANS LA LITTÉRATURE, SUIVANT 5 AXES THÉMATIQUES.

Axe thématique	Critères
Économique (5)	Coût d'investissement (5), temps de retour sur investissement (5), coût de fonctionnement et maintenance (3), valeur monétaire nette (2) et subsides & primes.
Environnemental (12)	Consommation énergétique (5), émissions de CO ₂ (3), déchets générés (2), classe énergétique, réchauffement climatique, distance du lieu de production, appauvrissement des ressources naturelles, espérance de vie humaine, appauvrissement de l'écosystème, appauvrissement de la couche d'ozone, potentiel de modularité et production de produits inorganiques respiratoires.
Technique (9)	Complexité de mise en œuvre (2), contraintes de maintenance, comportement structurel, compatibilité des matériaux, potentiel de monitoring, résistance au feu, adaptation du support, risque de dégradation et comportement par rapport à la condensation.
Social (6)	Confort (hygro)thermique (4), confort acoustique (2), qualité de l'air intérieur, prix du loyer, perte d'espace, gêne causée par l'intervention
Architectural (5)	Contraintes urbanistiques (2), amélioration esthétique de la façade (2), valeur patrimoniale, degré d'intrusion et degré de cohérence avec les alentours.

Dans le cadre du projet PERCHE, nous avons identifié lors d'un workshop avec les membres du comité de suivi du projet, les critères principaux à intégrer lors de la prise de décision dans le contexte d'une intervention sur des menuiseries anciennes.

Notons préliminairement deux choix réalisés lors de l'établissement de cette liste : (1) les critères liés à la gestion de l'humidité dans le bâtiment, et de la qualité d'air intérieur, ne sont pas considérés ici car l'impact de la menuiserie est indissociable (et généralement de moindre importance) de la ventilation globale du bâtiment et (2) les aspects techniques ne sont pas introduits sous forme de critères mais de condition : tout scénario mis en concurrence est considéré comme techniquement faisable (c-à-d. que toute infaisabilité technique conduira à l'exclusion du scénario avant la mise en concurrence). Les conséquences que peuvent représenter des difficultés techniques sont retranscrites à travers d'autres critères, par exemple à travers des critères économiques (impact sur l'investissement).

4.1.1 CRITÈRES ÉCONOMIQUE

Deux indicateurs sont considérés pour le critère économique : le coût d'investissement en € et la facture énergétique en €/an. Le coût d'investissement est directement déduit sur base des devis obtenus pour les différents scénarios. La facture énergétique est déterminée par calcul en suivant la méthode de calcul PEB [Gouvernement région bruxelloise 2023], elle-même inspirée de la norme [ISO 18292 2011] : la consommation d'énergie primaire est calculée (voir annexe 13 pour les équations détaillées), et est multiplié par un coût énergétique de 8.9 c€/kWh³. Dans les cas d'étude, le critère

³ Tarif de gaz moyen pour la région bruxelloise en juillet 2024, selon la Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz.

économique est illustré par un seul critère qui est le coût total sur 30 ans : la somme du coût d'investissement et de la facture énergétique annuelle multipliée par 30.

4.1.2 CRITÈRES ENVIRONNEMENTAUX

L'indicateur « changement climatique » a été choisi pour sa représentativité de l'empreinte carbone. Il évalue les émissions de gaz contribuant à l'effet de serre, qui augmente notamment la température moyenne sur Terre. Les émissions de CO₂, exprimées en kgCO₂eq., sont déterminées pour deux parties différentes :

- L'impact « matériau » qui intègre les phases de production, de mise en œuvre, et de fin de vie. Pour cet impact, les valeurs génériques de la base de donnée Ecoinvent [Ecoinvent 2024] sont utilisées, via l'outil TOTEM [OVAM, SPW, Bruxelles environnement 2024]. On appelle aussi généralement cette partie l'énergie grise.
- L'impact « énergie » intègre les émissions liées à la consommation énergétique pendant la durée de vie de l'élément. Pour cet impact, la consommation d'énergie primaire (calculée via l'annexe 13) est multipliée par un facteur d'émission de CO₂ de 0.202 kg par kWh et par un rapport de pouvoirs calorifiques de 0.90 pour le gaz naturel, valeurs suggérées respectivement dans les lignes directrices et dans la méthode de calcul PEB.

4.1.3 CRITÈRES D'INCONFORT

Le critère d'inconfort se base sur deux indicateurs différents définis dans la norme [ISO 7730 2005]: le risque d'inconfort causé par un courant d'air (Draught Rate) et le risque d'inconfort causé par la proximité d'une surface froide (radiant asymmetry from cool walls). Chacun est défini par un pourcentage de personne pouvant éprouver un inconfort dans une situation donnée.

L'indicateur final est obtenu en considérant la probabilité que quelqu'un ressent au moins une des deux sources d'inconfort, en considérant celles-ci comme des événements indépendants :

$$P_{final} = P_{DR} + P_{TA} - (P_{DR} * P_{TA}) \quad [\%]$$

4.1.3.1 COURANT D'AIR

Pour le courant d'air, ce pourcentage se calcule sur base de la vitesse de l'air (v_a), de la température de l'air (T_a) et de l'intensité des turbulences locales (Tu):

$$P_{DR} = (34 - T_a) * (v_a - 0.05)^{0.62} * (0.37 * v_a * Tu + 3.14) \quad [\%]$$

Cette formule est valide pour T_a compris entre 20 et 26°C et v_a compris entre 0.05 et 0.5 m/s. En l'absence de valeur connue ou mesurée, il est conseillé de considérer $Tu = 40\%$. Malheureusement, le manque de littérature au sujet de l'impact des courants d'air au niveau des fenêtres ne permet pas de déterminer la vitesse d'air à proximité des fenêtres.

Dans ce contexte, il a été décidé d'évaluer le confort pour une différence de pression de 50 Pa, ce qui peut être causé par un vent de ~35 km/h, et une température intérieure de 20°C. On considèrera ensuite que pour chaque mètre courant de longueur de joint d'ouvrant, le courant d'air est causé par une fuite circulaire (par souci de simplification) d'1 cm de rayon. La vitesse d'air ressentie par l'occupant dans la pièce décroît avec la distance de celui-ci par rapport à la fenêtre, et l'on considère l'inconfort à 3 m de la fenêtre comme référence (voir [Cushman-Roisin 2022] pour l'évolution de la vitesse d'air en fonction de la distance). Sous ces hypothèses, la vitesse de l'air est proportionnelle au débit à 50 Pa par mètre de joint d'ouvrant, avec un coefficient de proportionnalité de 0.03 :

$$v_a = 0.03 * q_{50,L} \quad [\text{m/s}]$$

Pour illustrer l'impact de l'étanchéité à l'air sur le confort selon ces hypothèses, le risque d'inconfort pour les différentes classes d'étanchéité à l'air suivant la norme [ISO 12207 2016] est présenté au Tableau 4.

