

LA RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS À INTÉRÊT PATRIMONIAL



TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES RÉALISÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE MASTER EN INGÉNIEUR CIVIL ARCHITECTE PAR **ANNE-CLAIRE OLIVIER**

LA RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS À INTÉRÊT PATRIMONIAL

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention
du grade de Master en Ingénieur Civil Architecte par Anne-Claire OLIVIER

PROMOTRICE

Sigrid REITER

MEMBRES DU JURY

Thomas DERUYVER

Jean-Marie HAUGLUSTAINE

Pierre LECLERCQ

Pierre PAQUET

ANNÉE ACADÉMIQUE

2013 - 2014

UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Faculté des Sciences Appliquées

REMERCIEMENTS

Ce travail achevé, je souhaite remercier:

Madame S. Reiter, promotrice de ce travail de fin d'études, pour ses conseils et son suivi tout au long de l'élaboration de ce travail,

Monsieur T. Deruyver, membre de mon jury, pour sa disponibilité, son intérêt porté à la réalisation de ce travail et son aide précieuse,

Messieurs J.-M. Hauglustaine et P. Paquet, membres de mon jury, pour leur expérience et leurs conseils avisés.

J'aimerais particulièrement remercier les architectes et propriétaires suivants pour leurs réponses et informations fournies :

Messieurs N. Brombart et M. Van der Stricht du bureau Marc Van der Stricht Architecte,

Monsieur J. Coupeuz du bureau Coupeuz et Associés Architectes,

Monsieur G. Wislez du bureau AW Architectes,

Madame J. Willem du bureau A2M,

Monsieur. P. Lorenzi,

Monsieur S. Petit du bureau TRIO Architecture,

Monsieur. A. Evrard d'Architecture et Climat

et Monsieur et Madame Coppens.

Je tiens également à remercier ma famille et mon entourage pour leur soutien, leurs encouragements et la relecture de ce travail.

“Learn from yesterday,
live for today,
hope for tomorrow.
The important thing is not to stop questioning.”
Albert EINSTEIN

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION		1
1	CONTEXTE ACTUEL	1
	1.1 Energie	1
	1.2 Patrimoine	2
2	OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE	3
ETAT DE L'ART		4
1	COMPARAISON ENTRE LE BÂTI ANCIEN ET LE BÂTI MODERNE	4
	1.1 Bâti ancien vs bâti moderne	4
	1.2 Comportement hygrothermique	5
2	AMÉLIORATION DE L'ENVELOPPE	8
	2.1 La toiture	8
	2.2 Les planchers	14
	2.3 Les murs	17
	2.4 Les châssis	24
	2.5 Les isolants	30
3	SYSTÈMES	35
	3.1 Ventilation	35
	3.2 Chauffage	37
	3.3 Eau chaude sanitaire	40
	3.4 Electricité	40
4	ENVIRONNEMENT	41
ANALYSE DE CAS		42
1	INTRODUCTION DE L'ANALYSE	42
	1.1 Objectifs et champ d'étude	42
	1.2 Méthodologie	42
	1.3 Présentation des cas	43
2	MAISON HANKAR SAINT-GILLES (B)	44
	2.1 Présentation du bâtiment étudié	44
	2.2 Techniques de rénovation	46
	2.3 Economies	49
3	ANCIEN MOULIN DE L'ABBAYE DE GRANDPRÉ GESVES (B)	50
	3.1 Présentation du bâtiment étudié	50
	3.2 Techniques de rénovation	52
	3.3 Economies	55
4	IMMEUBLE À APPARTEMENTS ANGLEUR (B)	56
	4.1 Présentation du bâtiment étudié	58
	4.2 Techniques de rénovation	58
	4.3 Economies	61
	4.4 Autres : aspect social	61
5	BUREAUX DU CPAS FOREST (B)	62
	5.1 Présentation du bâtiment étudié	62
	5.2 Techniques de rénovation	64
	5.3 Economies	68
	5.4 Autres : utilisation de logiciel	69

6	MOULIN CASTRAL HOLLOGNE-SUR-GEER (B)	70
6.1	Présentation du bâtiment étudié	70
6.2	Techniques de rénovation	72
6.3	Autres : production d'électricité verte	73
7	REFUGE FORTIFIE OMAL (B)	74
7.1	Présentation du bâtiment étudié	74
7.2	Techniques de rénovation	75
7.3	Utilisation de logiciel	76
7.4	Autres : compromis patrimoine et énergie	79
8	CONCLUSION DE L'ANALYSE DE CAS	80
MÉTHODOLOGIE		83
1	POURQUOI ISOLER ?	84
1.1	A l'échelle de la Belgique, faut-il isoler ?	84
1.2	A l'échelle du bâtiment, faut-il isoler ?	84
2	COMMENT ISOLER ?	86
2.1	La toiture	86
2.2	Les planchers	90
2.3	Les murs extérieurs	93
2.4	Les châssis	96
3	CONCLUSION	99
CONCLUSION & PERSPECTIVES		100
TABLE DES FIGURES		102
TABLE DES TABLEAUX		105
ANNEXES		106
BIBLIOGRAPHIE		114

INTRODUCTION

1 CONTEXTE ACTUEL

1.1 ENERGIE

A l'échelle européenne, la Belgique fait partie des pays les plus consommateurs d'énergie primaire. Les émissions de gaz à effet de serre, liées à cette **consommation énergétique**, sont également très élevées. Ces chiffres peuvent être expliqués par la forte présence d'industries chimiques, la densité du trafic routier et la mauvaise performance thermique des logements, sur laquelle nous nous pencherons dans ce travail. (Branders, et al., 2011)

Ainsi, le secteur du bâtiment (logement et tertiaire) représentait, en 2011, environ 30 % de la consommation d'énergie finale en Belgique et était responsable de 20 % des émissions de CO₂. (Conseil Central de l'Economie, 2009; SPF) Les secteurs résidentiel et tertiaire représentent respectivement 65 % et 35 % de la consommation d'énergie finale du secteur du bâtiment.

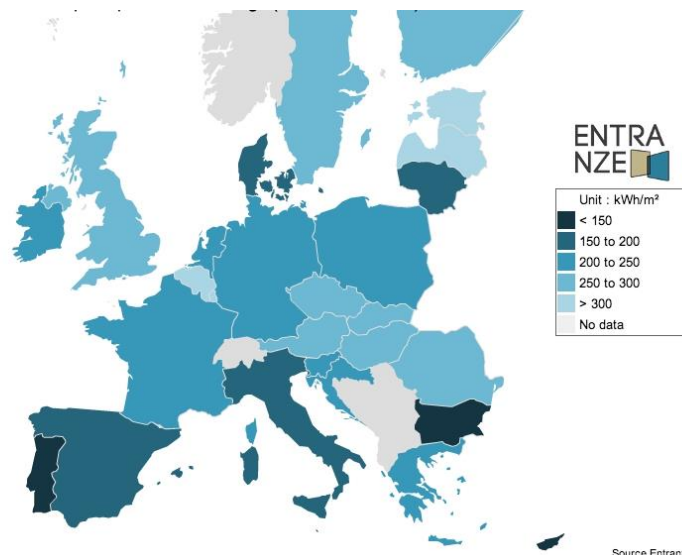


Figure 1 - Consommation unitaire totale par m² de bâtiments (à climat normal)
(Entranze, 2008)

La consommation énergétique moyenne belge d'un bâtiment s'élève à 348 kWh/m².an contre 203 kWh/m².an pour la moyenne européenne. (cf. Figure 1) (Entranze, 2008)

Ces chiffres révèlent donc que l'efficacité énergétique des bâtiments en Belgique est assez peu performante. La rénovation énergétique des logements constitue donc un enjeu majeur d'une part pour la Belgique, grâce à la diminution de ses émissions de gaz à effet de serre et d'autre part pour les occupants, grâce à la diminution des factures énergétiques et à l'amélioration de leur confort.

Afin de lutter contre le réchauffement climatique et de maintenir les ressources énergétiques de la planète, le Parlement européen et le Conseil ont publié le 4 janvier 2003 une Directive européenne concernant la **performance énergétique des bâtiments** : la Directive 2002/91/EG. Chaque Etat membre de l'Union Européenne a pour obligation d'établir une réglementation sur la performance énergétique. En Belgique, cette responsabilité revient aux régions. (Delmotte, 2005)

En plus de cette réglementation, des **aides financières** sont accordées dans le but de motiver les propriétaires à améliorer la performance énergétique de leur logement. Leurs conditions d'octroi varient en fonction des régions, des communes, des provinces et des années.

1.2 PATRIMOINE

Le patrimoine est, d'après l'article 185 du CWATUPE, « l'ensemble des biens immobiliers dont la protection se justifie en raison de leur intérêt historique, archéologique, scientifique, artistique, social, technique ou paysager ». (SPW - DGO4, 2011)

Cette protection se décline selon différents niveaux:

- L'inventaire du patrimoine monumental de Wallonie
- Le classement en tant que monument, ensemble architectural, site ou site archéologique
- La zone de protection
- L'inscription sur la liste de sauvegarde
- La liste du patrimoine exceptionnel
- La liste du patrimoine mondial de l'humanité (DGO4 - IPW - Centre de la Paix-Dieu)



Figure 2 - Musée Curtius, Liège (Wikipedia, 2014)

La Belgique est pourvue d'un patrimoine remarquable au travers d'un grand nombre de biens immobiliers protégés. Les Régions Wallonne et Bruxelles-Capitale comptent environ 5000 biens classés, dont 3450 monuments ainsi que 45 000 biens repris à l'Inventaire. (Deruyver, 2014; Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale - AATL - DMS, 2014)

Il est de notre devoir de transmettre cet héritage commun légué par les générations précédentes aux générations futures. Cette transmission passe par la restauration, l'entretien, la réaffectation, ... du patrimoine mais peut aussi passer par sa rénovation énergétique. En effet, celle-ci présente les mêmes avantages qu'une rénovation énergétique classique, c'est-à-dire l'amélioration du confort des occupants, la diminution des coûts énergétiques pour le propriétaire et la diminution des émissions de gaz à effet de serre. Mais elle en permet surtout la conservation et l'entretien grâce à une nouvelle vie qui permet de transmettre ses valeurs, sa richesse, sa diversité et son témoignage aux générations futures.

En Belgique, la **réglementation sur la performance énergétique des bâtiments** s'applique à tout bâtiment visé par des travaux de construction, de reconstruction et de transformation nécessitant l'octroi d'un permis d'urbanisme, *à l'exception, entre autres, des bâtiments repris à l'inventaire du patrimoine, des bâtiments classés ou inscrits sur la liste de sauvegarde, lorsque les exigences P.E.B. sont incompatibles avec les raisons pour lesquelles le bâtiment a bénéficié d'une mesure de protection.* (Ministère de la Région Wallonne, 2007)

A priori donc, la législation PEB s'applique sur les bâtiments classés, inscrits sur la liste de sauvegarde ou repris à l'inventaire. C'est au propriétaire à prouver qu'il ne peut pas respecter la législation. (Deruyver, 2014) (cf. Annexe 1)

Des aides financières pour les travaux de prévention, les études préalables ou les opérations de maintenance ou de restauration visant la conservation intégrée des biens existent également en fonction de leur niveau de protection.

2 OBJECTIFS ET METHODOLOGIE

L'objectif de ce travail n'est pas de donner une réponse unique à la question : « Comment concilier conservation du patrimoine et rénovation énergétique ? » mais de présenter un aperçu des solutions qui existent en fonction des caractéristiques patrimoniales des bâtiments, en vue d'une amélioration énergétique. Ce travail se concentre sur des bâtiments résidentiels et tertiaires situés dans les Régions Wallonne et Bruxelles-Capitale. Ce travail se divise en trois parties.

La première partie du travail est consacrée à un état des lieux de la littérature en matière de techniques de rénovation énergétique d'un bâtiment à intérêt patrimonial.

Tout d'abord, les comportements hygrothermiques du bâti moderne et du bâti ancien sont comparés afin de bien comprendre leurs différences qui nécessitent des solutions adaptées.

Ensuite, les solutions techniques actuelles sont exposées avec leurs avantages et leurs inconvénients. Celles-ci concernent d'une part l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment au niveau de la toiture, du sol, des murs extérieurs et des châssis. D'autre part, elles concernent l'amélioration des systèmes au niveau du système de chauffage, de production d'eau chaude sanitaire, de ventilation et d'électricité.

La deuxième partie du travail concerne une étude de six cas présentant un intérêt patrimonial et ayant subi une rénovation énergétique. Cette analyse a été menée selon une méthodologie précise qui sera expliquée plus en détails. Ces cas sont partagés en deux catégories : une catégorie reprenant des « cas classiques » constituée de typologies de bâtiments à intérêt patrimonial fréquentes et une catégorie reprenant des « cas particuliers », qui font appel à des solutions spécifiques pour parvenir à une bonne efficacité énergétique.

La comparaison des techniques exposées dans la littérature et des conclusions de l'analyse de cas sera présentée dans *la troisième partie* de ce travail. Celle-ci se concentre sur l'élaboration d'un outil d'aide à la rénovation d'un bâtiment à intérêt patrimonial. Elle se présente sous la forme de quatre outils décisionnels qui, étape par étape, donnent des pistes de solutions quant à l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment tout en respectant ses caractéristiques patrimoniales.

ETAT DE L'ART

1 COMPARAISON ENTRE LE BÂTI ANCIEN ET LE BÂTI MODERNE

Avant d'aborder les techniques de rénovation et l'analyse de cas, il est important de bien comprendre les différences qui existent entre le bâti ancien et le bâti moderne. En effet, le bâti ancien, de par sa composition, a un fonctionnement hygrothermique très différent du bâti moderne. Malheureusement, dans un souci de simplification et d'économie, il a tendance à être traité de la même façon que le bâti moderne, ce qui peut entraîner de graves détériorations et le mener à sa perte. Une bonne connaissance de son comportement est donc nécessaire avant d'entamer tous travaux de rénovation. (MPF, 2011)

1.1 BATI ANCIEN VS BATI MODERNE

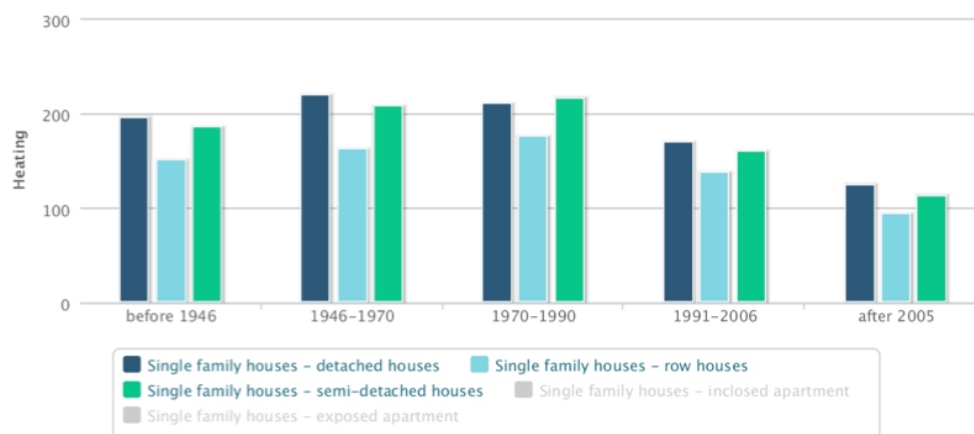


Figure 3 - Niveau de consommation en chauffage par type de bâtiments et groupe d'âge (kWh/m².an) en Flandres (Belgique) (BPIE)

Le bâti ancien domine jusqu'à la 1^e Guerre Mondiale. Il utilise des matériaux naturels de production souvent locale et qui sont généralement durables. Ses parois sont hétérogènes, à la fois dans leur disposition verticale – par exemple, un mur en pans de bois et torchis sur soubassement en maçonnerie – et dans leur disposition horizontale – de par la diversité des matériaux utilisés : terre, chaux, pierres diverses, enduits, bois, plâtre, etc.

Dans les années 50, après les deux guerres mondiales, le besoin de reconstruction rapide et la demande de logements élevée entraînent une augmentation de l'utilisation des matériaux industriels comme le béton qui, grâce à leur facilité et leur rapidité de mise en œuvre, supplantent rapidement les méthodes de construction traditionnelles en faveur de bâtiments plus économes. Dans les années 70, le 1^{er} choc pétrolier amène à reconsidérer les techniques de construction de l'époque afin d'économiser l'énergie. Les premières réglementations thermiques feront peu après leur apparition et la consommation moyenne des bâtiments construits a tendance à diminuer (cf. Figure 3). C'est la naissance du bâti moderne.

Le bâti moderne est composé de matériaux industriels. Ses parois sont homogènes et composées de matériaux juxtaposés – par exemple, le mur creux isolé. (Ministère du Logement, 2009; MPF, 2011; AUP, et al., 2010)

1.2 COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE

1.2.1 COMPORTEMENT THERMIQUE

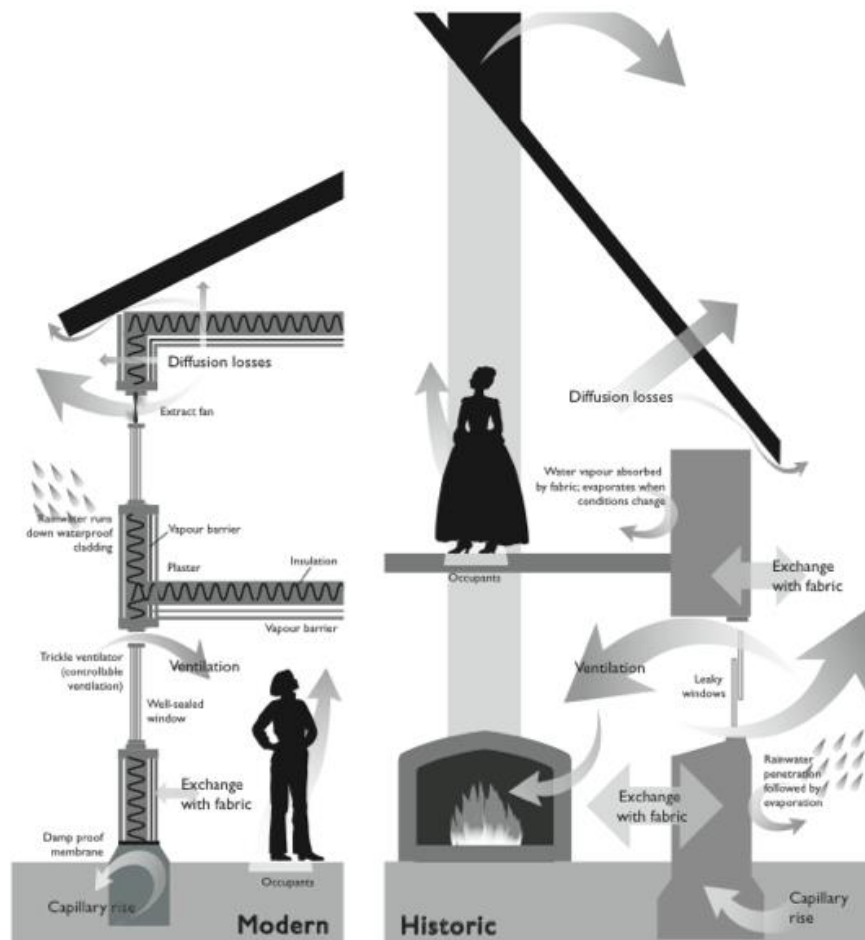


Figure 4 - Comportement hygrothermique du bâti ancien et moderne (Pender, 2011)

BATI ANCIEN

Il présente une **inertie** importante grâce à la masse des matériaux utilisés et à leur grande capacité à stocker la chaleur et à la restituer peu à peu.

En été, les matériaux stockent la chaleur accumulée durant la journée et l'évacuent la nuit par les ouvertures, lorsque les températures extérieures sont plus basses. Le confort d'été est ainsi amélioré grâce à la limitation des surchauffes.

En hiver, la chaleur accumulée durant la journée permet de réchauffer le bâtiment lorsque les températures diminuent. (Architecture et Climat, 2013)

Matériaux constituant les murs (épaisseur)	Déphasage: valeur moyenne
granit (50 cm)	7 h
pan de bois et torchis (20 cm)	7 h
grès (50 cm)	8 h
brique (35 cm)	11 h
calcaire (40 cm)	13 h

Figure 5 - Déphasage de différents matériaux (MPF, 2011)

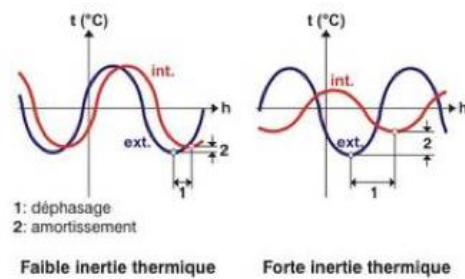


Figure 6 - Principes de l'inertie thermique (Architecture et Climat, 2013)

Il possède des **propriétés bioclimatiques** : la disposition des espaces intérieurs, la présence d'espaces tampons et son implantation permettent généralement de profiter des avantages du site environnant pour, d'une part, se protéger des vents froids et profiter des gains solaires en hiver et, d'autre part, se protéger des apports solaires et ventiler la nuit en été. (MPF, 2011)

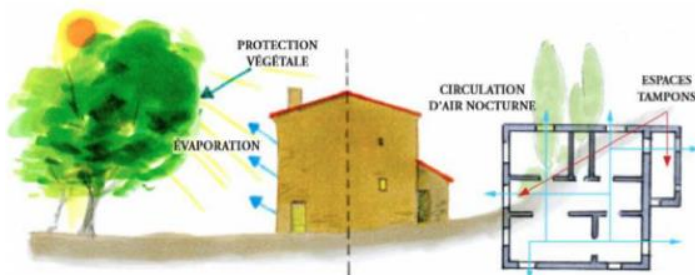


Figure 7 - Propriétés bioclimatiques du bâti ancien (MPF, 2011)

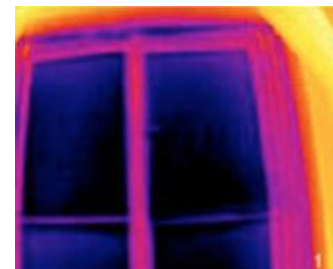


Figure 8 - Défauts d'étanchéité à l'air d'un châssis (DGHUC, et al., 2007)

Les **déperditions thermiques** du bâti ancien sont relativement importantes et se divisent en deux catégories :

- les déperditions thermiques par *transmission* sont difficiles à quantifier de façon précise en raison de l'hétérogénéité des matériaux (diversité des matériaux utilisés, présence de vides d'air dans les parois, etc.) et de la difficulté de déterminer le coefficient de conductivité thermique de certains matériaux.
- Les déperditions thermiques par *infiltration* ont lieu par les défauts d'étanchéité. Ces défauts d'étanchéité se situent notamment entre les étages, aux jonctions entre menuiserie et maçonnerie, au droit des ouvrants et au niveau de la toiture. Néanmoins, ces infiltrations d'air permettent de ventiler naturellement le bâtiment de façon permanente et de garantir une bonne qualité de l'air intérieur aux occupants.

La proportion de déperditions par paroi ou la répartition entre pertes par transmission et par ventilation est difficile à évaluer dans le cas du bâti ancien car elle dépend de la composition des parois, du contexte du bâtiment, de sa mitoyenneté, etc. (DGHUC, et al., 2007)

BATI MODERNE

Le bâti moderne utilise des matériaux isolants aux bonnes performances thermiques qui limitent les pertes par transmission. La pose d'une membrane pare-vapeur, d'enduits, de béton coulé sur place, etc. assure une étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment, ce qui permet de limiter les pertes par infiltration.

Les défauts d'étanchéité ou les ponts thermiques peuvent cependant engendrer des dégradations importantes à ces endroits puisqu'ils concentrent l'humidité en un point de l'enveloppe.

1.2.2 COMPORTEMENT HYGROMETRIQUE

BATI ANCIEN

Les parois du bâti ancien sont sensibles à l'eau et sont en équilibre hygrothermique. En effet, elles sont constituées de matériaux traditionnels poreux et perméables à la vapeur d'eau : enduits à la chaux, pièces de bois et maçonneries en pierres par exemple. Ceux-ci permettent de réguler l'humidité intérieure naturellement.

Néanmoins, l'application d'une couche imperméable à l'air et à la vapeur d'eau sur ses parois empêcherait l'évacuation de l'humidité présente dans la paroi, sous forme de vapeur d'eau ou sous forme liquide, créant des accumulations d'eau au sein de la paroi et des dégradations importantes.

(DGHUC, et al., 2007; AUP, et al., 2010)



Figure 9 - Fonctionnement hygrométrique d'un mur traditionnel (a) non isolé et (b) isolé de façon moderne (MPF, 2011)

BATI MODERNE

A contrario, les parois et les fondations du bâti moderne sont étanches à l'air et à l'eau et éventuellement imperméables à la vapeur d'eau de telle sorte que les matériaux constituant les parois restent secs et protégés de l'humidité. Les parois du bâti moderne sont composées des matériaux industriels qui sont moins sensibles à l'humidité et plus imperméables à la vapeur d'eau et à l'air que les matériaux naturels, tels que certains enduits extérieurs et le béton.

Cette étanchéification de l'enveloppe nécessite la mise en œuvre d'une ventilation qui permet alors un meilleur contrôle des flux d'air dans le bâtiment. (MPF, 2011)

2 AMÉLIORATION DE L'ENVELOPPE

En Région Wallonne et Bruxelles-Capitale, le chauffage est responsable de 70 % de la consommation énergétique du secteur résidentiel. Cette consommation dépend des déperditions thermiques du bâtiment, des pertes par infiltration et par ventilation, des gains solaires et internes et enfin des caractéristiques des systèmes de chauffage. L'isolation de l'enveloppe permet donc de réduire ces déperditions thermiques. (Evrard, et al., 2011)

Dans le bâti ancien, les déperditions thermiques sont assez importantes bien qu'elles soient difficiles à calculer en raison de l'hétérogénéité des matériaux et des parois. De façon générale, en Belgique, les déperditions thermiques sont plus importantes par la toiture dans les maisons mitoyennes et par les murs extérieurs dans les maisons individuelles. (cf. Annexe 2)

L'isolation du bâti ancien permettrait de diminuer ces déperditions thermiques pour améliorer le confort des occupants et diminuer leur facture énergétique. Cependant, cette solution doit être étudiée avec beaucoup de prudence afin de ne pas modifier les propriétés d'inertie et de perméabilité des parois d'origine. (MPF, 2011)

Ce chapitre présente par paroi de l'enveloppe quelles solutions d'isolation existent et quels sont leurs avantages et inconvénients.

2.1 LA TOITURE

A l'origine, les combles servaient d'espace tampon pour protéger les espaces habitables du contact direct avec l'extérieur en assurant l'étanchéité à l'eau du bâtiment et en atténuant de façon considérable les variations de température. (MPF, 2011)

La toiture est une source de déperditions importantes en hiver et est propice aux risques de surchauffe en été. Elle est également soumise à des variations de température importantes entre le jour et la nuit, l'été et l'hiver. (Oliva, et al., 2011)

L'isolation de la toiture est donc une des premières interventions à faire lorsque l'on veut améliorer thermiquement son habitation. Elle permet de limiter les pertes par transmission et par infiltration et joue un double rôle sur le confort : en hiver, elle permet de réduire les consommations de chauffage en limitant les déperditions et en réduisant l'effet de paroi froide. En été, elle limite les apports de chaleur par la toiture vers les espaces habitables. (Ministère du Logement, 2009)

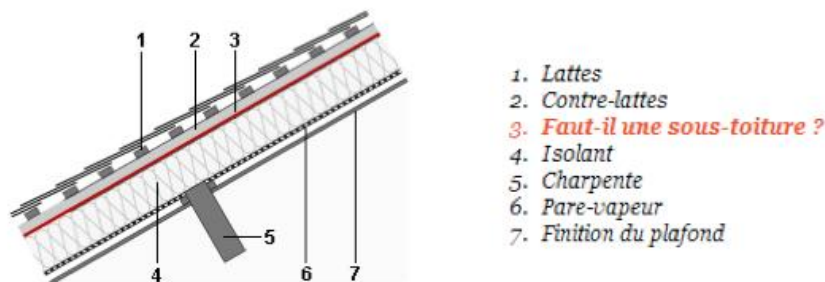


Figure 10 - Pose d'une sous-toiture
(Architecture et Climat, 2013)

Dans le cas d'une isolation de la toiture, la pose d'une sous-toiture s'avère alors nécessaire. En effet, la sous-toiture permet d'évacuer vers l'extérieur l'eau qui aurait pu s'infiltrer entre les éléments de la couverture ou qui se serait condensée sur leur face inférieure. La sous-toiture a donc pour rôle de protéger l'isolant.

Généralement, les bâtiments anciens ne possèdent pas de sous-toiture. La meilleure solution consiste alors à déposer la couverture afin de placer une nouvelle sous-toiture par l'extérieur. La couverture d'origine, ou une nouvelle couverture si l'ancienne est trop endommagée, est ensuite remplacée. Cette solution permet une bonne continuité de la sous-toiture afin d'éviter les infiltrations d'eau et d'évacuer les surplus d'eau vers l'extérieur. (Architecture et Climat, 2013)

Cependant, lorsque la pose d'une vraie sous-toiture n'est pas possible - pour des raisons budgétaires par exemple - la pose d'un système de sous-toiture de substitution par l'intérieur est possible afin d'éviter ce démontage et remontage de la couverture. Cette solution permet de retarder le remplacement de la couverture tout en permettant une isolation thermique et la pose des finitions intérieures. Elle est bien sûr moins performante que la pose d'une sous-toiture sur chevrons et constitue une mesure temporaire qui protège de façon modérée la toiture des infiltrations d'eau. Cette solution est toutefois préférable à une toiture sans aucune sous-toiture.

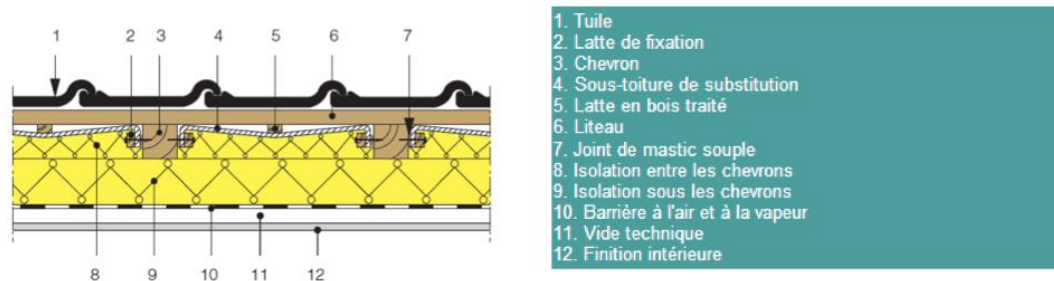


Figure 11 - Coupe transversale d'une toiture existante sans contre-lattes, munie a posteriori d'une isolation et d'une sous-toiture de substitution (Dobbels, 2009)

Cette sous-toiture de substitution se compose d'une feuille souple posée à l'emplacement normal de la sous-toiture. Cette feuille est fixée aux chevrons par des lattes et un joint de mastic souple. Des fines lattes de bois clouées contre les liteaux, au centre de la feuille, permettent de récolter de façon centrale l'eau qui s'est infiltrée et de l'évacuer vers l'extérieur. (CSTC, 2010)

2.1.1 TOITURE INCLINEE

ISOLATION DU PLANCHER DES COMBLES

C'est l'intervention la plus simple et la moins coûteuse si les combles ne sont pas aménagés. Elle consiste à appliquer une couche d'isolant au niveau du plancher haut, sur une membrane freine-vapeur. De cette façon, les combles conservent leur fonction d'origine d'espace tampon et restent ventilés naturellement. Il faut également faire attention à l'isolation des trappes d'accès et à la continuité entre l'isolation des murs et le plancher.

Si les combles doivent tout de même être circulables pour des raisons de stockage ou d'entretien de la toiture, la mise en place d'un plancher éventuel sur une structure en lambourdes de bois de même épaisseur que l'isolant est conseillée. (MPF, 2011)

AVANTAGES

- La surface de déperdition est plus petite que si l'isolant avait été placé entre rampants.
- Les travaux peuvent être menés par l'intérieur, à l'abri des intempéries.
- La toiture peut rester facilement accessible par l'intérieur pour être contrôlée.

INCONVENIENTS

- Le grenier n'est pas habitable et est soumis aux conditions climatiques.
- Les jonctions entre le plancher et les murs qui traversent le grenier sont difficiles à gérer, de même que les jonctions entre les murs extérieurs et le plancher si les murs extérieurs sont isolés par l'extérieur.

(Bruxelles Environnement)

- Plancher léger

Deux solutions existent :

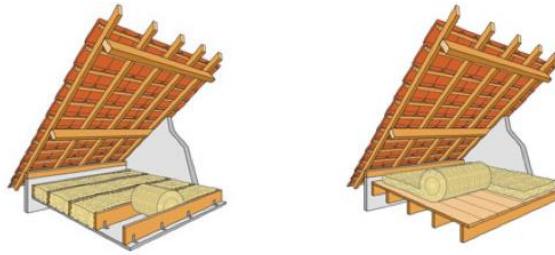


Figure 12 – Isolation (a) entre gîtes en rouleaux - (b) sur gîtage en rouleaux (GDF Suez)

Isolation entre gîtes

L'isolant peut être déposé sous forme de panneaux ou de rouleaux entre les gîtes ou il peut être déposé en vrac ou projeté entre les gîtes. Cette technique a l'avantage de peu encombrer le plancher et de laisser la possibilité de le rendre circulaire par la suite. Il est conseillé de croiser deux couches d'isolant. La capacité portante du plafond d'origine doit cependant être vérifiée. (Architecture et Climat, 2013)

Isolation au-dessus du gîtage

L'isolant est simplement posé, déroulé ou projeté sur le plancher existant, après la pose d'un frein-vapeur. Dans les deux cas, il est conseillé de croiser deux couches d'isolants afin d'assurer la continuité de l'isolant et d'éviter les joints entre les couches qui pourraient engendrer des ponts thermiques et des dégradations de l'isolant.

Cette technique permet de laisser un espace technique entre le plancher et le plafond de l'étage inférieur. Cependant, l'épaisseur du plancher est augmentée et une ossature sera nécessaire si le plancher doit être circulaire. La capacité portante du plancher d'origine doit être vérifiée. (Deruyver, 2014)

- Plancher lourd

Dans le cas d'un plancher lourd, l'isolation est placée sur le plancher lourd. De cette façon, le plancher lourd n'est pas soumis à des variations importantes de températures pouvant amener des contraintes internes importantes et il n'y a pas de risque de condensation dans l'isolant. Le besoin d'une aire de foulée déterminera le type d'isolant utilisé. (Architecture et Climat, 2013)

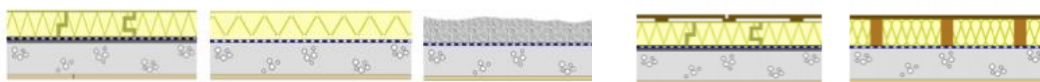


Figure 13 - Plancher (a) non circulable - (b) circulable (Architecture et Climat, 2013)

ISOLATION ENTRE RAMPANTS

Dans le cas où les combles sont habités, une isolation du plancher haut n'est plus possible. L'isolant est placé entre les chevrons et, l'épaisseur de ces derniers étant généralement trop faible au vu des épaisseurs d'isolant recommandées (cf. Tableau 1), un contre-chevonnage, parallèle aux pannes permet d'y placer une seconde couche croisée d'isolant. (cf. Figure 14) (Architecture et Climat, 2013)

Matériau isolant	λ (W/mK) ①	Epaisseur (cm)	
		$U = 0,25$ W/m ² K	$U = 0,2$ W/m ² K
Lin	0,038	16	19
Chanvre	0,040 à 0,042	16 à 17	20 à 21
Cellulose	0,039	16	20
Fibre de bois	0,037 à 0,040	15 à 16	19 à 20
Liège	0,038 à 0,040	16	19 à 20
Laine de verre	0,032 à 0,040	13 à 16	16 à 20
Laine de roche	0,035 à 0,040	14 à 16	18 à 20

Tableau 1 - Valeur isolante de matériaux d'isolation écologique et épaisseurs requises (Bruxelles Environnement, 2009)

L'isolant peut soit être placé entre les éléments sous la forme de panneaux ou rouleaux en couches croisées ou il peut être insufflé par l'intérieur dans des caissons formés par la charpente, la sous-toiture rigide et le freine-vapeur. La cellulose insufflée est assez répandue car c'est une technique écologique et rapide. (Oliva, et al., 2011)

Le mur pignon doit également être étudié et éventuellement protégé. (CSTC, 2010)

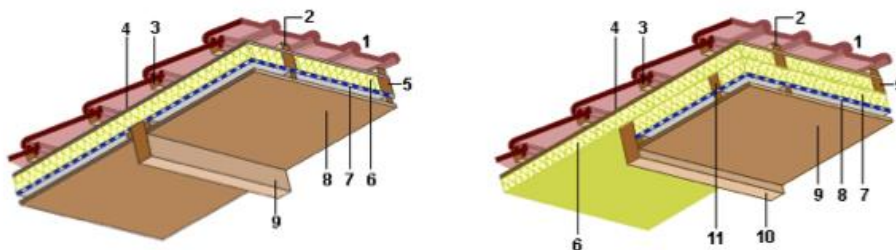


Figure 14 - Isolation (a) entre chevrons - (b) combinée (Architecture et Climat, 2013)

AVANTAGES

- Les travaux peuvent être menés par l'intérieur, à l'abri des intempéries.
- La surface habitable est augmentée.

INCONVENIENTS

- Le volume intérieur est légèrement diminué si l'épaisseur des chevrons n'est pas suffisante.
- Les raccords entre la toiture et les murs porteurs, rives et percements sont difficiles à mettre en œuvre. (Bruxelles Environnement)

REMARQUES

D'autres techniques d'isolation de la toiture existent mais sont à éviter :

- Isolation sous les chevrons

L'isolant est placé sous les chevrons, entre les pannes. Cette solution est généralement à éviter car la lame d'air entre la sous-toiture et l'isolant crée des courants convectifs qui augmentent les déperditions de chaleur et les risques de condensation du côté intérieur de la sous-toiture. (Architecture et Climat, 2013)

- Isolation par l'extérieur

Une isolation de la toiture par l'extérieur, au-dessus des chevrons – technique du sarking – n'est pas envisageable dans le cas de bâtiments à caractère patrimonial à cause de la surélévation de la couverture et des murs engendrée par la couche d'isolant. (MPF, 2011)

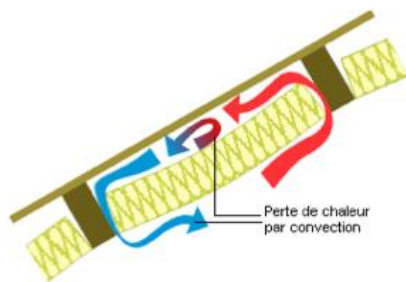


Figure 15 - Courants convectifs
(Architecture et Climat, 2013)

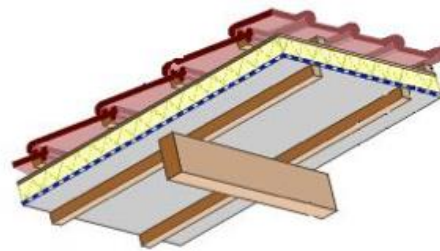


Figure 16 - Isolation par l'extérieur
(Architecture et Climat, 2013)

2.1.3 TOITURE PLATE

Nous considérerons ici le cas de toitures plates non isolées.