TABLEAU 4. RISQUE D'INCONFORT EN FONCTION DE LA CLASSE D'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR DES FENÊTRES

Classe d'étanchéité	$q_{50,L}$ [m³/(h.m)]	v_a [m/s]	P_{DR} [%]
Classe 1	7.91	0.23	32.2
Classe 2	4.27	0.13	14.2
Classe 3	1.42	0.04	0.0
Classe 4	0.47	0.01	0.0

Il est important de noter que même si l'utilisation d'une grandeur normalisée est indispensable pour permettre une comparaison, celle-ci peut poser des problèmes d'interprétation pour les menuiseries de trop petite ou trop grande taille. Le risque d'inconfort en lui-même dépend fortement des hypothèses réalisées et de la localisation des fuites, il est donc à interpréter avec précaution.

4.1.3.2 ASYMÉTRIE DE TEMPÉRATURE

Le fait d'être proche d'une surface froide crée une asymétrie de température de rayonnement, pouvant également engendrer un inconfort. Le pourcentage de personnes inconfortable à cause de cette différence de température est calculé sur base de la différence de température entre le vitrage et les murs intérieurs d'une pièce (Δt), supposés identique à la température ambiante de la pièce, par l'équation suivante :

$$P_{TA} = \frac{100}{1 + e^{6.61 - 0.345 \cdot \Delta t}} \quad [\%]$$

Si le coefficient de transmission thermique du vitrage (U_g) est connue, il est possible d'estimer la différence de température sur base des températures intérieures et extérieures :

$$\Delta t = (0.13 * U_g) * (T_i - T_e) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Pour cette étude, nous considérerons une différence de température de 20°C entre l'intérieur et l'extérieur et avons donc $\Delta t = 2.6 * U_g$, on peut donc obtenir directement une valeur PD sur base de la valeur U_g . Une série de valeurs calculées pour différents vitrages est présenté au Tableau 5. On observe que, à part pour le simple vitrage, le risque d'inconfort est plus limité que pour l'étanchéité à l'air.

TABLEAU 5. RISQUE D'INCONFORT EN FONCTION DU TYPE DE VITRAGE EN PLACE.

Type de vitrage	U_g [W/(m²K)]	P_{TA} [%]
Simple vitrage	5.8	19.7
Double vitrage sans couche	2.9	1.8
Double vitrage HR	1.0	0.3
Triple vitrage / vitrage sous-vide	0.7	0.3

4.1.3.3 AUTRES SOURCES D'INCONFORT : ACOUSTIQUE ET SURCHAUFFE

L'inconfort acoustique ne suit pas la même règle que l'inconfort thermique : la performance acoustique maximale n'est pas forcément la meilleure. Ceci est lié au fait que les bruits venant de l'extérieurs sont généralement plus supportables que les bruits venant des espaces adjacents. Par conséquent, il n'est pas souhaitable d'avoir une isolation acoustique trop importante pour la façade. Dès lors, on

considèrera qu'une solution « passe » ou « rate » en fonction du niveau d'affaiblissement, mais pas une gradation en fonction de la performance atteinte.

L'inconfort d'été, lié au risque de surchauffe estivale, n'a pas été considéré ici. Il est probable que cette source d'inconfort soit amenée à prendre de l'importance dans les années à venir avec le changement climatique. Sur base de la méthodologie PEB, la contribution d'une fenêtre au risque de surchauffe se calcule avec l'indicateur (I_{oh}), défini comme la somme mensuelle des gains solaires excédentaires. Cette équation est détaillée dans l'annexe 13.

4.1.4 CRITÈRES PATRIMONIAUX

La caractérisation de la valeur patrimoniale des éléments est particulièrement compliquée à cause de la grande subjectivité qu'elle implique. La littérature distingue néanmoins trois aspects différents pour la valeur patrimoniale :

- L'authenticité, c'est-à-dire de savoir si cet élément est d'origine ou remplacés. Pour les éléments d'origine il convient de distinguer les réparations éventuelles et pour les éléments remplacés il convient de distinguer des remplacements à l'identique, et les remplacements classiques, avec ou sans considérations patrimoniales.
- La valeur architecturale (ou esthétique) se retrouve à trois niveaux : la valeur individuelle de la menuiserie, la valeur d'ensemble dans le bâtiment et la valeur liée au contexte (ex : par exemple par rapport au reste de la rue ou du quartier).
- La valeur matérielle inclut deux aspects : l'intégrité (souvent en %) de la menuiserie vis-à-vis des matériaux d'origine et la valeur artisanale (ex : la complexité de fabrication de la menuiserie et la capacité à reproduire une telle complexité).

Dans cette étude, le caractère patrimonial des solutions a été évalué simplement en considérant 4 paramètres. Ceux-ci ont été déterminés sur base des aspects ci-dessus, et en concertation avec un groupe d'experts pour son adaptation à l'échelle des menuiseries. Ceux-ci sont :

- Qualité de manufacture (traditionnelle)
- Représentativité et/ou rareté par rapport à un style architectural
- Valeur urbanistique et architecturale
- Authenticité de la fenêtre dans son ensemble

Le questionnaire patrimoine (annexe 14) présente une description détaillée des questions posées. Cependant dans le cadre de cette étude, cela a été simplifié et pour chaque paramètre, un score de 0 à 4 est défini. Le score global patrimonial de la solution est la combinaison des 4 scores individuels.

4.2 MATRICE DE PERFORMANCES ET DÉCISION FINALE

La matrice de performance indique, pour chaque scénario comparé, le résultat de celui-ci par rapport à chacun des critères sélectionnés dans l'analyse, sur base des indicateurs et méthode d'évaluation définis (Tableau 6).

TABLEAU 6. FORME GÉNÉRALE DE LA MATRICE DE PERFORMANCE

Critères	Coût d'investissement [€]	Facture énergétique [€/an]	Bilan carbone [kgCO ₂ eq.]	Risque d'inconfort acoustique [%]	...
Scénario 1	Scores				
Scénario 2					
Scénario 3					
...					

Cette matrice peut généralement suffire à la prise de décision elle-même. Cependant, il peut y avoir un souhait d'obtenir un score unique final pour chaque scénario mis en concurrence. Évidemment, chaque critère n'a pas le même poids dans la décision pour toutes les situations rencontrées. Si cela peut paraître évident pour deux bâtiments aux fonctions différentes ou pour deux décideurs différents, cela peut également être le cas pour plusieurs menuiseries d'un même bâtiment. Par exemple, dans un logement unifamilial, le critère acoustique n'aura pas la même importance pour les menuiseries donnant sur un axe routier et pour celles orientées vers un intérieur d'ilot. La pondération entre les différents enjeux est ici considérée constante. Il existe dans la littérature plusieurs méthodes d'agrégation des résultats plus complexes, ayant pour but de reproduire un processus de décision humain réaliste : MACBETH, ELECTRE III, ELECTRE TRI, MIVES, etc. Celles-ci ne sont pas investigués dans cette étude.

5 CAS D'ÉTUDE

Cette section reprend plusieurs cas d'étude. Tout d'abord, les sections 5.1 et 5.2 décrivent deux cas réels complets et détaillés, pour lesquels des fiches solutions courtes et détaillées ont été produites (voir annexes 3 à 6). La section 5.3 reprend des études réduites sur l'un ou l'autre cas, visant l'étude d'un ou plusieurs aspects spécifiques.