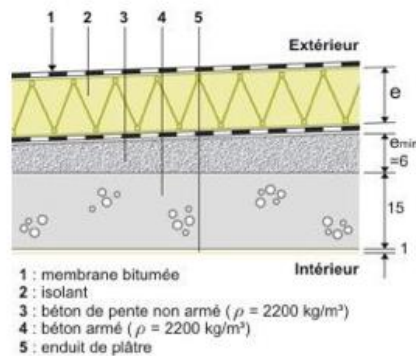


Figure 17 - Toiture chaude
(Architecture et Climat, 2013)

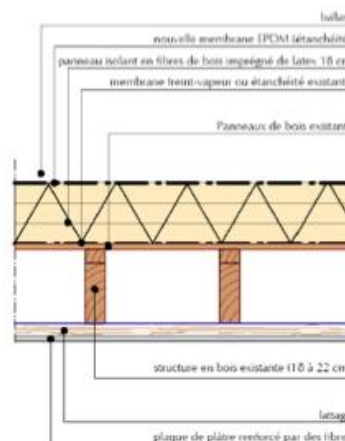


Figure 18 - Isolation d'une toiture plate en structure bois
(Bruxelles Environnement, 2009)

TOITURE PLATE EN BETON

Les toitures plates doivent toujours être isolées par le dessus sinon la dalle est exposée à des chocs thermiques importants qui ruineront l'étanchéité. La mise en place d'une toiture chaude, qui consiste à placer une étanchéité à l'eau au-dessus de la couche isolante, est généralement préférable car l'isolant est alors protégé par l'étanchéité et un lissage n'est pas nécessaire, contrairement à une toiture inversée. (cf. Figure 17)

Si l'ancienne étanchéité est en bon état, il est possible de la réutiliser comme pare-vapeur, permettant l'économie de la nouvelle membrane et du démontage de l'ancienne membrane. L'isolant est ensuite posé sur cette étanchéité puis recouvert d'une nouvelle étanchéité. (Architecture et Climat, 2013)

Puisque cette membrane d'étanchéité est totalement imperméable à l'air et à la vapeur d'eau, il faut protéger l'isolant du côté chaud par une membrane totalement étanche à la vapeur d'eau, c'est-à-dire un pare-vapeur. (SPW, 2013)

Les panneaux incompressibles en liège, en fibres de bois ou éventuellement en mousse résol ou polystyrène expansé conviennent pour ce type de technique. Les laines peuvent également convenir si elles ont une résistance à la compression suffisante. (Oliva, et al., 2011; Bruxelles-Environnement, 2010)

AVANTAGES

- L'étanchéité existante, si elle est en bon état, devient le nouveau pare-vapeur, permettant l'économie d'une nouvelle membrane.
- La structure portante est protégée des intempéries.
- La toiture est facile à entretenir.
- L'isolant est protégé de l'eau.

INCONVENIENTS

- Les raccords de rive doivent être refaits.
 - Il faut vérifier si l'ancienne étanchéité doit être remplacée.
 - L'épaisseur de la toiture est augmentée.
- (Bruxelles Environnement)

TOITURE PLATE EN OSSATURE BOIS

Dans ce cas, la solution la plus simple consiste à mettre en place une toiture chaude, de la même façon que l'isolation d'une toiture plate en béton. (cf. Figure 18)

2.2 LES PLANCHERS

On distingue 3 types de planchers :

1. Le plancher haut

Dans le cas de combles non-habitables, le plancher haut constitue la limite supérieure du volume chauffé et doit donc être isolé. Dans le cas contraire, il a le même rôle que les planchers intermédiaires et une isolation entre rampant est placée.

2. Les planchers intermédiaires

S'ils séparent des ambiances thermiques différentes, les planchers intermédiaires doivent être isolés de la même manière qu'un plancher bas.

3. Le plancher bas

Il détermine les limites inférieures du volume chauffé. Nous nous concentrerons dans ce chapitre sur ce type de plancher.

(MPF, 2011)

Le plancher inférieur doit être isolé uniquement si les déperditions thermiques à travers celui-ci sont importantes. Par exemple, un plancher de grande surface reposant sur le sol ne nécessite pas une isolation totale, d'un point de vue économique, écologique et thermique. Une isolation périphérique peut être suffisante et permet de réduire fortement les coûts de réalisation. Par-contre, si le plancher inférieur est au-dessus d'un espace adjacent fortement ventilé ou même de l'extérieur, une isolation totale peut être envisagée. (Architecture et Climat, 2013)

Différentes solutions existent en fonction de la typologie du plancher et du type d'espace sous-jacent.

2.2.1 PLANCHER SUR ESPACE SOUS-JACENT



Figure 19 - Isolation d'un plancher inférieur (a) par le bas - (b) par le haut (Glavie)

ISOLATION PAR LE BAS

L'isolant est placé sur la face inférieure du plancher délimitant le volume protégé. Cette technique est uniquement possible lorsque le plancher est situé sur un espace adjacent non chauffé accessible ou l'extérieur.

AVANTAGES

- La paroi est maintenue à une température constante et est protégé du gel et de la fissuration.
- Les finitions intérieures sont préservées.
- L'inertie thermique de la dalle est conservée.
- La paroi présente moins de risque de condensation interne.

INCONVENIENTS

- En cas d'isolation par l'intérieur, les nœuds constructifs sont compliqués à gérer.
- La présence de conduites pour l'électricité, le gaz, etc. peut rendre le placement difficile.
- Les finitions intérieures de l'espace sous-jacent ne sont pas conservées.

(Bruxelles Environnement)

L'isolant peut se présenter sous différentes formes :

- Isolation par panneaux

Les panneaux rigides sont collés ou fixés mécaniquement à l'aide de chevilles. Cette solution est plus onéreuse mais la mise en œuvre est plus rapide.

- Isolation entre ossature

L'isolant en rouleaux est posé en couches croisées ou insufflé dans une ossature de bois ou de métal. Cette technique permet de placer des épaisseurs d'isolant importantes pour un coût relativement modéré.

- Isolant par projection

L'isolant peut être projeté par voie humide. Cette technique convient bien pour les plafonds irréguliers tels que les voussettes ou dans le cas de canalisations au plafond. Cependant, cette technique est irréversible.

(Oliva, et al., 2011)

ISOLATION PAR LE HAUT

L'isolant est placé sur la partie supérieure du plancher et est recouvert par un revêtement solide afin de rendre le plancher circulaire. Le revêtement peut se constituer d'un panneau léger ou d'une chape. Dans ce dernier cas, l'installation d'un chauffage par le sol est possible. La solution la moins chère et la plus simple consiste à placer l'isolant sur le revêtement existant. L'isolant est cependant limité dans son épaisseur par la hauteur des portes, et devra alors présenter de très bonnes performances thermiques.

L'étanchéité à l'air du plancher doit également être soignée, soit grâce à la composition du plancher d'origine (plancher en béton par exemple) soit grâce à la mise en place d'un pare-vapeur. (Architecture et Climat, 2013)

AVANTAGES

- L'isolant n'est pas soumis à l'humidité.
- Les plafonds de l'espace sous-jacent sont conservés.
- La hauteur sous-plafond de l'espace sous-jacent est conservée.

INCONVENIENTS

- L'isolant doit résister à la compression.
 - La hauteur sous plafond est diminuée.
 - L'inertie thermique de la dalle est diminuée.
 - Les finitions intérieures du sol ne sont pas conservées.
 - Le support de l'isolant présente un risque de condensation interne.
- (Bruxelles Environnement)

L'isolant peut se présenter sous différentes formes :

- Isolation par panneaux

L'isolant est posé sur le plancher sous la forme de panneaux rigides incompressibles : liège expansé, fibres de bois, verre cellulaire, etc. Le support doit être plan.

- Isolation entre ossature

L'isolant est insufflé ou déposé en vrac dans une ossature: perlite, vermiculite, liège, chènevotte.

- Isolation par projection

L'isolant est directement projeté sur le plancher d'origine.

(Oliva, et al., 2011)

ISOLATION ENTRE LES ELEMENTS DE STRUCTURE

L'isolant est placé entre les éléments de structure du plancher, entre l'aire de circulation supérieure et la finition inférieure du plancher. Cette solution n'est possible que pour les planchers creux en structure en bois. La pose d'un freine-vapeur entre l'isolant et la surface circulaire permet de réguler la migration de vapeur d'eau au travers de la paroi et permet d'assurer l'étanchéité à l'air de la paroi. (Architecture et Climat, 2013)

L'isolant peut se présenter sous différentes formes :

- Isolation par panneaux entre solives

Il est possible d'isoler par le haut ou par le bas en fonction de la finition intérieure à conserver. Les deux solutions nécessitent la suppression d'une des faces du plancher.

L'isolant doit être assez souple pour s'adapter à la forme du plancher et ne pas créer de cavité qui engendrerait des zones froides et des courants de convection.

- Isolation par insufflation

L'isolant est insufflé entre les éléments de structure. Cette technique peut se faire par le haut ou par le bas.

- Isolation par déversement entre solives

L'isolant est déversé en vrac entre les éléments de structure. Cette technique ne peut se faire que par le haut, le plancher d'origine ne peut donc être conservé.

(Oliva, et al., 2011)

2.2.2 PLANCHER SUR TERRE-PLEIN

Dans ce cas, une isolation par le bas n'est pas possible. Une isolation par le haut ou entre les éléments de structure est envisageable et présente les mêmes caractéristiques qu'énoncées ci-dessus.

2.3 LES MURS

Le parc immobilier en Belgique est assez vieux et peu performant énergétiquement. En effet, 40 % du parc immobilier belge date d'avant la Seconde Guerre Mondiale et 62 % date d'avant 1970, période de la première crise énergétique. (Entranze, 2008)

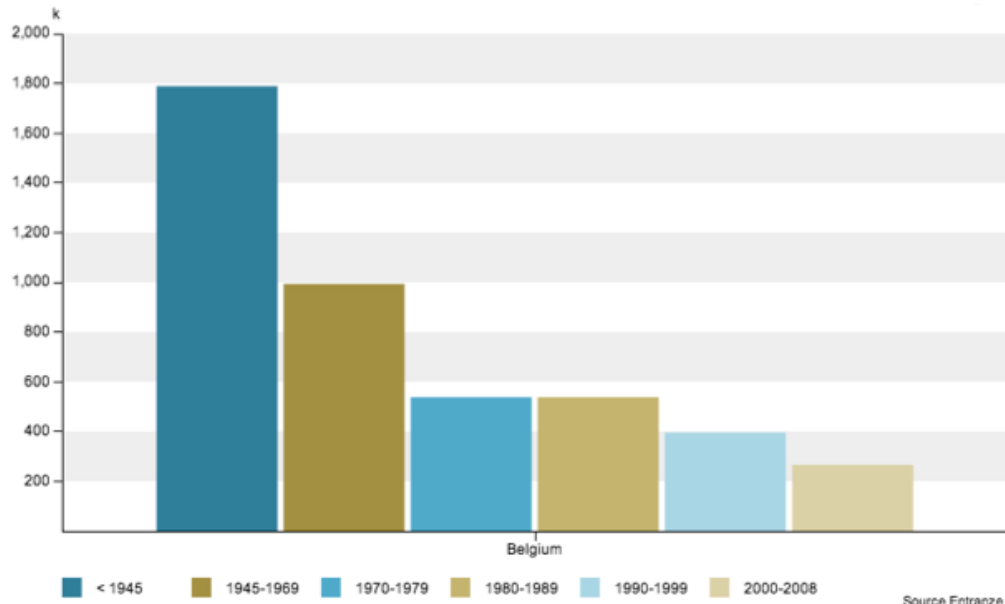


Figure 20 - Age du logement en Belgique
(Entranze, 2008)

A chaque époque correspond un mode constructif différent :

1. Murs massifs

Les murs massifs, antérieurs au XX^e siècle sont épais et composés de matériaux locaux tels que la pierre, le bois, la terre cuite, etc.

2. Murs pleins en briques

L'utilisation de matériaux industriels, déjà présents au XVIII^e siècle, se répand à la fin du XIX^e et du début XX^e siècle et les murs pleins en briques sont utilisés jusque dans les années 50. Les façades des maisons de ville sont particulièrement soignées avec des balcons et des baies en pierre bleue.

3. Murs creux « 1^e et 2^e génération »

Les murs creux « 1^e génération » apparaissent entre les deux guerres. Ils séparent la fonction porteuse et la fonction de protection du mur grâce à une lame d'air. Ils sont cependant reliés de façon ponctuelle par des éléments en béton ou en maçonnerie qui créent des ponts thermiques. Dans les années 70, le mur creux « 2^e génération » se généralise et, afin de réduire ces ponts thermiques, les parois sont reliées par des éléments ponctuels en acier.

4. Murs creux isolés

Le mur creux isolé se généralise dans les années 80, après les premières crises de l'énergie. Une isolation partielle ou totale est placée dans la coulisse.

(Evrard, et al., 2011)

Nous ne nous intéresserons pas ici aux murs creux car actuellement, très peu de bâtiments à intérêt patrimonial présentent ce type de mode constructif. Ce travail se concentre donc uniquement sur les murs massifs.

2.3.1 ISOLATION PAR L'EXTERIEUR

Une isolation par l'extérieur peut être menée de différentes manières:



Figure 21 - Isolation par l'extérieur (Glavie)

- **Isolation par panneaux**

Cette solution consiste à coller ou à fixer mécaniquement à l'aide de chevilles plastiques des panneaux rigides (feutres de bois, mousse minérale par exemple) sur la face extérieure du mur avant de l'enduire.

- **Isolation entre ossature**

Cette solution consiste à insuffler ou à projeter un isolant en vrac dans une ossature. Cette technique permet de s'adapter à l'irrégularité éventuelle du mur existant. (Oliva, et al., 2011)

Les laines souples (laine de mouton, de verre ou de lin, de roche) ainsi que les isolants en vrac (flocons de cellulose insufflés dans des caissons) sont adaptés à ce type d'isolation. (Bruxelles-Environnement, 2010)

AVANTAGES

- La continuité de l'isolant permet la suppression des risques de ponts thermiques.
- L'étanchéité de la façade est améliorée et protège donc le mur de la pénétration de la pluie battante.
- Le mur est protégé du gel et présente moins de risques de fissuration.
- En présence de façade détériorée ou hétérogène, l'apparence extérieure est améliorée.
- L'inertie thermique est préservée.
- Il n'y a pas d'encombrement sur la surface intérieure et les finitions intérieures sont conservées.

INCONVENIENTS

- L'aspect extérieur est modifié. Dans le cas de maisons mitoyennes, il est généralement nécessaire d'introduire un permis d'urbanisme en raison de la modification de l'alignement des façades.
- Les retours de baie doivent bénéficier d'une isolation tandis que les seuils doivent être remplacés.
- Les descentes d'eau, les gouttières et chéneaux doivent être remplacés, déplacés ou adaptés.
- L'appel à une entreprise spécialisée et la mise en place d'un nouveau parement coûtent relativement cher.
- Un risque de ponts thermiques à la jonction mur-sol existe. (Bruxelles Environnement)

2.3.2 ISOLATION PAR L'INTERIEUR

L'isolation par l'intérieur peut être envisagée de plusieurs façons :



Figure 22 - Isolation par l'intérieur (Glavie)

- **Isolation par panneaux**

Cette solution consiste à doubler les murs extérieurs avec un complexe isolant collé ou fixé mécaniquement puis recouvert d'un enduit de finition : panneaux de fibres de bois, blocs de chanvre. Elle convient lorsqu'une isolation par l'extérieur n'est pas possible, que la surface intérieure de la paroi est relativement plane et que l'inertie n'est pas recherchée.

- **Isolation avec ossature**

Cette solution consiste à doubler par l'intérieur les murs extérieurs avec un isolant placé à l'aide d'une ossature bois ou métal. Un isolant semi-rigide est placé dans la structure ou un isolant en vrac est insufflé (ouate de cellulose par exemple). Cette technique convient pour des murs irréguliers.

- **Isolation par projection**

Cette solution consiste à projeter l'isolant sur le mur existant, peu importe la régularité du mur.

(Oliva, et al., 2011)

Remarque : Dans le cas de grands volumes vides, une deuxième paroi intérieure peut être construite à l'intérieur du bâtiment et séparée de celui-ci par une lame d'air ventilée par l'extérieur. Le choix de l'isolant importe moins ici puisqu'il n'y a pas de contact entre l'isolant et le mur ancien. (MPF, 2011)

Cependant, cette technique n'est pas recommandée par le CSTC car la lame d'air est propice aux courants convectifs, aux déperditions thermiques et aux risques de condensation sur la face interne du mur extérieur. (Architecture et Climat, 2013)

AVANTAGES

- L'apparence extérieure est conservée.
- Les travaux ne nécessitent pas d'échafaudage et pas de demande de permis.
- L'isolation par l'intérieur offre une large gamme d'isolants.
- Le chantier reste à l'abri des intempéries tout au long de travaux.
- Un phasage des dépenses et du chantier est possible grâce à l'application de l'isolant pièce par pièce.
- Le coût est généralement moins important qu'une isolation par l'extérieur.

INCONVENIENTS

- La surface habitable est réduite.
 - Les finitions intérieures ainsi que les installations électriques ou de chauffage doivent être déplacées ou remplacées.
 - Suite à l'augmentation des sollicitations hygrothermiques dans le mur, celui-ci présente des risques de condensation interne, de gel, de dilatation de la maçonnerie ainsi que d'efflorescence de sels. Ces inconvénients, qui peuvent mener à la dégradation du mur, ne sont pas à négliger et seront étudiés en profondeur à la page suivante.
 - Les ponts thermiques, notamment aux liaisons plancher-mur, mur de refend-mur de façade sont délicats à solutionner et présentent donc des risques de condensation superficielle et d'apparition de moisissures.
 - L'inertie thermique du mur est diminuée et ce procédé présente donc un risque de surchauffe plus important.
 - La continuité du pare-vapeur est difficile à mettre en œuvre.
 - Les structures en bois portant dans le mur isolé présentent des risques de pourriture.
- (De Meester, 2009; Evrard, et al., 2011)

LES RISQUES DE L'ISOLATION PAR L'INTERIEUR

L'isolation par l'intérieur présente des risques importants d'un point de vue hygrothermique qu'il ne faut pas négliger et qu'il faut étudier. (Evrard, et al., 2011)

▪ Condensation superficielle et risque de moisissure

Nous l'avons vu, une isolation par l'intérieur peut engendrer des ponts thermiques qui sont difficiles à résoudre. Au droit de ceux-ci, les déperditions de chaleur sont importantes et refroidissent leur température de surface intérieure. Si celle-ci est inférieure à la température de rosée, de la condensation superficielle va apparaître qui elle-même peut entraîner l'apparition de moisissures.

▪ Condensation interne par diffusion

La différence de pressions de vapeur entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment entraîne un transfert de vapeur d'eau par diffusion dans les parois. En hiver, ce transfert s'opère depuis l'intérieur du bâtiment, dont l'air est plus chaud et peut contenir plus de vapeur d'eau, vers l'extérieur. Si la température en un point de la paroi est inférieure à la température de rosée, la vapeur d'eau se condense et le mur se chargera alors en humidité. Une isolation par l'intérieur entraîne donc un risque de condensation dans l'isolant ou à l'interface mur-isolant. Ce risque augmente avec l'épaisseur de l'isolant. La pose d'un pare-vapeur ou d'un freine-vapeur du côté chaud de la paroi permet d'empêcher ou de réguler ce flux de vapeur d'eau vers l'extérieur et l'empêche de condenser. Cependant, en été, le flux de vapeur d'eau est inversé et la pose d'un pare-vapeur bloque la vapeur d'eau entre le mur et celui-ci, pouvant mener à une accumulation d'humidité dans les matériaux. L'emploi d'une membrane intelligente permet de résoudre ces problèmes.

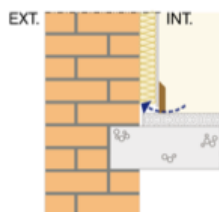


Figure 23 - Effet de convection
(Evrard, et al., 2011)



Figure 24 - Situation sans pare-vapeur en hiver et en été
(Evrard, et al., 2011)

▪ Condensation interne par convection

Une mauvaise étanchéité à l'air d'une paroi peut entraîner l'air chaud et humide intérieur vers l'extérieur. Si la température en un point de la paroi est inférieure à la température de rosée, cet air chargé d'humidité se condense et peut engendrer des dégâts importants. L'étanchéité à l'air doit donc être soignée notamment aux liaisons mur-plafond et aux pourtours de baies.

▪ Dégradations dues au gel ou aux dilatations de maçonnerie

Une isolation par l'intérieur réduit généralement le potentiel de séchage de la paroi. En effet, le refroidissement de la paroi réduit l'évaporation en surface et la pose d'un pare vapeur empêche le séchage vers l'intérieur. Le mur, plus froid et plus humide, peut alors subir des dégradations dues au gel. De plus, après une isolation par l'intérieur, le mur est plus exposé aux différences de température et d'humidité et peut subir des déformations mécaniques. Celles-ci peuvent mener à l'apparition de fissures qui peuvent entraîner des problèmes de stabilité.

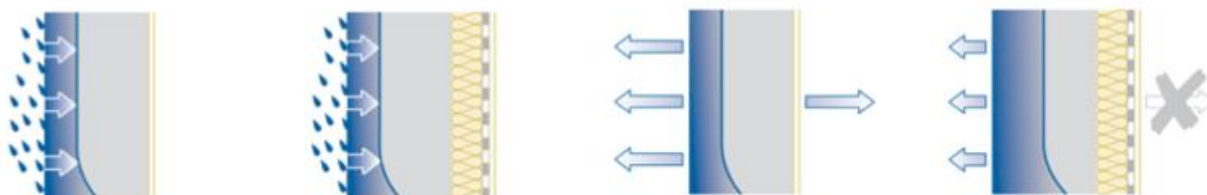


Figure 25 - Humidification par la pluie et évaporation en surface
(Evrard, et al., 2011)

Une isolation par l'intérieur est donc à éviter lorsqu'un mur présente dès le début des risques de dégradations dus au gel ou aux dilatations de maçonnerie. En effet, si aucune mesure de protection contre la pénétration de l'eau de pluie n'est entreprise pour conserver le potentiel de séchage du mur, une isolation intérieure peut aggraver la situation existante. Un hydrofuge de surface¹, un enduit ou un bardage sont des mesures de protection efficaces.

- Efflorescence de sels

Les efflorescences proviennent de la cristallisation des sels présents dans la maçonnerie ou provenant d'une source extérieure. La quantité de ces sels dissous est fonction de la température et de l'humidité de la paroi. Une isolation par l'intérieur modifie ces conditions et donc la quantité de sels cristallisés qui peuvent entraîner des effets esthétiques ou structurels indésirables.

- Diminution de l'inertie thermique et risque de surchauffe

L'inertie thermique d'une paroi lui permet de stocker la chaleur et de la restituer avec un certain déphasage. Elle diminue donc les risques de surchauffe en été et atténue les variations des températures intérieures en hiver. Une isolation par l'intérieur réduit les échanges thermiques entre la paroi et l'intérieur. La masse thermique du mur n'est plus accessible par l'intérieur et entraîne une réduction de son inertie.

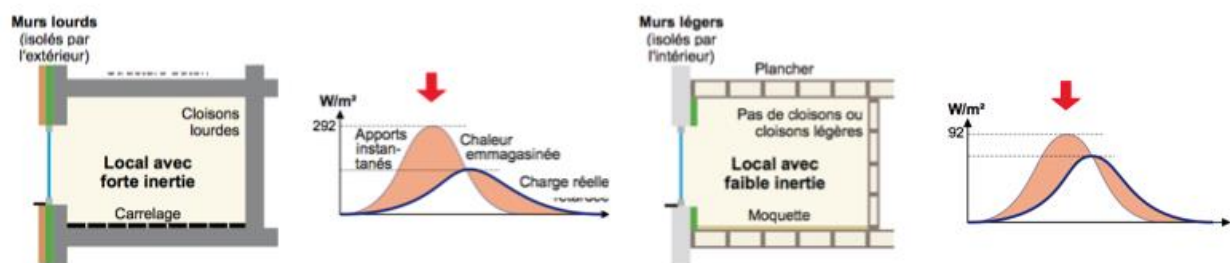


Figure 26 - Effet de l'inertie
(Evrard, et al., 2011)

¹ « Les hydrofuges de surface sont des produits incolores permettant de réduire l'absorption d'eau des parements sans modifier sensiblement leur aspect ou la diffusion de vapeur d'eau. Dans le cas de l'isolation des murs par l'intérieur, l'hydrofugation de la façade réduit les pénétrations d'eau dues aux pluies battantes, tout en affectant le moins possible l'assèchement des matériaux. » Pour les parements de façades, le CSTC considère qu'ils présentent de nombreux avantages et peu d'effets secondaires défavorables. Cependant, ils ne constituent pas une solution universelle à tous types de problèmes. Ils doivent donc être choisis et mis en œuvre avec prudence, après un examen préalable des matériaux de façade ainsi qu'un éventuel essai sur une surface limitée. (Loncour, et al., 2013)



(Technichem)

LOGICIELS

Après avoir énuméré les désordres que peut engendrer une isolation par l'intérieur, il apparaît donc nécessaire de procéder à une étude hygrothermique préalable. (Evrard, et al., 2011)

A cet effet, plusieurs méthodes existent :

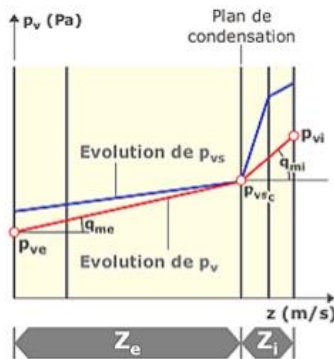


Figure 27 - Méthode de Glaser
(Evrard, et al., 2011)

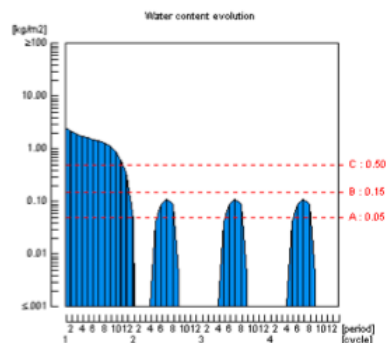


Figure 28 - Glasta
(Physibel)

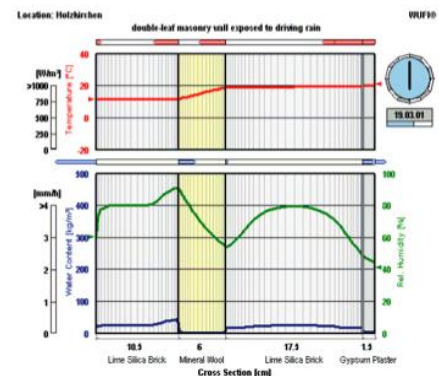


Figure 29 - WUFI
(Fraunhofer IBP)

■ Méthodes statiques

Ces méthodes se basent sur un régime hygrothermique statique, c'est-à-dire que la température et l'humidité sont constantes dans le temps. Il n'est pas conseillé de les utiliser dans le cadre d'une rénovation énergétique d'un bâtiment ancien car ceux-ci interagissent avec l'environnement, ce qui n'est pas pris en compte dans les calculs.

Méthode de Glaser

La méthode de Glaser, très utilisée, permet d'analyser le risque de condensation interne au sein d'une paroi. Le principe repose d'une part sur la courbe de pression partielle de vapeur d'eau et d'autre part, sur la courbe de pression de vapeur saturante. Celles-ci sont facilement établies en fonction des conductivités thermiques et des résistances à la diffusion de vapeur d'eau des matériaux constituant la paroi. Si, en un point de la paroi, la pression de vapeur saturante est inférieure à la pression partielle de vapeur d'eau alors il y a un risque de condensation et la solution est à rejeter. Cette méthode est généralement trop sécuritaire car elle a tendance à rejeter des solutions qui ne présentent, dans la réalité, pas ou peu de risque de condensation. De plus, puisqu'elle repose sur un régime statique, elle ne prend pas en compte les variations des conditions climatiques au cours du temps et donc l'évolution des transferts d'eau liquide dans la paroi qui influencent pourtant le comportement hygrothermique de la paroi.

Glasta, par Physibel

Ce logiciel repose sur le même principe que la méthode de Glaser et présente donc les mêmes inconvénients. Grâce au calcul de la quantité de condensats et leur répartition dans le temps, il permet de faire la distinction entre une condensation éphémère et une condensation rémanente et de calculer le temps de séchage.

- Méthodes dynamiques

Ces méthodes permettent de simuler le comportement dynamique d'une paroi multicouche sous l'effet de sollicitations thermiques extérieures et intérieures telles que les apports solaires, la pluie battante, le contre rayonnement de la voûte céleste et parfois l'effet du vent et les apports internes. Ils prennent en compte à la fois les flux de chaleur et les flux d'humidité dynamiques, via le stockage et le transfert de chaleur et d'humidité et l'interaction de ces flux permet d'étudier les conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi.

Plusieurs logiciels hygrothermiques dynamiques existent afin de contrôler le comportement d'une paroi isolée par l'intérieur dont les plus connus et utilisés sont : WUFI, MOIST, MATCH, Delphin. Bien que les résultats se rapprochent plus de la réalité que ceux des méthodes statiques, leur utilisation est cependant complexe et l'encodage relativement long. De plus, les licences sont généralement chères.

2.4 LES CHASSIS

Les châssis anciens entraînent des déperditions thermiques relativement importantes. (cf. Tableau 3) Celles-ci sont dues aux mauvaises performances thermiques du vitrage – les vitrages anciens présentent des coefficients de transmission thermique 7,5 fois supérieurs aux triples vitrages actuels (cf. Annexe 3) - et aux infiltrations d'air entre le dormant et l'ouvrant et entre la menuiserie et le mur. Ces déperditions thermiques, conjuguées à l'effet de paroi froide engendré par le vitrage, entraînent une diminution non négligeable du confort thermique. Il est donc nécessaire de les limiter tout en assurant une ventilation suffisante des locaux. Une étude complète du châssis d'origine est nécessaire avant de décider de son remplacement ou non.

INTERVENTION	GAIN THERMIQUE	GAIN ACOUSTIQUE	ESTHETIQUE AUTHENTICITE	PRIX	Légende
Entretien courant	-	-	😊😊	😊😊	😊 : Impact esthétique, financier faible ou gain important
Réparation à l'identique	😞	😞	😊😊	😞	
Etanchéité à l'air (calfeutrement)	😊	😊	😊😊	😊	
Survitrage	😊😊	😊😊	😊	😊	😞 : Impact esthétique, financier moyen ou gain moyen
Double vitrage rapporté	😊😊😊	😊😊😊	😞	😞	
Double fenêtre	😊😊😊😊	😊😊😊😊	😊😊	😞	😞 : Impact esthétique fort ou gain faible
Menuiserie neuve	😊😊😊😊	😊😊😊😊	😞😞	😞😞	
Menuiserie neuve phonique	😊😊😊😊	😊😊😊😊	😞😞	😞😞😞	

Tableau 2 - Tableau récapitulatif des interventions (Levy, et al., 2011)

Performances	Fenêtre existante bois	Survitrage (1)		Double vitrage ($U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)	Nouvelle fenêtre bois (2)	Double fenêtre (3)
		Float	Verre à couche ($\epsilon = 0,15$)			
Valeur U_w de la fenêtre [$\text{W/m}^2\text{K}$]	4,7	2,9	2,1	1,7	1,6	1,2
Etanchéité à l'air	-- (4)	-- (4)	-- (4)	-- (4)	++	++
Etanchéité à l'eau	-- (5)	-- (5)	-- (5)	-- (5)	++	++
Durabilité	-/+	-	-	-/+	++	-/+ (6)

(1) Epaisseur de 4 mm, espacé de 15 mm du vitrage existant.

(2) Bois dense, section 58 mm, double vitrage ($U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$).

(3) Seconde fenêtre identique à la nouvelle fenêtre bois (2) placée à 50 mm de la fenêtre existante.

(4) Amélioration possible jusqu'à + par l'ajout de joints et en assurant la durabilité de ceux-ci.

(5) Evolution possible jusqu'à - s'il y a amélioration de l'étanchéité à l'air, voire à + si l'ancien châssis est muni d'une chambre de décompression.

(6) Score lié au maintien de la fenêtre existante.

Tableau 3 - Comparaison des performances de différentes solutions de rénovation énergétique d'un châssis en chêne de 15 mm de section avec un simple vitrage de 4 mm (Detremmerie, et al., 2012)

2.4.1 REMPLACEMENT DU CHASSIS D'ORIGINE

Le remplacement d'un châssis entraîne indéniablement la perte des menuiseries et de leur valeur patrimoniale ainsi que l'altération du caractère de la façade. Il doit respecter le matériau d'origine, les profilés d'origine et les systèmes d'assemblage.

Le choix des matériaux du châssis est important aussi d'un point de vue environnemental et santé des occupants. (Bruxelles Environnement)

LES RISQUES DU REMPLACEMENT

Le remplacement d'un châssis d'origine, en plus d'entraîner une perte de valeur patrimoniale du bien, peut engendrer des modifications du comportement hygrothermique du bâtiment qui peuvent causer des dégradations importantes du bâtiment et altérer la santé des occupants.

▪ Situation avant remplacement

La perméabilité des châssis de fenêtres, des portes et des cheminées permettent de ventiler de façon naturelle le bâtiment et d'évacuer la vapeur d'eau produite par les occupants (transpiration, salle de bain et cuisine, etc.). La vapeur d'eau excédentaire condense sur le simple vitrage et est ensuite évacuée par la gouttière des châssis.

▪ Situation après remplacement

Le remplacement d'un châssis ancien par un châssis performant avec un double vitrage le rend à la fois étanche et isolant thermiquement et peut avoir des conséquences importantes sur le bâti ancien s'il n'est pas isolé. En effet, la vapeur d'eau produite par l'activité humaine ne peut plus être évacuée par ventilation naturelle ni condenser sur le vitrage. Elle n'a alors plus d'autres choix que de migrer à travers les murs et, si la température en 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 qui va se refroidir et accélérer le processus de condensation.

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 étanchéfie un bâtiment.

(Bertrand, 2008; Jourquin, 2010)

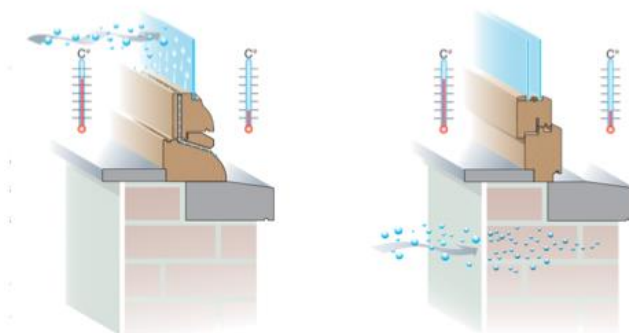


Figure 30 - Condensation sur le simple vitrage et condensation dans les murs suite à la pose d'un double vitrage (Bertrand, 2008)

2.4.2 CONSERVATION DU CHASSIS D'ORIGINE

Si la valeur patrimoniale du châssis est démontrée et qu'il peut être conservé, le châssis est d'abord restauré et réparé. La réparation des menuiseries en bois est généralement plus facile à mettre en œuvre que pour des menuiseries métalliques.

Ces opérations sont diverses :

- Restauration des profilés

Les profilés sont nettoyés, poncés, peints, etc.

- Remplacement des pièces dégradées

Celles-ci sont remplacées par des éléments de même essence de bois, de même profilé. Les rejets d'eau sont généralement les pièces les plus abîmées.

- Vérification et amélioration de l'étanchéité du châssis

L'étanchéité autour du châssis et entre le dormant et l'ouvrant doit être vérifiée. L'intégration d'un joint entre les ouvrants et dormants ainsi que le resserrage du joint extérieur entre le châssis et la maçonnerie améliorent les performances thermiques et acoustiques du châssis. (Bertrand, 2008)

- Remplacement du mastic dégradé

- Réparation de la quincaillerie

Les crémones peuvent être réglées.

(Luyckx, 2014)

Après ces diverses réparations, le châssis peut ensuite être amélioré énergétiquement. A cet effet, différentes techniques existent. Ici aussi, les différentes solutions modifient l'étanchéité à l'air du châssis d'origine. Un système de ventilation doit donc être prévu. (Bruxelles Environnement)



Figure 31 - Pose d'un joint entre ouvrant et dormant (Luyckx, 2014)

AMELIORATION DES PERFORMANCES DU VITRAGE

- Pose d'un survitrage du côté intérieur de l'ouvrant

Une seconde vitre est placée sur une charnière, du côté intérieur du châssis, afin de permettre le nettoyage de l'espace entre le vitrage et le survitrage. (Bertrand, 2008)

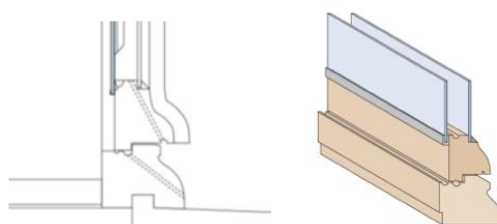


Figure 32 - Pose d'un survitrage (Bruxelles Environnement; Detremmerie, et al., 2012)

AVANTAGES

- L'intervention est réversible et permet de conserver le châssis et le vitrage d'origine mais nécessite la pose de fixations dans le châssis ancien.
- Cette intervention a un coût faible et est facile à mettre en œuvre.

INCONVENIENTS

- L'aspect intérieur du châssis est fortement modifié.
- Elle améliore très faiblement les performances du vitrage.
- Elle présente des risques de condensation entre les vitrages et, si l'eau n'est pas évacuée, peut entraîner la dégradation du profilé. (Jourquin, 2010)

- Le châssis et les charnières d'origine doivent être suffisants pour supporter le poids du nouveau vitrage. Ce surpoids peut engendrer une déformation du profilé d'origine.
- L'entretien est difficile et doit être récurrent. Le placement du survitrage sur des charnières facilite le nettoyage.
- Le coefficient de transmission lumineuse et le facteur solaire sont réduits.
- L'insertion d'un survitrage sur un châssis métallique est très complexe à mettre en œuvre et donc peu envisageable.