5.1 LE DOUBLE OUVRANT DE LA MAISON DES PARLEMENTAIRES

5.1.1 DESCRIPTION DU CAS D'ÉTUDE

Le Sénat et la Chambre des représentants (parlement fédéral de Belgique) envisagent l'amélioration des fenêtres d'une aile de la maison des parlementaires, à Bruxelles (± 1000 fenêtres). Dans ce contexte, le bureau d'étude Origins Architecture & Engineering fait appel aux partenaires du projet PERCHE pour évaluer l'impact des différentes solutions, mises en œuvre sur à travers 4 prototypes, qui ont les mêmes dimensions, sont situées à la même hauteur et ont la même orientation. Les différentes solutions envisagées sont décrites évaluées et comparées dans ce document en suivant la méthodologie développée dans le projet et décrite dans les parties précédentes de ce rapport.

La fenêtre existante est une fenêtre double ouvrant avec une imposte fixe. Le profil d'ouverture est de type « gueule-de-loup ». Les châssis datent de la fin du XIX^{ème} siècle et les vitrages sont des doubles vitrages datant des années 80. Les châssis semblent majoritairement en bon état : aucune dégradation n'est constatée au niveau des traverses et des montants. Parmi les châssis existants, certains disposent de joints en silicone moulés au niveau des traverses, montants et de la gueule de loup (SC 0.2), et d'autres n'ont aucun joint d'étanchéité (SC 0.1).



En plus de ces deux situations initiales, 4 scénarios sont comparés :

- SC 1.1 : Remplacement des vitrages existant par des double vitrages performant et pose de joints d'étanchéité à l'air. Le joint d'étanchéité n'est pas posé en traverse haute.
- SC 1.2 : Identique au SC 1.1, mais le joint est posé correctement partout sur la fenêtre.
- SC 1.3 : Identique à SC 1.2, mais les vitrages existants sont remplacés par des vitrages sous-vide.

- SC 2.1 : Les fenêtres existantes sont remplacées par des fenêtres identiques au niveau des dimensions vues et des matériaux. Un profil de fermeture gueule-de-loup est réalisé, avec la quincaillerie adaptée.
- SC 2.2 : Idem SC 2.1, mais un profil de fermeture triple frappe est préféré, avec une quincaillerie moderne.

5.1.2 SOURCE DES DONNÉES ET CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Au niveau des caractéristiques techniques, les données suivantes sont nécessaires : dimensions, étanchéité à l'air (v_{50}), coefficients de transmission thermique du cadre (U_f), du vitrage (U_g) et de l'intercalaire (ψ_g). Les différentes données nécessaires sont obtenues

Le Tableau 7 reprend l'ensemble des données nécessaires pour réaliser l'étude, ainsi que les sources choisies pour l'acquisition de ces données.

TABLEAU 7. RÉCAPITULATIF DES DONNÉES D'ENTRÉES NÉCESSAIRES ET DES SOURCES UTILISÉES POUR CE CAS D'ÉTUDE

Données d'entrée	Sources
Dimensions	Mesures sur site et plans fournis par l'architecte
v_{50}	Mesures sur site et tests antérieurs
U_f	Simulations numériques via EN 10077:2
U_g	Informations fournies par l'architecte ⁴
ψ_g	Valeurs par défauts de la norme EN 10077:1
g	Données génériques de la fédération de l'industrie du verre ⁵

En plus de ces informations, le coût d'investissement a été obtenu sur base des devis fournis par l'architecte, et le calcul de l'ensemble des scores se base sur la méthodologie présentée aux sections 4.1.1 (économique), 4.1.2 (environnementaux), 4.1.3 (confort), et 4.1.4 (patrimoine). Les caractéristiques techniques pour les différents scénarios sont données dans la table ci-après.

TABLEAU 8. RÉCAPITULATIF DES DONNÉES D'ENTRÉES POUR CHAQUE SOLUTION

Données techniques	SC 0.1	SC 0.2	SC 1.1	SC 1.2	SC 1.3	SC 2.1	SC 2.2
v_{50} [m ³ /(hm)]	14.0	1.5	7.2	2.3	2.3	1.2	1.2
U_f [W/(m ² K)]	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.67	1.60
U_g [W/(m ² K)]	3.00	3.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ψ_g [W/(mK)]	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
g [%]	77	77	62	62	62	62	62

5.1.3 RÉSULTATS

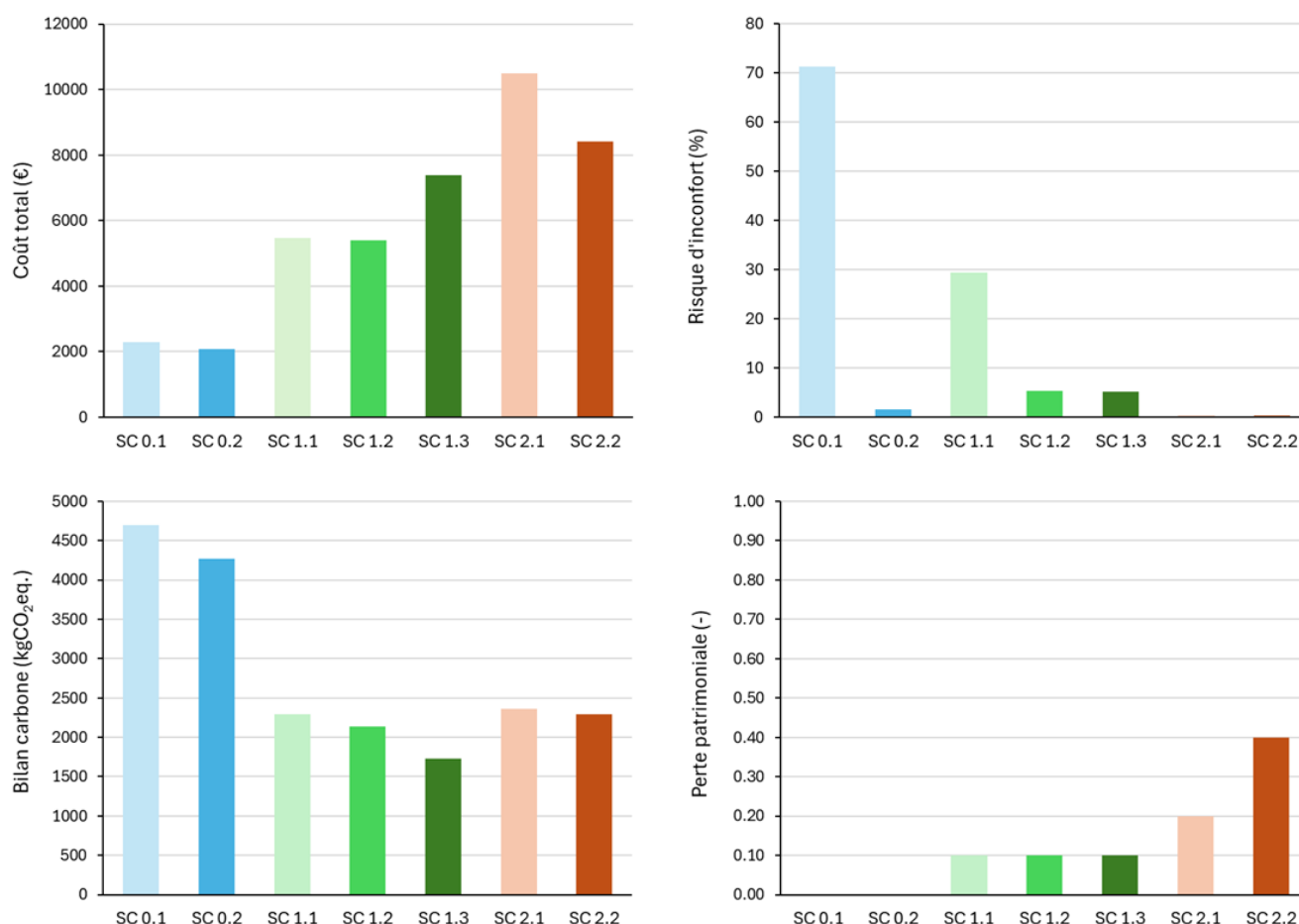
Les scores des différents scénarios sont donnés dans le Tableau 9 et sont représentés graphiquement à la Figure 9.