(Bruxelles Environnement)

■ Pose d'un double vitrage dans le châssis existant

Cette méthode consiste à remplacer le vitrage d'origine par un double vitrage. Celui-ci est inséré dans l'ouvrant et, si les profilés ne sont pas suffisamment épais, deux méthodes existent :

La première consiste à remplacer le simple vitrage par un double vitrage après avoir **raboté la feuillure** de l'ancien profil. Cette solution est difficilement applicable pour les châssis métalliques : l'épaisseur des profilés des châssis métalliques n'est généralement pas suffisante pour y insérer un double vitrage et pour supporter la surcharge du double vitrage. (Luyckx, 2014)

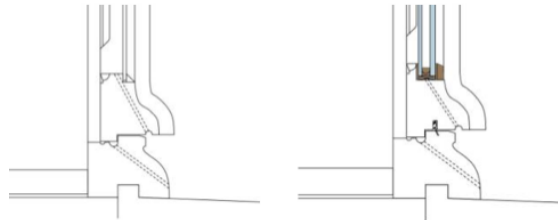


Figure 33 - (a) Châssis existant en bois avec simple vitrage – (b) Intégration d'un double vitrage (Luyckx, 2014)

AVANTAGES

- La surface nette éclairante de la fenêtre est conservée.
- Les profilés à valeur patrimoniale et la quincaillerie sont conservés.
- Les performances du vitrage sont améliorées.

INCONVENIENTS

- Le vitrage d'origine n'est pas conservé.
 - L'opération est relativement onéreuse.
 - Les ouvrants et les charnières doivent pouvoir supporter le poids supplémentaire du double vitrage. Ce surpoids peut engendrer une déformation du châssis.
 - Cette solution n'est pas adaptée dans le cas d'un châssis à petit-bois à cause de leur faible épaisseur.
- (Luyckx, 2014; Bruxelles Environnement; Deruyver, 2014)



Figure 34 - Châssis à petit-bois (Bruxelles Environnement)

La deuxième méthode consiste à placer un **profilé d'adaptation** en bois ou en PVC sur le châssis, qui va supporter un double vitrage.

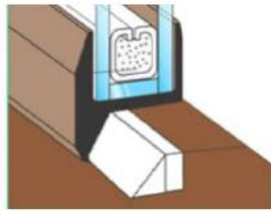


Figure 35 - Profilés et double vitrage pour rénovation (Saint-Gobain Glass)

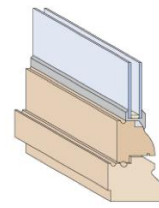


Figure 36 - Pose d'un double vitrage dans un profilé d'adaptation (Detremmerie, et al., 2012)

AVANTAGES

- Cette technique est réversible et relativement peu coûteuse.

INCONVENIENTS

- L'aspect extérieur est fortement modifié et le vitrage d'origine est perdu.
- L'épaisseur du profilé est supérieure au châssis et donc la surface vitrée et l'efficacité lumineuse du vitrage sont réduites.
- Les ouvrants et les charnières doivent pouvoir supporter le poids supplémentaire du double vitrage. (Bruxelles Environnement)

▪ Pose d'un simple vitrage performant

Cette intervention consiste à remplacer le vitrage d'origine par un simple vitrage présentant de bonnes performances thermiques.



Figure 37 - Intégration d'un simple vitrage feuilleté dans un (a) châssis en bois existant – (b) châssis métallique existant (Bruxelles Environnement)

AVANTAGES

- Le profil ancien ainsi que son aspect sont conservés.
- L'amélioration générale du vitrage est améliorée d'un point de vue thermique, acoustique, résistance au choc, résistance au feu, ... mais la performance thermique est limitée.
- L'épaisseur du vitrage est relativement faible, cette solution est donc applicable à presque tous les châssis anciens. Elle est particulièrement adaptée pour les châssis à petits-bois.
- La surface nette éclairante est conservée.

INCONVENIENTS

- Le prix est important.
- Le vitrage d'origine n'est pas conservé.
- Les ouvrants et les charnières doivent pouvoir supporter le poids supplémentaire du double vitrage. Ce surpoids peut engendrer une déformation du châssis.
- Le coefficient de transmission lumineuse et le facteur solaire du vitrage sont légèrement diminués. (Jourquin, 2010)

DOUBLE CHASSIS

Un double châssis à simple ou double vitrage est intégré dans la baie intérieure de la maçonnerie dans la continuité de l'isolation éventuelle. Ce nouveau châssis doit permettre l'ouverture du châssis existant et sa position dépend de l'intérêt patrimonial de l'intérieur. Les sections des profilés du nouveau châssis peuvent être plus faibles et dans un autre matériau car celui-ci n'est pas soumis aux conditions extérieures.

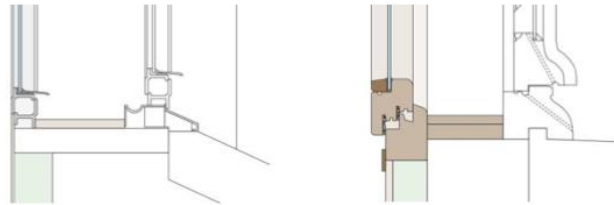


Figure 38 - Intégration d'un double châssis en applique, sur la face intérieure du mur de façade, avec isolation intérieure (Bruxelles Environnement)

AVANTAGES

- Cette technique permet la conservation totale du châssis existant et est réversible.
- Les performances énergétique et acoustique sont considérablement améliorées.

INCONVENIENTS

- L'aspect intérieur est fortement modifié.
- Le coefficient de transmission lumineuse et le facteur solaire sont réduits.
- L'entretien est augmenté.
- L'augmentation de l'étanchéité à l'air du châssis modifie le comportement hygrothermique du bâtiment et peut entraîner l'apparition d'humidité dans les murs.
- L'absence d'amenée d'air entre les deux châssis peut engendrer un risque de condensation sur la face intérieure du vitrage d'origine.

(Bruxelles Environnement; Deruyver, 2014)

TENTURES EPAISSES, VOLETS INTERIEURS OU CONTREVENTS

Il existe de nombreuses architectures qui utilisent dans leurs constructions des contrevents ou des volets intérieurs. Ceux-ci peuvent être restaurés dans le cadre d'une amélioration énergétique.

AVANTAGES

- Ils permettent de protéger du froid en réduisant les déperditions dues au rayonnement nocturne et du chaud en évitant les apports solaires le jour. L'effet de paroi froide est diminué.

INCONVENIENTS

- Les volets roulants extérieurs sont rarement compatibles avec les façades patrimoniales.
- (AUP, et al., 2010; Deruyver, 2014)

2.5 LES ISOLANTS

Le choix d'un isolant se fait selon plusieurs critères :

1. Critères techniques

La performance thermique de l'isolant est bien sûr un critère important mais la planéité du support, l'espace disponible, la performance acoustique de l'isolant ainsi que son comportement à l'humidité doivent également être pris en compte.

2. Critères environnementaux

Les isolants seront choisis de préférence à partir de matières renouvelables et qui ont un faible impact environnemental. Ils seront de préférence recyclés ou contenant des produits recyclés.

3. Critères économiques

Il faut également tenir compte du coût des matériaux ainsi que du coût de leur mise en œuvre.

4. Critères socio-culturels

Les risques sanitaires, lors de la mise en œuvre et durant la phase d'utilisation du produit, doivent être étudiés afin de limiter l'impact sur la santé.

(Bruxelles Environnement)

Les matériaux d'isolation peuvent se diviser en trois catégories : les matériaux isolants provenant de matières naturelles d'origine végétale ou animale, les matériaux isolants provenant de matières minérales et ceux provenant de l'industrie pétrochimique. Le livre « L'isolation thermique écologique », le Guide Bâtiment Durable sur le choix des matériaux d'isolation thermique, le site Construire Durable et le site Energie+ ont permis de rédiger les paragraphes suivants. Des tableaux comparatifs plus détaillés des performances des isolants se trouvent à l'Annexe 4.

Tableau 2 – Propriétés techniques des matériaux isolants	Conductivité de la chaleur λ [W/mK]	résistance à la diffusion de vapeur μ [-]	Ouvert à la vapeur?	Chaleur spécifique c [J/kgK]	Masse volumique ρ [kg/m ³]	Coefficient de diffusion thermique (moyen) $a = \lambda / \rho \cdot c$ (W.cm ² /J)	Inflammable?	Isolation acoustique	Durée de vie [an]
Laine de verre	0,035 - 0,040	1	☺	800	25	0.0175	Non	☺	>25
Laine de roche	0,037 - 0,040	1 - 5	☺	800	40	0.0125	Non	☺	>25
Verre cellulaire	0,040 - 0,048	infinie	☹	840	120 - 180	0.0317	Non	☺	>25
Perlite	0,046	5	☺	900	50 - 80	0.0074	Non	☺	-
Vermiculite	0,058	3	☺	900	<100	0.0088	Non	☺	-
Granulés de mousse de silicate	0,040	3	☺	800	25	0.020	Non	-	-
Polystyrène expansé	0,028 - 0,040	20 - 100	☹	1450	25 - 35	0.0064	Oui	☹	>25
Polystyrène extrudé	0,027 - 0,034	150 - 300	☹	1500	15 - 30	0.0080	Oui	☹	>25
Polyuréthane	0,024 - 0,029	50 - 185	☹	1200	20 - 40	0.0069	Oui	☹	>25
Cellulose	0,035 - 0,040	1 - 2	☺	1600 - 2150	35 - 50	0.0040	Auto-extinguible	☺	25
Fibres de bois	0,040 - 0,055	5	☺	2100	45 - 140	0.00014	Difficilement	☺	-
Lin	0,040	1 - 2	☺	1550 - 1660	20 - 35	0.0079	Difficilement	☺	-
Chanvre	0,040	1 - 10	☺	1600 - 1700	30 - 36	0.0070	Difficilement	☺	-
Laine de mouton	0,035	1 - 2	☺	1720	25	0.0093	Sans gaz toxique	☺	-
Liège expansé	0,040	5 - 30	☺	1670	110 - 190	0.0015	Difficilement	☺	25

Tableau 4 - Tableau récapitulatif des propriétés techniques des matériaux isolants (Bruxelles Environnement, 2009)

Dans le cas du bâti ancien historique, les matériaux ouverts à la vapeur d'eau sont à privilégier afin de ne pas créer d'accumulation d'humidité au sein de la paroi et d'en permettre l'évacuation. Afin d'assurer cette continuité capillaire entre le mur et l'isolant, la compatibilité entre les différents produits en termes de diffusion de vapeur d'eau doit être vérifiée.

Dans le cas d'une isolation par l'intérieur, les matériaux à plus forte inertie sont recommandés afin de compenser la perte d'inertie. De plus, si l'épaisseur d'isolation thermique est limitée pour des raisons d'espace disponible par exemple, il est conseillé de choisir des isolants à faible conductivité thermique.

	1 ^{er} choix	2 ^{ème} choix	3 ^{ème} choix
Dalle de sol*	Verre cellulaire Panneaux de mousse résol	Laine de roche Laine de verre	Polyuréthane Polystyrène extrudé Polystyrène expansé
Plancher**	Laine de lin, de mouton, de verre, coussins de polyester (en rénovation)	Cellulose, liège, laine de roche, polystyrène, mousse résol	polyuréthane
Double mur extérieur*	Laine de chanvre Laine de mouton Panneau mousse résol	Laine de roche Laine de verre	Polyuréthane Polystyrène extrudé Polystyrène expansé
Ossature**	Cellulose, liège, laine de verre ou de mouton, mousse résol, fibre de coco	Laine de roche, polystyrène expansé, lin, verre cellulaire	polyuréthane
Toiture plate**	Liège, mousse résol, polystyrène expansé	Laine de roche, verre cellulaire	polyuréthane
Toiture versants**	Cellulose, liège, laine de verre, mousse résol, laine de mouton	Laine de roche, polystyrène expansé, lin	polyuréthane

*Source : Guide conseil pour la rénovation durable de logements collectifs, Bruxelles Environnement

**Sur base du classement NIBE (mise à jour 2008-2009)

**Tableau 5 - Choix des isolants
(Bruxelles Environnement, 2009)**

2.5.1 ISOLANTS D'ORIGINE VEGETALE ET ANIMALE

D'un point de vue environnemental, ces isolants proviennent entièrement ou en majeure partie de matières premières renouvelables et abondantes. Leur production est peu énergivore et ils peuvent être réutilisés ou valorisés.

D'un point de vue technique, les isolants d'origine animale sont légèrement plus performants thermiquement. Ils sont généralement de bons isolants acoustiques. Ils ont une bonne capacité d'accumulation de chaleur ce qui permet d'éviter les surchauffes en été. Ils contiennent parfois des adjuvants qui augmentent leur résistance au feu ou aux moisissures et parasites. Ils ont la propriété d'être ouvert à l'air et sont des régulateurs d'humidité.

D'un point de vue économique, ils sont généralement un peu plus coûteux que les autres isolants.

D'un point de vue socio-culturel, ils ne causent pas d'irritation de la peau ou des voies respiratoires durant leur phase d'utilisation. Durant leur mise en œuvre, certaines précautions sont à prendre quant aux poussières dégagées.

ISOLANTS D'ORIGINE VEGETALE

- La cellulose

La ouate de cellulose est obtenue par recyclage de papier journal, qui est disponible en grande quantité. Le papier est défibré puis broyé en flocons. Elle peut se présenter en vrac (projection sur une surface plane ou insufflation dans des caissons) ou sous la forme de matelas souples de cellulose. Sa conductivité est comparable à celle des laines minérales.

L'adjonction d'adjuvants tels que le sel de bore ou autres la rend résistante contre les insectes, les moisissures et le feu. De par son hygroscopicité, elle est cependant très vulnérable à l'eau et à l'humidité. Elle présente une très bonne performance acoustique. Elle convient bien pour les rénovations car elle remplit les espaces irréguliers et difficiles d'accès.



Figure 39 - (a) Cellulose – (b) Fibre de bois – (c) Liège – (d) Chanvre (Ecobati)

- La fibre de bois

Les fibres de bois proviennent des déchets de bois de sciure. L'adjonction d'émulsion de bitume ou de latex les rend résistants à l'eau. Elles se présentent sous forme de panneaux.

Ceux-ci sont perméables à la vapeur d'eau, ont une bonne résistance à la compression et une haute densité qui contribue au confort d'été. Grâce à leur résistance à l'eau, ils peuvent être utilisés comme panneau de sous-toiture ou comme revêtement de paroi.

- Le liège

Le liège provient de l'écorce du chêne-liège qui est une matière première renouvelable. Il se présente sous la forme de panneaux ou de billes en vrac.

Grâce à sa haute densité, il a une bonne inertie thermique et contribue au confort d'été. Il a une très bonne performance acoustique et une très bonne résistance à l'humidité, même prolongée. Il est cependant coûteux, peu disponible et peu perméable à la vapeur d'eau. Il est souvent utilisé sous les planchers en bois et les chapes.

- Le lin et le chanvre

Les isolants à base de lin sont fabriqués à base de fibres courtes du bas de la tige qui sont ensuite cordées et traitées. Les isolants à base de chanvre résultent du défibrage mécanique de la paille, dont on extrait la chènevotte et la fibre auxquelles on ajoute un liant. Leur culture ne nécessite pas d'ajout de pesticide.

Le chanvre se cultive dans nos régions. Ils se présentent sous la forme de rouleaux ou de panneaux semi-rigides.

Tous deux ont une faible résistance à la vapeur d'eau et une bonne performance acoustique. Cependant, ils présentent une mauvaise résistance à l'humidité prolongée et une faible densité.

ISOLANTS D'ORIGINE ANIMALE



Figure 40 - Laine de mouton et plumes de canard (Ecobati)

▪ La laine de mouton

Cet isolant se constitue de laine de mouton, qui est une matière première renouvelable et abondante, de liants et d'adjuvants antimites. Les outils de classification divergent quant à ses performances. Il présente une bonne performance acoustique et une faible résistance à la diffusion de vapeur d'eau. Cependant, sa faible densité contribue peu au confort d'été et son lavage nécessite des quantités importantes d'eau.

▪ Les plumes de canard

Cet isolant se compose de 70 % de plumes de canard, de 10 % de laine de mouton et de 20 % de fibres textiles synthétiques, soit 80% de matières premières renouvelables. Les plumes sont lavées et séchées et le tout est mélangé avec des agents antimites et antifongiques.

Il n'y a pas d'évaluation de ce matériau par des outils de classification.

Il présente une bonne performance acoustique, une faible résistance à la diffusion vapeur d'eau et une bonne résistance à l'humidité prolongée. Cependant, il est cher et peu répandu.

2.5.2 ISOLANTS D'ORIGINE MINERALE

Ces isolants, à base de matières premières minérales, sont fabriqués à partir de minerais de surface (roches volcaniques, silice, argile, etc.). Ils peuvent aussi comprendre certains éléments recyclés (verre, coke de haut fourneau, etc.)

D'un point de vue environnemental, leur production utilise des matières premières généralement abondantes mais non renouvelables. Les processus de fabrication sont énergivores et producteurs de CO₂. A leur fin de vie, certains isolants, en fonction de leur nature, peuvent être réutilisés ou recyclés.

D'un point de vue technique, ils ont de bonnes performances thermiques. Ils ne sont pas inflammables.



Figure 41 - (a) Laine de roche – (b) Verre cellulaire – (c) Vermiculite (Construire Durable, 2014)

▪ La laine de verre et la laine de roche

La première est fabriquée à partir de fragments de verre et d'une partie de sable pur et la seconde à partir de roches volcaniques. Elles se présentent toutes deux sous la forme de matelas ou de panneaux semi-rigides ou rigides.

Leurs avantages sont leur prix, leur faible résistance à la diffusion, leur bonne performance acoustique et leur excellente résistance aux moisissures. Elles sont imputrescibles et non capillaires.

Leur placement libère des fibres minérales qui peuvent causer des irritations ou des infections de la peau, des yeux et des voies respiratoires. Le risque disparaît cependant lorsque l'on n'est plus en contact avec ces fibres.

- Le verre cellulaire

Il est composé de verre et de cellules fermées remplies de gaz inerte. Il se présente sous la forme de panneaux rigides ou de bloc à maçonner. Il est souvent utilisé comme isolation en contact avec l'humidité (parois enterrées, etc.) grâce à son imperméabilité à l'eau, à la vapeur d'eau et à l'air. En plus de son coût élevé, sa production est très énergivore.

- La perlite et la vermiculite

La perlite est fabriquée à base de roche volcanique et la vermiculite à partir de mica. Elles se présentent sous forme de panneaux ou de granulés. Elles sont très résistantes à la compression et au poinçonnement mais ne résistent pas à une humidification prolongée.

2.5.3 ISOLANTS SYNTHETIQUES

Ils sont issus de la chimie du chlore et du pétrole. Ils se présentent le plus souvent sous la forme de panneaux. Les isolants synthétiques les plus connus sont le polystyrène expansé, le polystyrène extrudé et les polyuréthanes que nous ne détaillerons pas ici.

D'un point de vue environnemental, ils proviennent de matières non renouvelables et leur production est énergivore et productrice de CO₂. En fin de vie, ils sont difficilement recyclables.

D'un point de vue technique, ils présentent une très bonne performance thermique mais ils isolent mal des nuisances sonores. Ils sont étanches à l'eau, faiblement perméables à la vapeur d'eau et très faiblement perméable à l'air. Ils entraînent des surchauffes en été.

D'un point de vue économique, ils sont bon marché.