⁴ En l'absence de données pour la situation initiale, la valeur U_g a été définie à 2.9 W/(m².K).

⁵ <https://www.vgi-fiv.be/wp-content/uploads/2019/08/Un-regard-eclairé-sur-les-vitrages-belges-Juillet-2019.pdf>

TABLEAU 9. RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

Score obtenu	SC 0.1	SC 0.2	SC 1.1	SC 1.2	SC 1.3	SC 2.1	SC 2.2
Economique	2295	2084	5472	5397	7392	10491	8418
Environnemental	4699	4267	2290	2137	1732	2359	2294
Risque d'inconfort	71.2	1.6	29.4	5.3	5.2	0.3	0.3
Perte patrimoniale	0.00	0.00	0.12	0.12	0.12	0.19	0.50



Légende

- SC 0.1 – Situation initiale, sans joint d'étanchéité
- SC 0.2 – Situation initiale, avec joint silicone moulé sur mesure
- SC 1.1 – Remplacement par un double vitrage performant avec joint (mal posé)
- SC 1.2 – Remplacement par un double vitrage performant avec joint (bien posé)
- SC 1.3 – Remplacement par un vitrage sous vide avec joint (bien posé)
- SC 2.1 – Fenêtre neuve à l'identique, avec profil gueule-de-loup
- SC 2.2 – Fenêtre neuve à l'identique, avec profil triple frappe

FIGURE 9. RÉSULTATS GÉNÉRAUX POUR LE CAS D'ÉTUDE DE LA MAISON DES PARLEMENTAIRES

Les conclusions principales qui peuvent être déduites de ces résultats sont :

- Aucune intervention ne réduit suffisamment la facture énergétique pour compenser le coût d'intervention. Parmi les interventions possible, remplacer le vitrage par un double vitrage performant (SC 1.2) sont les moins chères sur 30 ans.
- Le risque d'inconfort thermique est fortement réduit par la présence de joints d'étanchéité à l'air, quelle que soit l'intervention proposée (à condition que le joint d'étanchéité soit placé correctement).

- Le bilan carbone est fortement réduit pour toutes les interventions. Le meilleur résultat est obtenu pour la pose du double vitrage sous-vide (SC 1.3).
- La valeur patrimoniale est globalement respectée pour l'ensemble des solutions. Le remplacement de la fenêtre complète représente malgré tout une perte par rapport au remplacement du vitrage uniquement, en particulier si la quincaillerie n'est pas reproduite également (SC 2.2).

On notera en plus les points d'attention suivant :

- Toutes les solutions d'amélioration représentent une amélioration considérable de l'étanchéité à l'air par rapport à la situation existante sans intervention. Il est important de noter que l'étanchéité à l'air et la ventilation sont indissociables. Une réduction des fuites d'air de $\sim 100 \text{ m}^3/\text{h}$ à 50 Pa (ce qui est le cas ici) implique également une réduction de la ventilation d'un ordre de grandeur de $6 \text{ m}^3/\text{h}$ des débits de ventilation en conditions normales.
- L'inconfort acoustique ne suit pas la même règle que l'inconfort thermique : la performance acoustique maximale n'est pas forcément la meilleure. Ceci est lié au fait que les bruits venant de l'extérieurs sont généralement plus supportables que les bruits venant des espaces adjacents. Dans le cas présent, on constate que toutes les solutions testées conviennent d'un point de vue acoustique (orientation côté cour). Seules les situations existantes sans joints, ainsi que les situations existantes avec joint moulé et côté rue pourraient représenter un inconfort acoustique.

5.2 LA BOW WINDOW D'UNE MAISON MITOYENNE

5.2.1 DESCRIPTION DU CAS D'ÉTUDE

Un propriétaire occupant d'une maison mitoyenne unifamiliale souhaite améliorer le confort intérieur à proximité de la bow-window. Dans ce contexte, un menuisier a été appelé pour mettre en œuvre une solution qui permet de conserver le caractère patrimonial existant de la bow-window. La solution mise en œuvre est décrite et comparée à la situation initiale, ainsi qu'à différentes solutions fictives alternatives qui auraient pu être proposées au propriétaire.

La fenêtre existante est une bow-window en trois parties : deux simples ouvrants et un châssis à guillotine, tous avec imposte fixe. L'ouvrant du châssis à guillotine a été condamné avant la réalisation de la présente étude. Pour chaque partie, l'imposte est composée de vitrage texturé dont un est coloré (vert) et intègre des croisillons traversants. Les châssis sont majoritairement en bon état, à l'exception d'une dégradation au niveau de la traverse basse d'un des ouvrants, pour lequel une greffe est nécessaire, et une déformation du bois dans le temps qui nécessite un redressage. Les châssis ne disposent d'aucun joint d'étanchéité à l'air.

En plus de la situation initiale, on comparera ici les scénarios suivants :

- SC 1.1 : remplacement des vitrages ouvrants par un double vitrage performant et vitrages de l'imposte par deux vitrages collés dont un avec film PVB. Les profils sont rainurés et un joint d'étanchéité est placé.
- SC 1.2 : idem SC 1.1, mais les vitrages des ouvrants sont remplacés par des vitrages sous-vide.
- SC 2.1 : remplacement des vitrages des ouvrants par un double vitrage performant et pose de joint d'étanchéité. Les vitrages de l'imposte sont maintenus en place.
- SC 2.2 : idem SC 2.1, mais les vitrages des ouvrants sont remplacés par des vitrages sous-vide.
- SC 3 : remplacement complet de la menuiserie par une reproduction à l'identique de celle-ci. Les profilés sont épaissis pour pouvoir accueillir un vitrage plus épais et sont directement dotés de joints d'étanchéité à l'air.
- SC 4.1 : remplacement complet de la menuiserie par une fenêtre standard en matériau bois. Le ceintrage est conservé, mais ni les croisillons de l'imposte, ni le verre texturé.
- SC 4.2 : idem SC 4.1 mais en matériau alu. Le ceintrage n'est pas conservé.

5.2.2 SOURCE DES DONNÉES ET CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Au niveau des caractéristiques techniques, les mêmes données que le premier cas d'étude sont nécessaires. Le Tableau 10 reprend l'ensemble des données nécessaires pour réaliser l'étude, ainsi que les sources choisies pour l'acquisition de ces données.