D'un point de vue socio-culturel certains isolants dégagent des COV durant leur utilisation et sont, pour la plupart, toxiques en cas d'incendie.

3 SYSTEMES

« La vraie économie d'énergie que l'on peut faire dans un bâtiment est celle que l'on ne consomme pas ». (MATRICIEL, 2010) A cet effet, une amélioration énergétique de l'enveloppe via des travaux d'isolation est à considérer. Ensuite, une amélioration ou un remplacement des systèmes peuvent être envisagés puisque les systèmes doivent être dimensionnés pour le bâtiment après isolation éventuelle. (Deruyver, 2014) Cependant, dans certains cas où le budget est limité et qu'une amélioration de l'enveloppe n'est pas possible, un investissement financier moins important dans l'amélioration ou le remplacement des systèmes constitue tout de même une amélioration notable du confort et une diminution des consommations.

3.1 VENTILATION

Pour rappel, un renouvellement d'air est nécessaire dans une habitation afin de garantir un confort optimal aux occupants en subvenant aux besoins en oxygène des occupants, en évacuant la vapeur d'eau générée par les occupants, en réduisant la pollution intérieure et en supprimant les odeurs et fumées pour améliorer le confort.

Dans le cas d'une rénovation, le choix d'un système de ventilation doit concilier un taux de renouvellement de l'air suffisant, environ 0,3 à 0,5 vol/h pour un confort optimal, et des économies d'énergie, grâce à une bonne gestion des débits d'air et une adaptation de ceux-ci aux occupants. (De Meester, 2009; MPF, 2011) Différentes solutions existent :

3.1.1 VENTILATION NATURELLE

La ventilation initiale du bâtiment est conservée : les entrées et les sorties d'air se font sur des façades opposées par les défauts d'étanchéité, les fenêtres ou les conduits de cheminée.

AVANTAGES

- La présence d'annexes en façade, la mise en place de double châssis ou l'installation d'un puits canadien créent des espaces tampons qui vont préchauffer l'air entrant. Ces différentes solutions permettent de diminuer les consommations énergétiques tout en assurant une ventilation naturelle.

INCONVENIENTS

- Les débits de renouvellement d'air étant difficilement maîtrisables, les déperditions thermiques le sont aussi.
- En cas d'isolation des murs et du remplacement des châssis existants, le taux de renouvellement de l'air peut ne plus être suffisant (cf. Les risques du remplacement, p.25). (De Meester, 2009; MPF, 2011)

3.1.2 VENTILATION MECANIQUE SIMPLE FLUX

Les entrées d'air se font de façon naturelle par les bouches en haut des baies des pièces sèches (salon, chambres et séjour). L'air est ensuite extrait des pièces humides (cuisine, salle de bain, WC) par des bouches d'extraction qui les évacuent vers l'extérieur via un système de gaines et un extracteur, généralement placé dans les combles. Le système peut être autoréglable, c'est-à-dire que les entrées et les extractions d'air se font à débit constant ou hydroréglable, les débits varient en fonction des conditions hygrométriques des locaux.

AVANTAGES

- Les débits de renouvellement d'air sont mieux maîtrisés, ce qui engendre des économies d'énergie.
- L'ensemble du bâtiment est ventilé et ce, en permanence, ce qui améliore le confort.
- Si la disposition du bâtiment permet un passage aisé des gaines de ventilation, l'investissement est relativement peu important pour des économies rapides et une bonne durabilité dans le temps.

INCONVENIENTS

- La mise en place d'un tel système demande des travaux importants qui ne sont pas toujours compatibles avec le bâti ancien.
- Le rejet de l'air extrait chaud à l'extérieur entraîne une perte de calories non négligeable.
- Ce système requiert une énergie électrique. (De Meester, 2009; MPF, 2011)

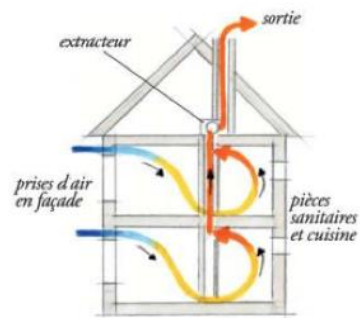


Figure 42 - VMC simple flux
(MPF, 2011)

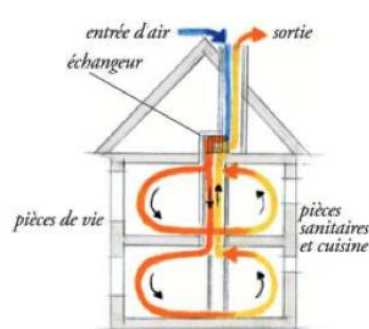


Figure 43 - VMC double flux
(MPF, 2011)

3.1.3 VENTILATION MECANIQUE DOUBLE FLUX

L'air neuf est insufflé dans les pièces sèches via un réseau de gaines. L'air vicié est ensuite extrait des pièces humides par un autre réseau de gaines. Le système peut être équipé d'un récupérateur de chaleur qui permet de préchauffer l'air neuf entrant par l'air extrait chaud.

AVANTAGES

- Les débits d'air contrôlés et le récupérateur de chaleur engendrent des économies d'énergie importantes et une amélioration du confort.

INCONVENIENTS

- L'installation d'un double réseau de gaine engendre des travaux importants qui ne sont pas toujours compatibles avec le bâti ancien. Cependant, les gaines peuvent être placées dans un faux-plafond.
- L'investissement est également conséquent.
- La consommation électrique des extracteurs est importante.
- Un entretien annuel du système est nécessaire.
- Ce système est surtout efficace et rentable pour les maisons fortement isolées.
(De Meester, 2009; MPF, 2011)

3.1.4 VENTILATION MECANIQUE REPARTIE

Dans certains cas, il n'est pas possible d'intégrer une ventilation mécanique contrôlée complète. Une solution alternative consiste à placer un des extracteurs indépendants dans les pièces humides : l'air est aspiré et rejeté directement à l'extérieur par un conduit dans un mur extérieur. Cela permet de résoudre localement des problèmes d'humidité.

AVANTAGES

- Les pièces humides bénéficient d'un renouvellement de l'air suffisant.
- Ce système est simple, facile à mettre en œuvre et bon marché.

INCONVENIENTS

- Il n'y a pas de récupération de chaleur.
- Le système consomme de l'énergie électrique.
- Le système engendre une légère nuisance sonore.
- Le bâtiment n'est pas ventilé de façon générale.
- L'extracteur entraîne une bouche sur la façade, qui n'est pas toujours compatible avec une façade ancienne.
(AUP, et al., 2010)

3.2 CHAUFFAGE

Remplacer les anciens systèmes de chauffage par des systèmes modernes plus performants permet de réduire de façon considérable la consommation énergétique du bâtiment. Il s'agit d'une réflexion globale qui porte à la fois sur la production de chauffage, la distribution, l'émission, la régulation et la programmation. (MPF, 2011)

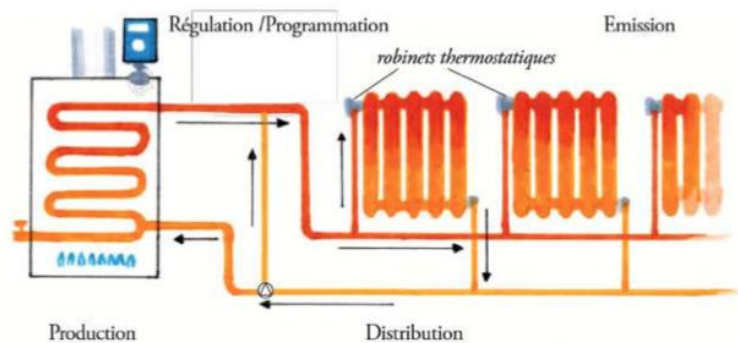


Figure 44 - Système de chauffage
(MPF, 2011)

3.2.1 LA PRODUCTION

Le remplacement du système de production permet d'améliorer le rendement de l'installation, d'exploiter le réseau de conduits existants et de se tourner vers l'utilisation d'une énergie renouvelable. Différents systèmes de production existent :

LE CHAUFFAGE ELECTRIQUE

En plus de son coût relativement important, le chauffage électrique présente un bilan écologique défavorable car sa production nécessite beaucoup d'énergie : 2,5 kWh de combustible sont nécessaires pour produire 1 kWh d'électricité. (Architecture et Climat, 2013)

LE CHAUFFAGE A COMBUSTIBLE (GAZ, MAZOUT)

Le remplacement du vieux système de chauffage par une chaudière à condensation avec un rendement supérieur à 100 % permet de faire jusqu'à 20 % d'économie.

L'installation d'une chaudière à condensation nécessite cependant quelques précautions :

- Il faut vérifier que les émetteurs sont compatibles avec une température d'eau de chauffage assez basse, environ 50 °C. En effet, une chaudière à condensation nécessite une température de retour basse et les anciens émetteurs de chaleur sont généralement dimensionnés en régime 90/70 °C. Le rendement des chaudières à condensation est alors diminué. (Architecture et Climat, 2013)

Les anciens radiateurs en fonte sont souvent compatibles avec un régime basse température : d'une part, ces émetteurs sont souvent surdimensionnés en régime 90/70 °C et d'autre part, la puissance nécessaire des émetteurs est généralement réduite grâce à l'amélioration des performances de l'enveloppe. (MATRIciel, 2010; Architecture et Climat, 2013)

- L'évacuation des fumées sera intégrée de préférence dans les anciens conduits mais les chaudières à condensation nécessitent d'office le tubage de la cheminée. Si ce n'est pas possible, il faut qu'elle soit la plus discrète possible afin de ne pas dénaturer l'aspect d'une façade classée. (MPF, 2011)

LE CHAUFFAGE BOIS

Le bois était souvent la source d'énergie principale ou secondaire dans le bâti ancien. Les cheminées et les poêles à bois d'origine doivent donc être conservés car ils sont compatibles avec une rénovation écologique, le bois étant une source d'énergie renouvelable. Les combustibles sont de plusieurs types : bois en bûche, en plaquettes ou en pellets qui ont un meilleur rendement et permettent un gain d'espace de stockage non négligeable.

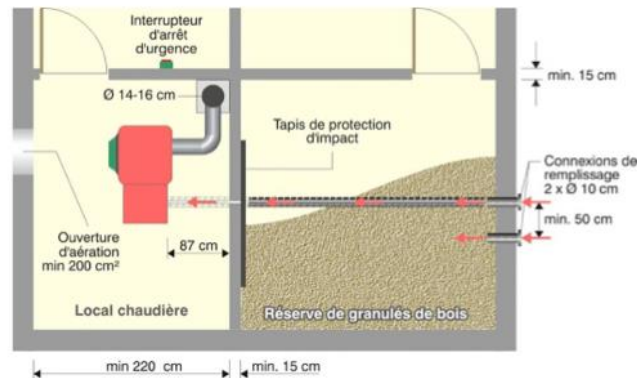


Figure 45 - Encombrement d'une réserve à granulés de bois
(Architecture et Climat, 2013)

Le bois peut être utilisé comme source principale de chauffage. Une chaudière à bûches, à pellets ou à plaquettes peut remplacer une ancienne chaudière au fioul par exemple. Il faut cependant prévoir un espace suffisant pour le silo de stockage des granulés ou des plaquettes. (cf. Figure 45)

Le bois peut aussi être utilisé comme source d'appoint. Un poêle à bois contemporain peut servir à chauffer plusieurs pièces selon sa localisation et la disposition des espaces. Ces poêles à bois présentent des rendements importants. (MPF, 2011)



Figure 46 - Combustibles : bûches, plaquettes, pellets
(Architecture et Climat, 2013)

Vu la haute température que la chaudière envoie, ce type de chauffage est adapté pour chauffer de grands ensembles peu isolés (grandes fermes, châteaux, abbayes, etc.) Notons également que l'émission de particules polluantes lors de la combustion nécessite le placement de filtres relativement coûteux qui sont donc plus accessibles pour de grandes installations. (Crehay, et al., 2004)

LE CHAUFFAGE PAR POMPE A CHALEUR

Ce type de chauffage utilise une source d'énergie renouvelable et constitue une alternative avantageuse au chauffage électrique traditionnel. Il existe des pompes à chaleur air/air, air/eau, eau/eau. Ces pompes peuvent être couplées avec un chauffage électrique, mazout ou gaz. (MPF, 2011)

Cependant, le coût est plus élevé que le remplacement d'une chaudière existante et nécessite un espace suffisant en façade pour la prise d'air neuf dans le cas d'une pompe air/air ou air/eau. La pompe à chaleur est donc placée de préférence dans un appentis plutôt qu'en façade. (AUP, et al., 2010)

Tout comme pour les chaudières à condensation, les pompes à chaleur nécessitent une température de retour la plus basse possible, soit un maximum de 50 °C. La compatibilité des émetteurs de chaleur, prévus pour fonctionner à haute température doit être vérifiée. (Architecture et Climat, 2013)

Dans le bâti ancien, il est conseillé d'utiliser un système de distribution fonctionnant avec l'eau plutôt que l'air : radiateur, plancher chauffant.

Une pompe à chaleur eau/eau présente le meilleur coefficient de performance. Les pompes à chaleur air/air sont à éviter car elles sont peu performantes, demandent un ventilateur extérieur et le confort qu'elles donnent est peu adapté au bâti ancien. (MPF, 2011)

La géothermie est difficilement mise en place dans une rénovation mais possible si le bâtiment est jouté par une grande propriété. Une surface de captage comprise entre 1,5 et 3 fois la surface de chauffe est conseillée. (Filloux, 2010)

Cependant, il faut parfois tenir compte des interdictions éventuelles d'utilisation du sous-sol dans certaines communes telles que Spa ou Chaudfontaine. (Deruyver, 2014)

3.2.2 LA DISTRIBUTION

Afin de limiter les pertes de chaleur, il est conseillé d'isoler le réseau de distribution avec un matériau calorifuge et de placer la chaudière dans le volume chauffé. (MPF, 2011) Cela constitue un faible investissement dont les effets sur les économies d'énergie sont immédiats. (AUP, et al., 2010)

3.2.3 L'EMISSION

Les systèmes d'émission par rayonnement, chauffant la matière plutôt que l'air, sont à privilégier par rapport aux systèmes d'émission par convection.

Grâce à l'inertie importante du bâti ancien, ses parois peuvent stocker la chaleur et améliorer le confort en supprimant l'effet de paroi froide. Cela réduit les plages de chauffe. Les consommations d'énergie diminuent au profit des parois qui redistribuent les calories accumulées.

Les radiateurs en fonte, les poêles à bois, ... en plus d'avoir une grande valeur patrimoniale, présentent une forte inertie, importante pour le confort. Il est donc préférable de les conserver et tout à fait possible de les intégrer dans un nouveau système de chauffage.

Les radiateurs modernes à accumulation, les planchers et les murs rayonnants conviennent aussi bien pour le bâti ancien s'il est occupé régulièrement. Des travaux d'isolation généraux d'un bâtiment permettent d'intégrer des planchers et murs rayonnants facilement. (MPF, 2011)

3.2.4 LA REGULATION ET LA PROGRAMMATION

Les anciens systèmes de chauffage ne sont généralement pas pourvus de régulation ou de programmation du chauffage, ce qui engendre des consommations énergétiques importantes. Une optimisation du fonctionnement du système de chauffage, sans constituer un investissement important permet d'adapter le fonctionnement de la chaudière aux besoins réels des occupants. (MPF, 2011)

LA REGULATION

Afin de contrôler la température intérieure de chaque pièce en fonction de sa destination, la pose de robinets thermostatiques et d'une sonde d'ambiance dans le séjour est conseillée. En effet, la cuisine, les chambres et les couloirs nécessitent une température de confort inférieure à celle demandée par le séjour. (MPF, 2011)

Une sonde extérieure permet également d'anticiper les écarts de température en contrôlant la température intérieure. Elle est indispensable pour les chaudières à condensation, permettant à la chaudière de calculer la meilleure courbe de chauffe. (AUP, et al., 2010)

LA PROGRAMMATION

La définition de deux plages horaires telles que la présence ou l'absence des occupants permet de régler deux températures de consigne différentes (par exemple 16 et 19 °C). Le système de chauffage s'adapte aux besoins des occupants.

Cependant, l'inertie importante du bâti ancien engendre une montée et une descente lente des températures et un déphasage important qui sont à prendre en compte lors de l'établissement des températures de consigne. (MPF, 2011)

3.3 EAU CHAUDE SANITAIRE (ECS)

Traditionnellement, l'eau chaude sanitaire pouvait être produite par des ballons électriques indépendants ou des ballons combinés avec une chaudière. L'offre s'est ensuite diversifiée et l'utilisation d'énergies renouvelables pour chauffer l'eau se répand peu à peu, via une pompe à chaleur ou l'énergie solaire. (AUP, et al., 2010)

3.3.1 PRODUCTION D'ECS VIA UNE CHAUDIERE

La production d'eau chaude est combinée avec la chaudière. Si celle-ci est remplacée par un modèle plus performant, la production d'eau chaude est donc aussi améliorée. Les débits de la chaudière assurent une alimentation en eau chaude sanitaire suffisante et un temps d'attente relativement faible si la pièce n'est pas trop loin de la chaudière.

3.3.2 PRODUCTION D'ECS ELECTRIQUE

Si une installation électrique existe déjà, le remplacement des anciens ballons par de nouveaux ballons électriques est généralement plus simple mais n'induit pas de gains très significatifs. Comme dit précédemment, l'électricité n'est pas à privilégier à cause de sa production qui engendre beaucoup de pertes de transformation, sauf si celle-ci est fournie par des panneaux photovoltaïques.

3.3.3 PRODUCTION D'ECS THERMODYNAMIQUE

Le ballon d'eau chaude thermodynamique fonctionne comme une pompe à chaleur. Il récupère les calories de l'extérieur, de l'air ambiant d'un local non chauffé ou de l'air extrait d'une VMC. Ce système dépend de la place et de la position du ballon existant. Il permet une économie de 40 à 60 % sur la facture pour un coût entre celui d'un simple ballon électrique et d'une installation solaire.

3.3.4 PRODUCTION D'ECS SOLAIRE

La mise en place de ce système permet des réductions de 30 à 50 % sur la facture mais il demande un investissement élevé. L'énergie solaire constitue une source d'énergie renouvelable et permet de faire des économies importantes.

Afin d'obtenir le meilleur rendement, il est conseillé d'orienter les panneaux au Sud avec une pente de 30 à 45°. Une analyse préalable de l'ensoleillement est donc nécessaire avant l'installation. Leur dimension et leur nombre varieront en fonction des besoins.

Les capteurs peuvent couvrir 100 % des besoins en été. Par contre en hiver, un appoint électrique, au mazout ou au gaz sera nécessaire.

Afin d'éviter les pertes, le raccordement entre les capteurs et le ballon d'eau chaude sera le plus court possible. Ce dernier sera placé dans le volume chauffé.

Au-delà des économies importantes engendrées, le problème majeur de ce type de production est sa compatibilité avec le patrimoine. Il est toléré dans certains cas la pose de panneaux sur des toitures classées pour autant que ces interventions soient les plus discrètes possibles.

3.4 ELECTRICITE

3.4.1 PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

Tout comme les panneaux solaires thermiques, ils sont souvent difficilement compatibles avec le patrimoine et donc rarement autorisés sur des toitures classées. (AUP, et al., 2010) La pose sur des structures séparées pourrait toutefois être envisagée. (Deruyver, 2014)

4 ENVIRONNEMENT

A côté de l'amélioration énergétique de l'enveloppe et des systèmes, d'autres solutions alternatives et respectueuses de l'environnement permettent aussi de faire des économies d'énergie et d'améliorer le confort intérieur avec des coûts parfois moins conséquents: mise en place d'une citerne de récupération d'eau de pluie, de toitures végétalisées ou encore utilisation de matériaux peu énergivores, de provenance locale et sains.

ANALYSE DE CAS

1 INTRODUCTION DE L'ANALYSE

1.1 OBJECTIFS ET CHAMP D'ETUDE

Après avoir établi dans le premier chapitre de ce travail un état des lieux en matière de techniques de rénovation énergétique de bâtiments à intérêt patrimonial, ce deuxième chapitre se concentre sur une analyse de cas de rénovation énergétique de bâtiments à intérêt patrimonial. Cette analyse, ne portant que sur six cas très différents, ne permet bien évidemment pas de tirer de conclusions générales sur les techniques à privilégier mais elle permet toutefois de vérifier l'applicabilité dans la pratique des techniques énoncées dans le chapitre précédent. Cette analyse va permettre également l'élaboration, dans le troisième chapitre de ce travail, d'un outil d'aide à la rénovation, à l'attention de propriétaires ou d'architectes confrontés à une rénovation énergétique d'un bâtiment présentant un intérêt patrimonial.

Les cas analysés dans ce chapitre ont été choisis afin de couvrir une large gamme de bâtiments, tant du point de vue de leur typologie, de leur époque de construction et de leur niveau de protection, afin d'étudier l'étendue des solutions mises en œuvre en fonction du contexte du bâtiment.

On retrouvera donc différentes catégories de typologies – d'un ancien moulin d'abbaye à un immeuble de logements sociaux, d'époques – du XVII^e au XX^e siècle, et de niveaux de protection du patrimoine – du classement à l'inscription à l'inventaire du patrimoine monumental en passant par la zone de protection. Les cas présentés dans ce chapitre se situent en Régions Bruxelles-Capitale et Wallonne et concernent majoritairement le secteur résidentiel.

1.2 METHODOLOGIE

Les différents cas ont été choisis principalement grâce à la brochure « Patrimoine et énergie – former, innover, dialoguer : les chemins durables », produite dans le cadre du projet interrégional ERFIN « éco-rénovation patrimoniale : formation & innovation », menée par le R.E.D entre 2012 et 2013. Elle présente différents cas de restauration de bâtiments à intérêt patrimonial dans lesquels des approches créatives ont été mises en œuvre quant à leur performance énergétique.

Après avoir sélectionné les cas les plus pertinents, les architectes ont été contactés afin de convenir d'un ou plusieurs rendez-vous. Ces rencontres m'ont permis d'avoir de plus amples informations sur la rénovation énergétique et d'obtenir les plans, coupes et détails nécessaires à l'élaboration de l'analyse de cas². Chaque cas a ensuite été analysé selon une structure bien précise :

1. Présentation du bâtiment étudié

Cette partie reprend une fiche d'identité du bâtiment présentant globalement le bâtiment. Le contexte historique et géographique du bâtiment ainsi que le programme de la rénovation sont ensuite expliqués.

2. Techniques de rénovation

Cette partie aborde les techniques de rénovation et leur mise en œuvre à différents niveaux.

Tout d'abord, les interventions au niveau de l'enveloppe sont étudiées : toiture, sol, murs extérieurs et châssis. Les techniques d'amélioration sont détaillées et la valeur du coefficient de transmission thermique des parois est indiquée dans le tableau comparatif final (cf. p.81-82)

Ensuite, les interventions au niveau des systèmes sont détaillées : chauffage, production d'eau chaude sanitaire, ventilation et électricité.

Finalement, la dernière partie de cette section aborde l'aspect environnemental de la rénovation tel que la gestion de l'eau, l'utilisation de matériaux écologiques, l'intégration de toiture végétalisée, etc.

² Malgré la grande disponibilité des différents intervenants, le niveau de précision des informations fournies dépend de la quantité et de la qualité des données fournies par les architectes.

3. Economies

Cette partie présente les économies engendrées par la rénovation grâce à la comparaison entre besoins nets en chauffage avant et après rénovation. Les résultats dépendent pour chaque cas des données fournies par l'architecte ou le propriétaire.

4. Autres

Cette dernière partie peut aborder différents sujets selon les cas : l'utilisation d'un logiciel pour calculer les risques hygrothermiques engendré par l'isolation d'une paroi, le dialogue entre patrimoine et énergie ou encore l'aspect social de la rénovation.

1.3 PRESENTATION DES CAS

Les six cas retenus sont divisés en deux catégories.

La première catégorie regroupe des cas « classiques ». En effet, lors des recherches d'exemples, il est apparu que les solutions apportées au bâtiment étaient relativement semblables selon sa typologie. Il a donc été choisi d'analyser les cas les plus représentatifs de ces différentes typologies selon la structure détaillée précédemment :

- | | |
|-----------------------------|------------------------------------------------|
| - Bâtiment en milieu urbain | Maison Hankar – Saint-Gilles |
| - Bâtiment en milieu rural | Ancien moulin de l'abbaye de Grandpré – Gesves |
| - Immeuble à appartements | Résidence « Belle Jardinière » – Angleur |
| - Bâtiment tertiaire | Bureaux du CPAS – Forest |

La deuxième catégorie regroupe des cas « particuliers », c'est-à-dire des cas présentant des solutions particulières et spécifiques lors de la rénovation énergétique. Ces cas sont moins détaillés que les cas « classiques » et se concentrent surtout sur leur spécificité :

- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| - Compromis énergie – patrimoine | Refuge fortifié – Omal |
| - Production d'électricité verte | Moulin castral – Hollogne-sur-Geer |

2 MAISON HANKAR | SAINT-GILLES (B)

Les informations relatives à ce bâtiment proviennent de différentes sources telles que l'info fiche « Bâtiment exemplaire 2009 » (Bruxelles Environnement, 2011), une rencontre avec M. Van der Stricht et M. Brombart (Brombart, et al., 2014) ainsi que les documents fournis par le bureau d'architecture (Marc Van der Stricht Architecte, 2010), une présentation des propriétaires (Closson, et al., 2013) ainsi que deux présentations dans le cadre de formations organisées par Bruxelles Environnement (De Smet, 2013; Fruchart, 2011).

2.1 PRESENTATION DU BATIMENT ETUDIE

2.1.1 FICHE D'IDENTITE



Figure 47 - (a) Séjour 1 - (b) Façade avant - (c) Salle à manger
(Marc Van der Stricht Architecte, 2010)

Localisation	Avenue Ducpétiaux 47, 1060 Saint-Gilles
Programme	Rénovation, transformation et extension d'une maison mitoyenne
Typologie	Maison mitoyenne unifamiliale 2 façades
Reconnaissance patrimoniale	Façade et toiture à rue classées en 2004
Reconnaissance énergétique	Bâtiment basse énergie et bâtiment exemplaire 2009
Période de construction	1895
Année de rénovation	2009-2010
Superficie	282 m ²
Maître d'ouvrage	S. Closson et Th. Claes
Maître d'œuvre	Marc Van der Stricht Arch. Sprl
Bureau d'études	Enesta sprl
Coûts de construction HTVA, hors primes	656 €/m ²

2.1.2 CONTEXTE HISTORIQUE ET GEOGRAPHIQUE

Cette maison unifamiliale, de style Art Nouveau a été dessinée par Paul Hankar en 1895 pour des « commanditaires avec moyens réduits entraînant une grande sobriété dans la mise en œuvre ». (Closson, et al., 2013) La façade avant ainsi que la toiture à rue ont été classées en 2004. Le bâtiment est en maçonnerie de briques dont l'épaisseur varie d'environ 30 à 55 cm selon les étages. La façade avant de la maison a subi une première rénovation en 2005, au niveau des sgraffites et du remplacement des châssis. Cependant, le reste du bâtiment n'avait jamais été rénové depuis sa construction et nécessitait donc d'importants travaux. Les propriétaires actuels ont, dès le départ, fait le choix d'effectuer une rénovation qui leur permettrait de diminuer leur impact écologique ainsi que leur consommation énergétique grâce à l'utilisation de matériaux naturels. Ces critères correspondant à ceux requis lors de l'appel à projets « Bâtiments exemplaires » de la Région de Bruxelles-Capitale, ils ont donc décidé d'y participer en 2009.

2.1.3 PROGRAMME DE LA RENOVATION

Le bâtiment est composé d'une première construction principale à 2 façades avec une toiture à double pente s'étalant sur 4 niveaux. Une annexe avec une toiture plate sur 3 niveaux est venue compléter l'ensemble. L'entièreté de la structure du bâtiment principal a été conservée. La façade arrière n'étant pas classée, les propriétaires ont pu y faire certaines modifications telles que l'ajout d'un dernier étage en structure bois à l'annexe existante ainsi qu'une nouvelle verrière au rez-de-chaussée afin d'agrandir l'espace de vie. On retrouve donc au rez-de-chaussée : 2 séjours, la cuisine et la salle à manger. Au 1^{er} étage se trouvent une chambre et une salle de bain. Deux chambres et une salle de bain sont installées au 2^e étage tandis que le 3^e et dernier étage, situé dans les combles, abrite une chambre et la chaufferie.



Figure 48 - Façade arrière avant et après rénovation
(Closson, et al., 2013)



Figure 49 - Vues axonométriques : situations existante et projetée
(Marc Van der Stricht Architecte, 2010)

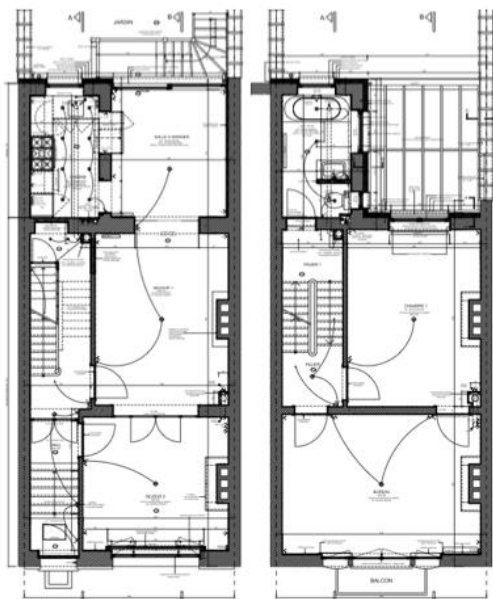


Figure 50 - Plans du rez-de-chaussée et du 1er étage
(Marc Van der Stricht Architecte, 2010)

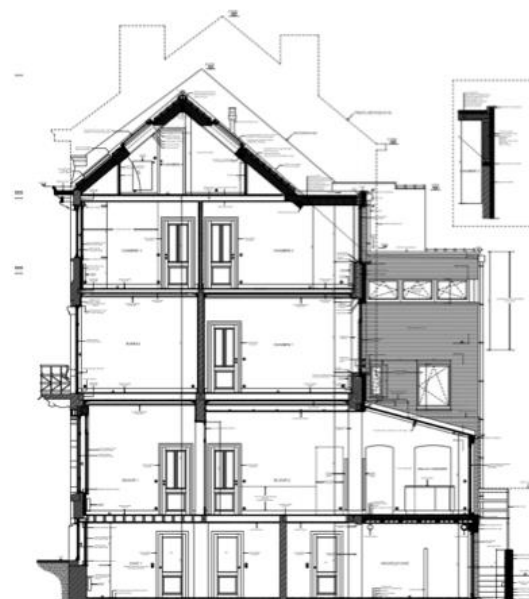


Figure 51 - Coupe longitudinale
(Marc Van der Stricht Architecte, 2010)

2.2 TECHNIQUES DE RENOVATION

2.2.1 ENVELOPPE

FAÇADES

▪ Façade avant

La façade avant présentait deux caractéristiques à prendre en compte lors de sa restauration. Premièrement, cette façade est classée et présente des sgraffites au niveau du 2^e étage. Deuxièmement, la face intérieure du mur présente sur deux niveaux des moulures originales au plafond. Une isolation par l'extérieur était donc à proscrire et une isolation par l'intérieur était possible en tenant compte des moulures et avec beaucoup de prudence afin de ne pas modifier le comportement hygrothermique de la paroi. La solution retenue est la pose d'une couche de 2 cm d'un mortier minéral d'isolation thermique³ sur trois des quatre niveaux du bâtiment.

▪ Façade arrière

La façade arrière, ne présentant pas de caractéristiques historiques à conserver, a pu être isolée par l'extérieur avec 12 cm de panneaux d'isolation en fibres de bois.



Figure 52 - Isolation de l'annexe
(Marc Van der Stricht Architecte, 2010)

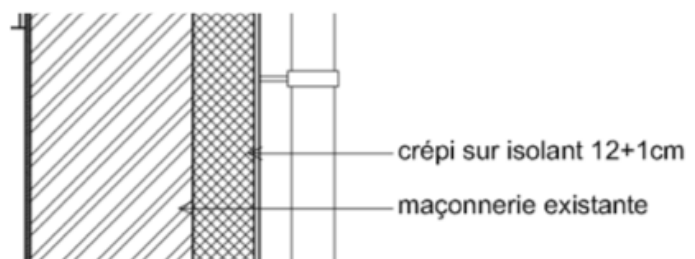


Figure 53 - Détail en coupe de la façade arrière existante
(Marc Van der Stricht Architecte, 2010)

▪ Annexe

Le nouvel étage de l'annexe a été construit en ossature bois avec 15 cm de flocons de cellulose recouverte par 12 cm de panneaux d'isolation en fibres de bois.

▪ Mur mitoyen

Une partie du mur mitoyen de la salle à manger est en contact avec la véranda de l'habitation voisine. Ce mur a donc été isolé uniquement à cet endroit avec 5 cm d'isolation récupérée dans l'habitation avant le chantier.

TOITURE

▪ Toiture principale

La toiture a entièrement été refaite. En effet, les pannes ont été renforcées tandis que les chevrons ont été doublés afin de pouvoir insuffler 23 cm d'ouate de cellulose. Une nouvelle couverture composée de tuiles en terre cuite et une sous-toiture en aggloméré de bois ont été installées. Un freine-vapeur a également été placé du côté chaud de l'isolant.

³ Unilit 20 : « Mortier minéral d'isolation thermique intérieur ou extérieur, constitué d'un mélange de silices expansées en courbe granulométrique sélectionnée, lié par la chaux hydraulique naturelle. (cf. Annexe 5) (Arte Constructo, 2006)

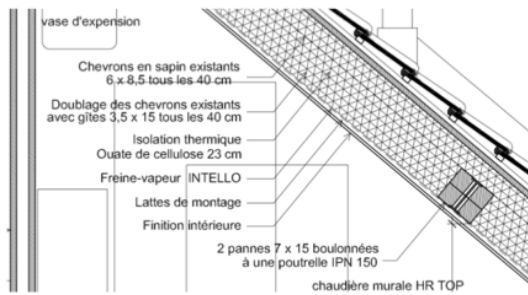


Figure 54 - Détail en coupe de la nouvelle toiture
(Marc Van der Stricht Architecte, 2010)



Figure 55 - Détail de la toiture
(Marc Van der Stricht Architecte, 2010)

▪ Toiture de l'annexe

Une nouvelle toiture a donc été construite au niveau de l'annexe en structure bois avec 18 cm de cellulose recouverte par 8 cm de mousse résolique. Une étanchéité EPDM a été placée et un freine-vapeur a été installé du côté chaud de l'isolant.

DALLE DE SOL ET PLANCHERS

La dalle de sol n'a pas été isolée et les planchers existants ont été conservés. Une nouvelle dalle en poutrains et claveaux a été placée au niveau de la véranda afin d'aménager une nouvelle cave.

PORTES ET CHASSIS

▪ Façade avant

Lors de la restauration de la façade en 2005, les châssis d'origine en simple vitrage de 3 mm ont été remplacés par des châssis en simple vitrage feuilleté de 6 mm. Cependant, au fil du temps, les ouvrants se sont affaiblis et l'étanchéité à l'air et au bruit était très mauvaise. De nouveaux châssis ont donc été placés à l'arrière des châssis existants, dans le plan de la face intérieure du mur. Les divisions de ces nouveaux châssis sont identiques à celles des châssis originaux. De plus, l'ancienne caisse à volet a été remplie d'isolant afin d'éviter les ponts thermiques. Un deuxième châssis n'a pas pu être ajouté au niveau de la porte fenêtre du 1^{er} étage en raison de la complexité de sa mise en œuvre. L'orientation sud de la fenêtre et l'utilisation de la pièce en bureau n'en ont pas fait un problème majeur.

Des problèmes de condensation apparaissent parfois sur la face intérieure du châssis d'origine. Le propriétaire doit donc veiller à aérer fréquemment pour évacuer cette condensation.

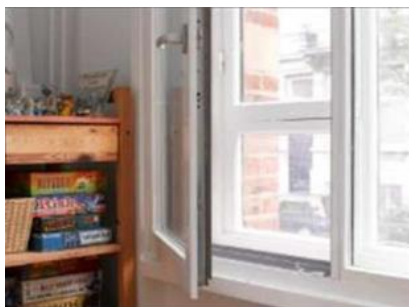


Figure 56 - Double châssis côté rue
(Marc Van der Stricht Architecte, 2010)

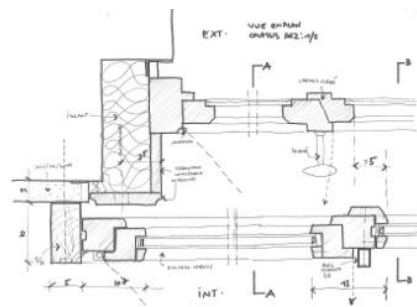


Figure 57 - Détail du double châssis
(Marc Van der Stricht Architecte, 2010)

La fenêtre de toit côté façade avant a également été remplacée par une nouvelle fenêtre de toit à triple vitrage. La porte d'entrée, devant également être conservée, a été restaurée. Puisqu'elle présentait de mauvaises performances thermiques, l'ajout d'un sas d'entrée a été décidé.

▪ Façade arrière

Cette façade arrière n'étant pas classée, les anciens châssis ont pu être remplacés par des châssis à triple vitrage de type passifs en bois labellisé FSC et PEFC. Les nouvelles ouvertures en toiture et sur l'annexe sont du même type. La véranda est également en triple vitrage.

2.2.2 SYSTEMES

CHAUFFAGE

Une chaudière à condensation à haut rendement de 24 kW a été installée au dernier étage.

VENTILATION

Un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur à rendement de 88 % a été installé dans la nouvelle cave. Un soin particulier a dû être apporté dans l'intégration des gaines verticales et horizontales sans altérer les moulures intérieures au plafond. Ces gaines ont donc été installées dans des faux-plafonds ou dans des espaces techniques.

Des systèmes de by-pass estival et de night-cooling ont également été installés. La surchauffe estivale a été estimée à 3 %.⁴

ETANCHEITE

Le test Blower-door a montré une étanchéité à l'air inférieure à $1,5 \text{ h}^{-1}$ ce qui correspond à la valeur d'une construction basse énergie.⁵

EAU CHAUDE SANITAIRE

Quatre panneaux solaires thermiques, pour une surface totale de $4,7 \text{ m}^2$, ont été installés en bordure de la toiture classée à rue, exposée au Sud. Ceux-ci sont presque invisibles depuis la voirie grâce à l'étroitesse de la voirie et le débord de la toiture. Ces panneaux permettent de fournir 61 % de l'eau chaude sanitaire nécessaire.