TABLEAU 10. RÉCAPITULATIF DES DONNÉES D'ENTRÉES NÉCESSAIRES ET DES SOURCES UTILISÉES POUR CE CAS D'ÉTUDE

Données d'entrée	Sources
Dimensions	Mesures sur site
v_{50}	Mesures sur site
U_f	Uw4wood ⁶
U_g	Informations fournies par le vitrier
ψ_g	Valeurs par défauts de la norme EN 10077:1
g	Données génériques de la fédération de l'industrie du verre ⁷

En plus de ces informations, le coût d'investissement a été obtenu sur base des devis fournis par le menuisier ainsi que par des fabricants pour les solutions standards. Le calcul de l'ensemble des scores se base sur la méthodologie présentée aux sections précédentes. Les caractéristiques techniques pour les différents scénarios sont données dans la table ci-après (pour les caractéristiques techniques des vitrages, 1 correspond à l'ouvrant et 2 correspond à l'imposte).

TABLEAU 11. RÉCAPITULATIF DES DONNÉES D'ENTRÉES POUR CHAQUE SOLUTION

Données techniques	SC 0	SC 1.1	SC 1.2	SC 2.1	SC 2.2	SC 3	SC 4.1	SC 4.2
v_{50} [m³/(hm)]	23.2	5.5	5.5	5.5	5.5	0.5	0.5	0.5
U_f [W/(m²K)]	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	1.7	1.6	1.6
$U_{g,1}$ [W/(m²K)]	5.8	1.3	0.7	1.3	0.7	1.0	1.0	1.0
$\psi_{g,1}$ [W/(mK)]	0.00	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
g_1 [%]	87	62	62	62	62	62	62	62
$U_{g,2}$ [W/(m²K)]	5.8	3.5	3.5	5.8	5.8	3.5	1.0	1.0
$\psi_{g,2}$ [W/(mK)]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06
g_2 [%]	85	85	85	85	85	85	62	62

5.2.3 RÉSULTATS

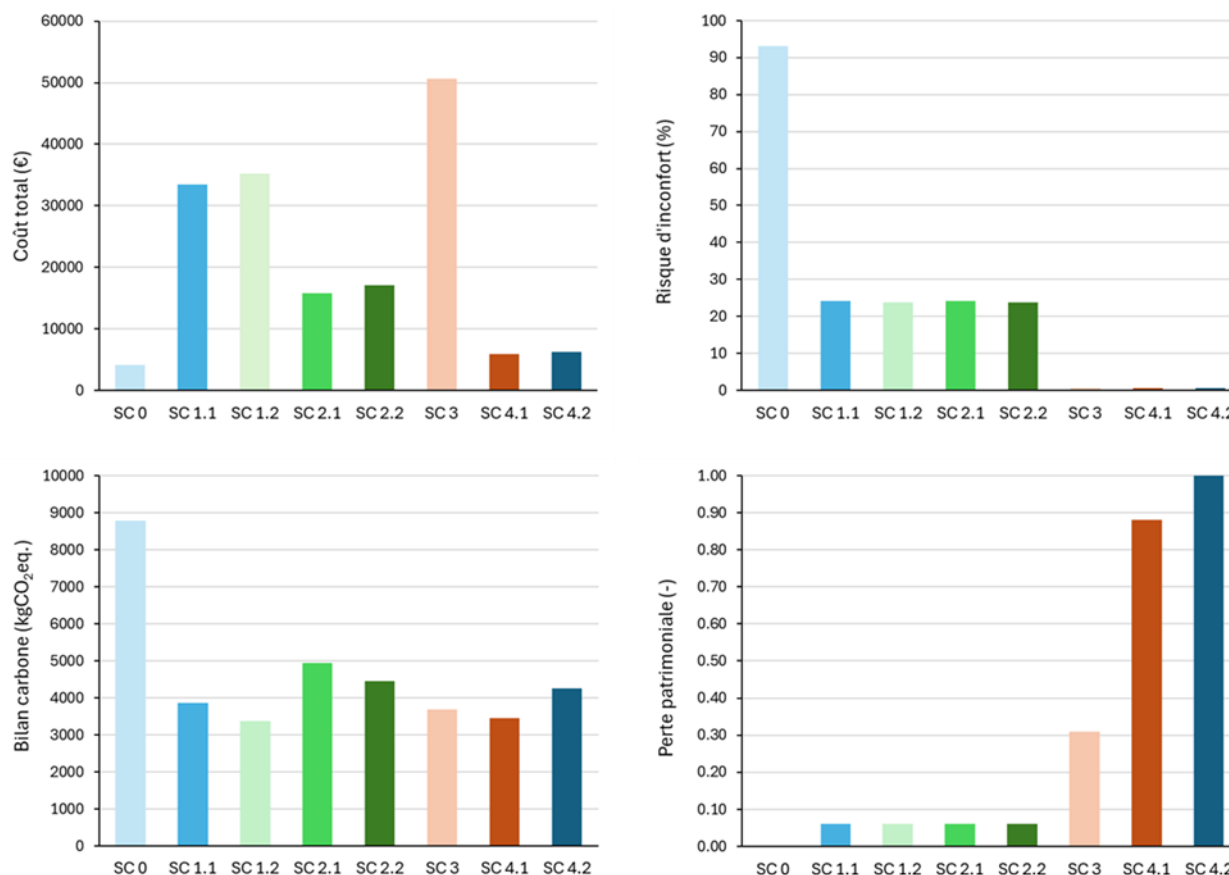
Les scores des différents scénarios sont donnés dans le Tableau 12 sont représentés graphiquement à la Figure 10.

⁶ Outil de calcul Buildwise basé sur la méthode de calcul PEB

⁷ <https://www.vgi-fiv.be/wp-content/uploads/2019/08/Un-regard-eclairé-sur-les-vitrages-belges-Juillet-2019.pdf>

TABLEAU 12. RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

Score obtenu	SC 0	SC 1.1	SC 1.2	SC 2.1	SC 2.2	SC 3	SC 4.1	SC 4.2
Economique	4183	33510	35180	15817	17128	50632	5887	6276
Environnemental	8791	3865	3375	4940	4450	3466	3185	4067
Risque d'inconfort	93.0	24.1	23.8	24.1	23.8	0.6	0.6	0.6
Perte patrimoniale	0.00	0.06	0.06	0.06	0.06	0.31	0.88	1.00

**Légende**

SC 0	Situation initiale
SC 1.1	Remplacement des vitrages (tous, DV principaux), et pose de joints
SC 1.2	Remplacement des vitrages (tous, Sous-vide principaux), et pose de joints
SC 2.1	Remplacement des vitrages (DV principaux) et pose de joints
SC 2.2	Remplacement des vitrages (Sous-vide principaux) et pose de joints
SC 3	Remplacement complet, à l'identique
SC 4.1	Remplacement complet, profilés bois standards
SC 4.2	Remplacement complet, profilés alu standards

FIGURE 10. RÉSULTATS GÉNÉRAUX POUR LE CAS D'ÉTUDE DE LA MAISON DES PARLEMENTAIRES

Les conclusions principales qui peuvent être déduites de ces graphiques sont :

- Aucune intervention ne réduit suffisamment la facture énergétique pour compenser le coût d'intervention. Cependant, le maintien de la valeur patrimoniale des éléments représente un coût non négligeable.
- Le risque d'inconfort thermique est fortement réduit par la présence de joints d'étanchéité à l'air, quelle que soit l'intervention proposée. Notons que le risque d'inconfort est surévalué pour les scénarios 1.1, 1.2, 2.1 et 2.2 (voir point d'attention ci-après).

- Le bilan carbone est fortement réduit pour toutes les interventions. L'ordre de grandeur est similaire pour toutes les solutions proposées.
- La valeur patrimoniale est globalement respectée pour l'ensemble des solutions, à l'exception des scénarios 4.1 et 4.2 pour lesquels la perte est (quasi-)totale. Le remplacement de la fenêtre par une version neuve identique représente une légère perte par rapport au remplacement du vitrage uniquement, dont l'importance peut dépendre du maître d'ouvrage.

On notera en plus les points d'attention suivant :

- Les solutions maintenant le châssis existant (SC 1.1, 1.2, 2.1 et 2.2) montrent encore un haut risque d'inconfort (24%). Cela est lié au modèle théorique utilisé. Rappelons que ce modèle définit – de manière théorique – le risque d'inconfort dans une situation où une différence de pression de 50 Pa est ressentie de part et d'autre de la fenêtre, soit avec des vents aux alentours de 35 km/h. Lors d'une interview post-travaux, l'occupant fait part d'un très haut taux de satisfaction pour le confort atteint avec la solution mise en œuvre.

5.3 AUTRES CAS D'ÉTUDE

D'autres aspects plus spécifiques ont été étudiés ponctuellement sur d'autres cas. Ces cas n'ont pas fait office d'une étude complète et ne constituent pas toujours des cas réellement mis en œuvre. Ils sont décrits sommairement dans les points ci-dessous.

5.3.1 IMPACT DE L'ORIENTATION

L'impact de l'orientation est étudié sur le cas du double ouvrant avec imposte fixe qui a été testé dans le poste HAMSTER (voir section 3.3.1) et dont l'étanchéité à l'air a également été évaluée avant et après pose de joints d'étanchéité. En particulier trois scénarios sont comparés :

- SC 0 : situation initiale (simple vitrage, pas de joints d'étanchéité à l'air)
- SC 1 : remplacement des vitrages par un double vitrage performant et joints d'étanchéité
- SC 2 : remplacement par un châssis neuf, standard

Ces trois scénarios sont étudiés pour trois orientations différentes (Nord, Sud et Ouest), et par rapport à deux critères uniquement : le coût total de la solution ainsi que l'impact environnemental. Les figures ci-après présentent le coût (Figure 11) et le gain d'émissions de carbone (Figure 12) des SC 1 et 2 par rapport à la situation initiale, pour les trois orientations différentes.

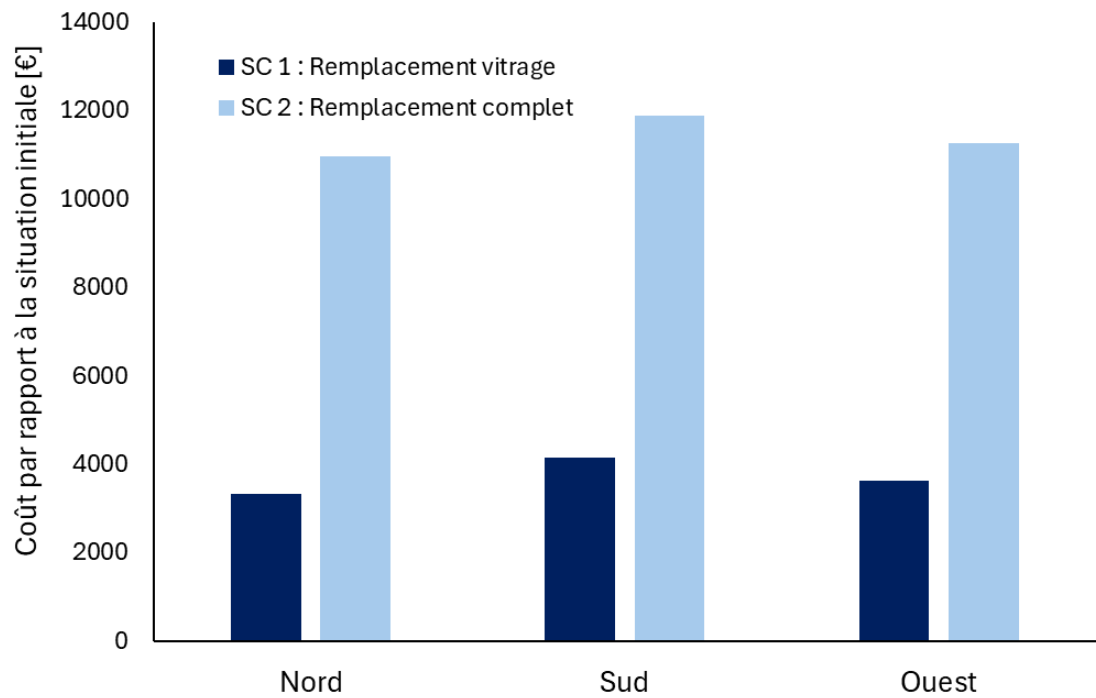


FIGURE 11. COÛT DES SCÉNARIOS PAR RAPPORT À LA SITUATION INITIALE POUR TROIS ORIENTATIONS DIFFÉRENTES

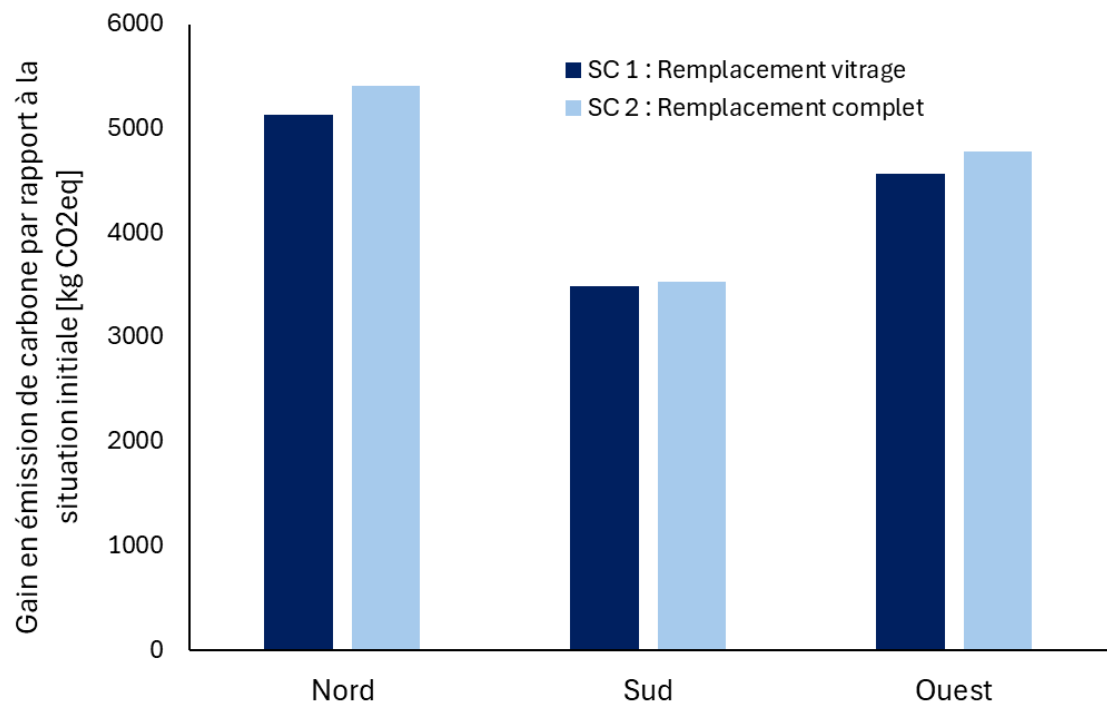


FIGURE 12. RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CARBONE PAR RAPPORT À LA SITUATION INITIALE POUR TROIS ORIENTATIONS DIFFÉRENTES

On peut constater que tant pour les coûts des solutions, que pour la réduction d'impact environnemental, l'orientation de la fenêtre a un impact. Si celui-ci est relativement réduit pour le coût total, il est très important pour le bilan carbone. L'impact d'une solution sera d'autant plus positifs que les gains solaires seront faibles. Cependant, l'influence de l'orientation sur ces impacts positifs semble du même ordre de grandeur pour les différents scénarios.

5.3.2 IMPACT DE L'ENTRETIEN

L'impact de l'entretien est étudié sur le même cas que pour l'orientation. On évaluera la situation sur 60 ans plutôt que 30 ans, en considérant deux cas de figure : soit le châssis est bien entretenu tous les 10 ans et il peut alors être conservé pendant les 60 années, soit il ne l'est pas et il doit être remplacé après 30 ans. Dans les deux cas de figure, les vitrages doivent être remplacés après 30 ans.

- SC 1 : on conserve le châssis pendant 60 ans, en l'entretenant tous les 10 ans, on remplace le vitrage au moment de l'intervention par un double vitrage performant. On remplace ce vitrage après 30 ans.
- SC 2 : on conserve le châssis et on ne l'entretient pas, on doit donc le remplacer – ainsi que le vitrage – après 30 ans (1 fois sur la durée de calcul).
- SC 3 : on remplace le châssis et le vitrage au moment de l'intervention, et également après 30 ans (2 fois sur la durée de calcul).

Les résultats en terme d'impact environnemental (bilan carbone) sont donnés dans le Tableau 13.

TABLEAU 13. RÉCAPITULATIF DU BILAN CARBONE POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

Scénario	Impact matériaux	Impact énergie
SC 1	144	2298
SC 2	271	2425
SC 3	530	2330

Ces résultats montrent qu'en termes de bilan carbone, un entretien tous les 10 ans est favorable, mais il est relativement faible en comparaison avec l'impact de la consommation énergétique. Par ailleurs, le maintien du châssis comme première intervention est plus conséquent que l'entretien régulier. Notons cependant que ce calcul et ces conclusions se limitent à l'impact carbone, sous les hypothèses de consommation énergétique faites dans cette étude.

5.3.3 IMPACT DES MODÈLES ET DE LA PONDÉRATION

L'analyse multicritère réalisée dans le projet PERCHE se base sur des modèles théoriques, qui ne restent qu'une tentative de représentation de la réalité. Pour le cas d'étude de la maison unifamiliale par exemple, le modèle d'inconfort thermique indique un haut pourcentage du risque d'inconfort (24%) pour la solution mise en œuvre, alors que le résultat montre une grande satisfaction du client. De plus, l'absence de pondération dans les analyses réalisées implique que chaque critère (économique, environnemental, patrimonial et confort) ont la même valeur pour le décideur.

Une analyse a été réalisée sur le cas d'une menuiserie de type œil de bœuf (Figure 13) pour laquelle le châssis est abîmé et le simple vitrage en place est abîmé. Par ailleurs, la quincaillerie est également défectueuse et la fermeture de la menuiserie n'est plus assurée correctement. Trois scénarios d'intervention sont envisagés :

- SC 1 : réparation du châssis, remise en place d'un simple vitrage et pose de joint d'étanchéité.
- SC 2 : idem que SC 1, mais remplacement par un vitrage plus performant nécessitant un travail supplémentaire d'approfondissement de la battée.

- SC 3 : remplacement du châssis existant par un châssis neuf standard en bois



FIGURE 13. CHÂSSIS DE TYPE « CEIL DE BŒUF » APRÈS RESTAURATION

Les caractéristiques techniques sont données dans le tableau ci-après. Notons que le SC 0 (situation initiale) est donné à titre indicatif, mais les réparations nécessaires ont fait qu'il

TABEAU 14. RÉCAPITULATIF DES DONNÉES D'ENTRÉES POUR CHAQUE SOLUTION

Données techniques	SC 0	SC 1	SC 2	SC 3
v_{50} [m ³ /(hm)]	40	3.0	3.0	0.5
U_f [W/(m ² K)]	2.4	2.4	2.4	1.5
U_g [W/(m ² K)]	5.8	5.8	1.3	1.3
ψ_g [W/(mK)]	0.00	0.00	0.06	0.06
g [%]	85	85	62	62

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-après. Le score global de chaque scénario est obtenu de la manière suivante : chaque critère est traduit sur une échelle allant de 0 à 100%, et est ensuite combiné en considérant une pondération de 25% pour chaque critère. L'échelle est inversée de manière à ce que l'objectif soit d'atteindre le score le plus élevé possible.

TABEAU 15. RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

Score obtenu	SC 0	SC 1	SC 2	SC 3
Economique	406	1939	2593	2615
Environnemental	831	718	298	424
Risque d'inconfort	91.6	31.7	8.9	0.35
Perte patrimoniale	0.00	0.06	0.13	0.25
Score global	51%	54%	65%	60%

On peut voir que parmi les scénarios envisagés, le SC 1 est financièrement et patrimoniallement plus intéressant que les deux autres, mais a un bilan carbone plus important et un risque d'inconfort nettement plus grand. Le score global l'indique comme la pire solution possible (après la situation initiale). Malgré cela, c'est bien la solution qui a été retenue par le maître d'ouvrage.

La fenêtre est située dans une cage d'escalier qui n'est pas chauffée, ce qui réduit considérablement la consommation de chauffage qui lui est lié (elle contribue à refroidir un espace adjacent non-chauffé plutôt que le volume chauffé). Par ailleurs, sa localisation rend le risque d'inconfort associée beaucoup

moins importante puisqu'il s'agit d'un lieu de passage. On fera l'hypothèse que la consommation énergétique liée est divisée par 10, et que l'inconfort causé pèse à 10% dans la pondération totale (pour 30% pour les 3 autres critères). Les résultats modifiés sont présentés dans le Tableau 16.

TABLEAU 16. RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

Score obtenu	SC 0	SC 1	SC 2	SC 3
Economique	41	1625	2464	2513
Environnemental	84	75	35	216
Risque d'inconfort	91.6	31.7	8.9	0.35
Perte patrimoniale	0.00	0.06	0.13	0.25
Score global	88%	76%	70%	60%

Sous ces hypothèses là le scénario 1 devient la solution la plus intéressante parmi les solutions proposées. Cela met en avant l'importance de garder un esprit critique tant sur les modèles utilisés que sur la situation considérées, et que les résultats chiffrés proposés doivent être analysés et utilisés avec précaution.

6 LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Syllabus de formation, pour le module de sensibilisation

Annexe 2. Guide d'utilisation de l'application RenoCheck

Annexe 3. Fiche solution courte #1 : La maison des parlementaires, Bruxelles

Annexe 4. Fiche solution détaillée #1 : La maison des parlementaires, Bruxelles

Annexe 5. Fiche solution courte #2 : La maison unifamiliale, Waterloo

Annexe 6. Fiche solution détaillée #2 : La maison unifamiliale, Waterloo

Annexe 7. Protocole de mesure de l'étanchéité à l'air sur site, et résultats des tests réalisés

Annexe 8. Publication scientifique (AIVC 2025) – Airtightness of traditional wooden windows and its impact on the occupant and the building

Annexe 9. Publication scientifique (AIVC 2024) – Literature Review on Windows Airtightness Performances Insights and Gaps

Annexe 10. Mesures réalisées avec HAMSTER

Annexe 11. Publication scientifique (Brussels Studies, Preprint) – Quel avenir pour nos fenêtres traditionnelles ? Application d'une approche multicritère sur différents scénarios de rénovation.

Annexe 12. Publication scientifique (EEHB 2024) – Enhancing Heritage Wooden Windows: A Multi-Criteria Decision-Making Approach for Thermal Performance Improvement

Annexe 13. Détail des calculs de consommation énergétique suivant la méthode de calcul PEB

Annexe 14. Questionnaire patrimoine

7 RÉFÉRENCES

BRUXELLES ENVIRONNEMENT, 2025. Consommation d'énergie. *Environment.Brussels* [en ligne]. 3 juillet 2025. [Consulté le 4 septembre 2025]. Disponible à l'adresse : <https://environnement.brussels/citoyen/outils-et-donnees/etat-des-lieux-de-lenvironnement/consommation-denergie#consommation-finale-denergie-en-rbc>

CAPACITY4DEV, 2014. Evaluation methodological approach. *European Union* [en ligne]. 2014. Disponible à l'adresse : https://capacity4dev.europa.eu/groups/evaluation_guidelines_en

COMMUNITIES, Local Government, 2009. *Multi-criteria analysis: a manual*. London : Department for Communities and Local Government.

CUSHMAN-ROISIN, Benoit, 2022. *Environmental Fluid Mechanics*. John Wiley&Sons, Inc. New Hampshire.

DANIEL, Souleymane et GHIAUS, Christian, 2023. Multi-Criteria Decision Analysis for Energy Retrofit of Residential Buildings: Methodology and Feedback from Real Application. *Energies*. 2023. Vol. 16, n° 2. DOI 10.3390/en16020902.

ECOINVENT, 2024. *Environmental data* [en ligne]. 2024. [Consulté le 2 octobre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://ecoinvent.org/database/>

EGILUZ, Ziortza, CUADRADO, Jesús, KORTAZAR, Andoni et MARCOS, Ignacio, 2021. Multi-Criteria Decision-Making Method for Sustainable Energy-Saving Retrofit Façade Solutions. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, n° 23. DOI 10.3390/su132313168.

GOUVERNEMENT RÉGION BRUXELLOISE, 2023. Annexe XXIV - Méthode PER. Méthode de détermination de la consommation d'énergie primaire des unités résidentielles. . 2023.

ISO 1026, 2016. Windows and doors - Air permeability - Test method. *Belgium: CEN*. 2016.

ISO 7730, 2005. *Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. 2005.

ISO 12207, 2016. Windows and doors - Air permeability - Classification. *Belgium: CEN*. 2016.

ISO 18292, 2011. *Energy performance of fenestration systems for residential buildings - Calculation procedure*. 2011.

LABROUCHE, Violette et PRIGNON, Martin, 2025. Airtightness of traditional wooden windows and its impact on the occupant and the building. In : *IEQ 2025: Rising to new challenges: Connecting IEQ to a sustainable future*. Montreal, Canada. 2025.

LABROUCHE, Violette, STIERNON, Dorothée et PRIGNON, Martin, 2024. Enhancing Heritage Wooden Windows: A Multi-Criteria Decision-Making Approach for Thermal Performance Improvement. In : *The 5th International Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings*. Austria. 2024.

NAPOLI, Grazia, BOTTERO, Marta, CIULLA, Giuseppina, DELL'ANNA, Federico, FIGUEIRA, José Rui et GRECO, Salvatore, 2020. Supporting public decision process in buildings energy retrofitting operations: The application of a Multiple Criteria Decision Aiding model to a case study in Southern Italy. *Sustainable Cities and Society*. 1 septembre 2020. Vol. 60, pp. 102214. DOI 10.1016/j.scs.2020.102214.

ONGPENG, Jason Maximino C., RABE, Brian Immanuel B., RAZON, Luis F., AVISO, Kathleen B. et TAN, Raymond R., 2022. A multi-criterion decision analysis framework for sustainable energy retrofit in buildings. *Energy*. 15 janvier 2022. Vol. 239, pp. 122315. DOI 10.1016/j.energy.2021.122315.

OVAM, SPW et BRUXELLES ENVIRONNEMENT, 2024. Tool to Optimize the Total Environmental impact of Materials (TOTEM). *Totem - create, evaluate, innovate* [en ligne]. 2024. [Consulté le 1 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.totem-building.be/>

PRIGNON, Martin, 2024. Literature Review on Windows Airtightness Performances: Insights and Gaps. In : *44th AIVC Conference*. Dublin, Ireland. 2024.

RENOLUTION, 2024. La RENOLUTION Bruxelloise ! *Renolution.brussels* [en ligne]. 2024. [Consulté le 7 mars 2024]. Disponible à l'adresse : <https://renolution.brussels/fr/la-renolution-bruxelloise>

ROCCHI, L., KADZIŃSKI, M., MENCONI, M.E., GROHMANN, D., MIEBS, G., PAOLOTTI, L. et BOGGIA, A., 2018. Sustainability evaluation of retrofitting solutions for rural buildings through life cycle approach and multi-criteria analysis. *Energy and Buildings*. 15 août 2018. Vol. 173, pp. 281-290. DOI 10.1016/j.enbuild.2018.05.032.

ROY, Bernard, 1985. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris, France : Economica.

ROY, Bernard et BOUYSSOU, Denis, 1993. *Aide multicritère à la décision : méthode et cas*. France : Economica.

STEPHAN, Emma, 2014. *Méthode d'aide à la décision multicritère des stratégies de réhabilitation des bâtiments anciens en pierre calcaire - Application au patrimoine en tuffeau*. Université de Lyon.

STIERNON, Dorothée et PRIGNON, Martin, 2025. Quel avenir pour nos fenêtres traditionnelles ? Application d'une approche multicritère sur différents scénarios de rénovation. . 2025.

TRACHTE, Sophie, EVRARD, Arnaud, GALAN, Arancha et ATHANASSIADIS, Aristide, 2014. Assessing Sustainable Retrofit of the old Dwellings Stock in Brussels Capital Region. In : *Sustainable habitat for developing societies*. Ahmedabad, India. 2014.