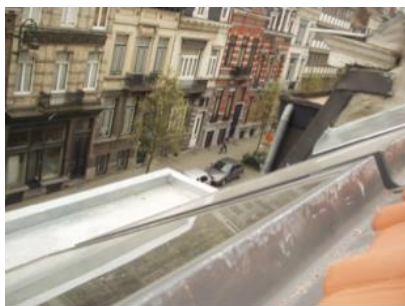


Figure 58 - Intégration des panneaux dans la toiture
(Marc Van der Stricht Architecte, 2010)



Figure 59 - Vue de la toiture depuis la rue
(Marc Van der Stricht Architecte, 2010)

⁴ « Pourcentage du temps d'occupation du bâtiment sur une année durant lequel la température intérieure est supérieure à 25 °C. Le pourcentage de surchauffe dans un bâtiment passif doit être inférieur ou égal à 5 %. » (pmp, 2013)

⁵ « Le test « Blower Door » permet de mesurer le débit de fuite d'air d'un bâtiment pour un différence de pression de 50 Pa. Ce débit de fuite permet de mesurer le taux d'infiltration d'air sous une différence de 50 Pa. Cette valeur ne doit pas dépasser $0,6 \text{ h}^{-1}$ pour un bâtiment passif. » (pmp, 2013)

$\eta_{50} = V_{50}/V_{\text{int}}$ avec V_{int} volume d'air net ventilé du bâtiment (m^3)
 η_{50} taux de renouvellement d'air du volume protégé (h^{-1})
 V_{50} débit de fuite d'air (m^3/h)

2.2.3 ENVIRONNEMENT

EAU DE PLUIE

Une citerne à eau de pluie de 3 m³ installée dans la cave permet de récolter l'eau de pluie afin d'alimenter les WC et de fournir l'eau nécessaire pour la lessive et le jardinage.

GESTION DES DECHETS

Les matériaux de chantier ont été recyclés, notamment grâce à la récupération de l'isolant qui a servi à isoler la salle à manger.

La mise en place d'un compost, constituant un critère pour l'appel à projets « Bâtiments exemplaires », a également été installé dans le jardin.

MATERIAUX

Lors de la rénovation, des matériaux écologiques ont été privilégiés : bois FSC, PEFC, peintures BIOFIN et isolants écologiques tels que la cellulose et les fibres de bois.

2.3 ECONOMIES

Les besoins nets de chauffage après la rénovation s'élèvent à 44 kWh/m².an contre 180 kWh/m².an avant rénovation, ce qui représente une diminution de consommation d'environ 75 %. A titre de comparaison, la moyenne bruxelloise s'élève à 106 kWh/m².an.

Les coûts totaux de la rénovation énergétique s'élèvent à 55.034 € (cf. Annexe 5). Cependant, les propriétaires ont bénéficié de plusieurs primes, notamment des primes régionales « Basse énergie », de déductions fiscales et de la prime « Bâtiments exemplaires ». Il faut savoir que les déductions fiscales n'existent plus depuis 2013, à l'exception de l'isolation de la toiture et que les primes pour les Bâtiments Exemplaires se font sur base d'une candidature.

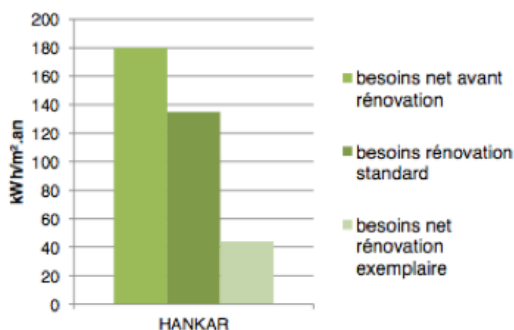


Figure 60 - Besoins nets de chauffage (Fruchart, 2011)

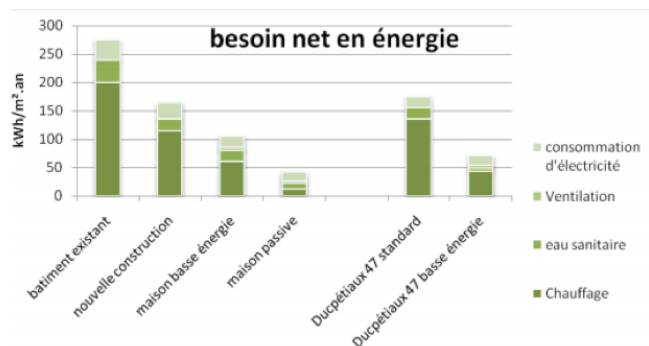


Figure 61 - Besoins nets en énergie (Fruchart, 2011)

3 ANCIEN MOULIN DE L'ABBAYE DE GRANDPRE | GESVES (B)

Les informations relatives à ce bâtiment proviennent de différentes sources telles qu'une présentation dans un recueil de rénovations (Breuls, et al., 2014), la fiche descriptive dans le cadre du projet ERFIN (R.E.D, 2013), des échanges de mails avec les propriétaires (Coppens, 2014), une rencontre avec M. Coupez (Coupez, 2014) ainsi que les documents fournis par le bureau (Bureau Coupez et Associés, 2011).

3.1 PRESENTATION DU BATIMENT ETUDIE

3.1.1 FICHE D'IDENTITE



Figure 62 - Bâtiment (a) avant rénovation - (b) après rénovation
(Bureau Coupez et Associés, 2011)

Localisation	Rue de l'Abbaye, 4 à Faulx-les-Tombes (Gesves)
Programme	Réhabilitation d'un ancien moulin d'abbaye en logement, cabinet médical et 2 gîtes ruraux
Typologie	Ancien moulin d'une abbaye cistercienne
Reconnaissance patrimoniale	Façades et toitures classées en 1992
Période de construction	XVII ^e siècle
Année de rénovation	2011-2012
Superficie	725 m ²
Maître d'ouvrage	M. et Mme Coppens
Maître d'oeuvre	Bureau Coupez et Associés Architectes

3.1.2 CONTEXTE HISTORIQUE ET GEOGRAPHIQUE



Figure 63 – Implantation
(Bureau Coupez et Associés, 2011)

L'abbaye cistercienne de Grandpré, située à Faulx-les-Tombes dans la province de Namur est fondée en 1231. Elle est construite le long de la rivière Samson et comporte plusieurs bâtiments dont il ne subsiste actuellement que le portail d'entrée, les bâtiments de la ferme, l'ancien moulin, qui sont classés et un logis de deux niveaux. Les alentours sont classés comme site depuis 1989. Nous nous intéresserons ici uniquement à l'ancien moulin. Celui-ci, dont les premières traces datent de 1673 et 1685 a subi de nombreux remaniements au cours des siècles. Il se compose d'un bâtiment principal en forme de L en moellons de grès et de calcaire et comporte quelques baies dont certaines ont été percées au XX^e siècle. Le bâtiment était auparavant occupé en partie par un cabinet médical et une habitation unifamiliale. Le reste du bâtiment était à l'abandon. (Wikipedia, 2014)

3.1.3 PROGRAMME DE LA RENOVATION

Les propriétaires avaient plusieurs souhaits dans cette rénovation:

- **Conserver le patrimoine**

Les façades et toitures sont classées en tant que monument et le moulin fait partie d'un site classé et Natura 2000.

- **Améliorer les performances énergétiques du bâtiment**

Cela peut être possible grâce à une amélioration de l'enveloppe et à la mise en place de nouveaux systèmes tels que des panneaux solaires, une chaudière à pellets, ...

- **Utiliser un système d'ossature bois**

Un tel système, interne à la façade permet en effet de conserver la façade actuelle tout en améliorant les performances du bâtiment.

Au vu de la superficie relativement importante du bâtiment, il a été décidé avec l'architecte de réhabiliter cet ancien moulin en un logement unifamilial, un cabinet médical à l'usage des propriétaires ainsi que de 2 gîtes ruraux, un pouvant accueillir jusqu'à 4 personnes et totalement accessible aux personnes à mobilité réduite et un autre, à l'étage, pouvant héberger de 6 à 8 personnes. Ceux-ci sont entrés en fonction en avril 2014.

La structure principale a été conservée tandis que les niveaux et le partitionnement intérieur ont été modifiés. Les murs existants mesurent, selon les endroits, entre 40 et 80 cm d'épaisseur et sont constitués de moellons en grès et en calcaire remplis d'un mélange instable de chaux et de blocage.



Figure 64 - Coupes longitudinale et transversale

Jaune : Habitation principale – Vert et turquoise : Gîtes – Bleu :
Cabinet médical
(Bureau Coupez et Associés, 2011)



Figure 65 - Plan du rez-de-chaussée

Jaune : Habitation principale – Vert et turquoise : Gîtes – Bleu : Cabinet
médical
(Bureau Coupez et Associés, 2011)

3.2 TECHNIQUES DE RENOVATION

3.2.1 ENVELOPPE

FAÇADES

▪ Habitation principale

Dans la partie habitation, il a été décidé de construire une nouvelle façade intérieure autoportante afin de permettre la conservation des façades classées tout en améliorant les performances énergétiques du bâtiment, selon les souhaits émis par les propriétaires (cf. Programme de la rénovation). Cette façade intérieure est constituée de caissons en ossature métallique remplis de panneaux de laine de verre de 10 cm d'épaisseur et recouverts par des plaques de plâtre. Une coulisse entre le mur de moellon et les caissons permet de récolter les condensats qui pourraient apparaître à cet endroit et de les évacuer, à l'aide de buses, vers le réseau d'égouttage. Cette coulisse, d'environ 3 cm d'épaisseur, est ventilée grâce à des grillages en façade. L'ancienne façade devient donc un parement et on retrouve en quelque sorte le schéma classique d'un mur avec coulisse ventilée. Cette solution a été possible grâce à l'importance des volumes intérieurs et à l'absence de divisions horizontales. Elle permet également de rattraper les différences d'épaisseur des murs de façade.

Le mur de refend entre le gîte et l'habitation principale a été disqué sur ses extrémités afin supprimer le pont thermique qu'il constituait dans la façade. Je n'ai cependant pas de détails de cette intervention.

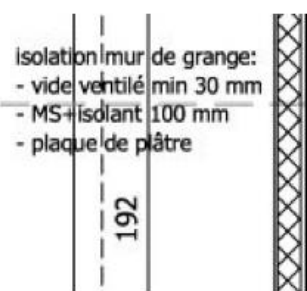


Figure 66 - Coupe dans l'habitation
(Bureau Coupez et Associés, 2011)



Figure 67 - Coupe dans l'annexe
(Bureau Coupez et Associés, 2011)

▪ Gîte

Les murs du gîte n'ont pas été isolés car celui-ci est utilisé de manière discontinue. Leur isolation n'est pas intéressante au niveau de la rentabilité économique des interventions énergétiques.

▪ Annexe

Le rez-de-chaussée de l'annexe, abritant la cuisine, est semi-enterré et isolé par l'intérieur avec 5 cm de liège et 9 cm de blocs silico-calcaire collés afin de tenir compte de la présence d'humidité dans les murs.

TOITURE

L'entièreté de la toiture a été refaite à l'exception de la charpente d'origine qui a été conservée et renforcée. La nouvelle couverture est réalisée en ardoises naturelles et une nouvelle sous-toiture en panneau de fibres de bois, perméable à la vapeur d'eau a été mise en place. L'espace entre pannes a été isolé avec une épaisseur d'ouate de cellulose insufflée variant entre 18 à 26 cm. Un freine-vapeur et des plaques de plâtre viennent compléter l'ensemble. Le clocheton a également été restauré.



Figure 68 - Rénovation de la toiture
(Bureau Coupez et Associés, 2011)



Figure 69 – Toiture restaurée
(Bureau Coupez et Associés, 2011)

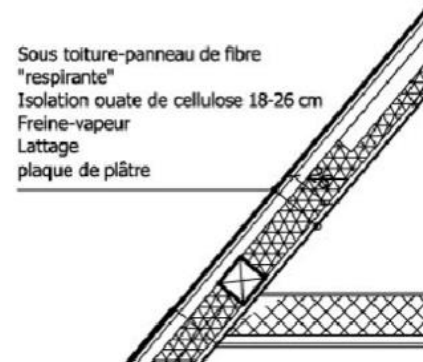


Figure 70 - Détail de la toiture
(Bureau Coupez et Associés, 2011)

DALLE DE SOL ET PLANCHERS

Une couche de polyuréthane de 5 cm a été projetée sur le sol existant. Le niveau du sol a été rehaussé de 30 cm à certains endroits. (cf. Figure 72)

Les nouveaux planchers intermédiaires sont réalisés avec un gîtage de 23 cm rempli de cellulose insufflée puis recouvert d'OSB. (cf. Figure 71)

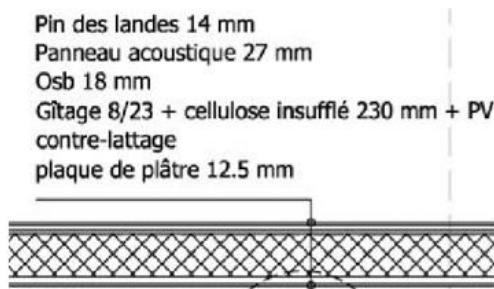


Figure 71 - Détail d'un nouveau plancher intermédiaire
(Bureau Coupez et Associés, 2011)



Figure 72 - Détail de la nouvelle dalle de sol
(Bureau Coupez et Associés, 2011)

CHASSIS ET PORTES

Dans la partie grange, trois châssis métalliques arrondis (cf. Figure 74) ont été restaurés et doublés à l'intérieur par de nouveaux châssis métalliques.

Dans l'aile cuisine/salle-à-manger, trois châssis en bois en simple vitrage ont également été doublés (cf. Figure 73). D'après les propriétaires, de la condensation apparaît de manière très exceptionnelle entre les deux châssis et n'altère pas le confort.

Les autres châssis en bois ont été remplacés par des nouveaux châssis en bois avec double vitrage.



Figure 73 - Double châssis
(Bureau Coupez et Associés, 2011)



Figure 74 - Châssis métallique
(Bureau Coupez et Associés, 2011)

Malgré les baies existantes, l'éclairage n'était pas suffisant dans tout le bâtiment à cause de l'ancienne fonction du bâtiment (moulin). Le percement de nouvelles baies était donc nécessaire dans la paroi sud afin de garantir un confort optimal aux occupants. Ces nouvelles baies se différencient des existantes grâce à un traitement particulier, réalisé à l'aide d'un cadre en acier Corten. Un soin particulier a été mené lors de la création de ces baies, notamment à cause de l'instabilité du remplissage des murs d'origine.

En ce qui concerne les portes, les portes principales n'étaient pas en état d'être conservées et ont été remplacées par un vitrage avec un volet en bois intérieur.



**Figure 75 - Façades Sud et Est
(Bureau Coupez et Associés, 2011)**



**Figure 76 - Nouvelles baies
(Bureau Coupez et Associés, 2011)**

3.2.2 SYSTEMES

CHAUFFAGE

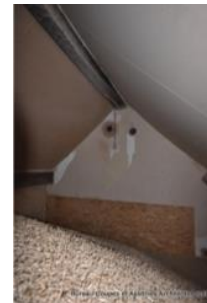
Une chaudière à pellets de 35 kW se situe dans l'annexe, au-dessus de la cuisine afin de pouvoir y stocker les pellets. Pour ce faire, le plancher a dû être renforcé par une poutre afin de supporter le poids des pellets. Un poêle à pellets a également été installé pour servir de système d'appoint.

EAU CHAUDE SANITAIRE

L'eau chaude sanitaire est assurée par 7,5 m² de panneaux solaires thermiques situé sur la toiture de cette même annexe. Deux ballons de stockage de 500 l dans l'annexe viennent compléter l'ensemble.



**Figure 77 - Toiture de l'annexe
(Bureau Coupez et Associés, 2011)**



**Figure 78 - Stockage des pellets
(Bureau Coupez et Associés, 2011)**

Ce cas de panneaux solaires thermiques sur la toiture d'un bâtiment classé est rare en Région Wallonne. En effet, il est toléré dans certains cas la pose de panneaux sur des toitures classées pour autant que ces interventions soient les plus discrètes possible. Dans le cas de l'ancien moulin de Gesves, les panneaux ont été installés sur le versant sud de l'annexe du bâtiment, invisible depuis la rue. Le type de panneaux solaires thermiques choisis leur permet d'être dans le même plan de la toiture. Il a cependant fallu ajouter 10 cm de lattage/contre-lattage contre 5 cm habituellement pour pallier la différence entre la surface des panneaux et le plan de toiture.

VENTILATION ET ETANCHEITE A L'AIR

La ventilation de l'entièreté du bâtiment est assurée par deux systèmes de ventilation double flux avec récupération de chaleur de 150 m³/h, un pour la partie gîte et l'autre pour la partie habitation. Des tests d'étanchéité à l'air n'ont pas été effectués.

3.2.3 ENVIRONNEMENT

MATERIAUX

Des matériaux écologiques ont été utilisés lors de la rénovation : enduits à l'argile, plâtre et mortier souple à base de chaux, ossature de bois avec ouate de cellulose et laine de bois.

EAU

Un système de lagunage sec a été mis en place le long du bâtiment. Il permet de traiter les eaux usées sans odeur et d'ensuite les rejeter dans le Samson, qui fait partie d'une zone Natura 2000.

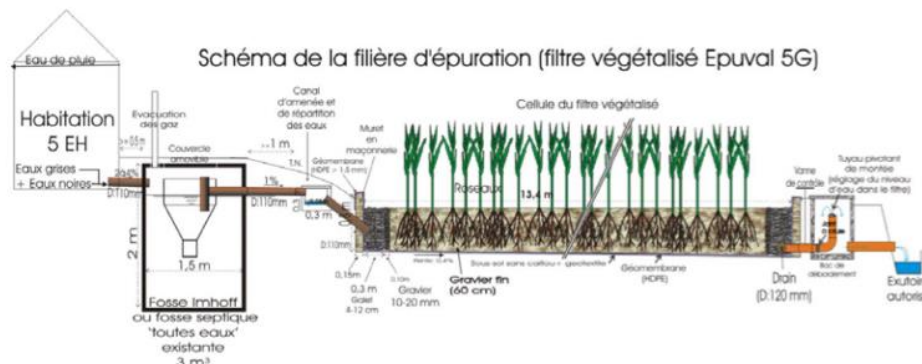


Figure 79 - Schéma de la filière d'épuration (filtre végétalisé Epuval 5G)
(Asbl Epuvaleau)

3.3 ECONOMIES

Après des calculs réalisés par le bureau d'architecture, une première estimation des besoins nets en énergie de chauffage a été évaluée à 28,5 kWh/m².an et le bâtiment présente un niveau d'isolation thermique K42. De plus, les propriétaires sont très satisfaits du confort.

4 IMMEUBLE À APPARTEMENTS | ANGLEUR (B)

Les informations relatives à ce bâtiment proviennent de différentes sources telles que le dossier de presse du projet fourni par le bureau AW Architectes (AW Architectes, 2010), le document de présentation au ministère (AW Architectes, 2013) et la fiche descriptive développée dans le cadre du projet ERFIN (R.E.D, 2013)

4.1 PRESENTATION DU BATIMENT ETUDIE

4.1.1 FICHE D'IDENTITE



Figure 80 - Façade Ouest (a) avant rénovation - (b) après rénovation
(AW Architectes, 2013)

Localisation	Rue du Vallon, 1, 4031 Angleur
Programme	Rénovation énergétique de l'immeuble et remise aux normes de confort
Typologie	Immeuble de logements sociaux dessiné par le groupe Egau
Reconnaissance patrimoniale	Inscrit à l'inventaire du patrimoine monumental
Période de construction	1959
Année de rénovation	2012-2015
Superficie	Environ 20.000m ²
Maître d'ouvrage	Le Logis Social de Liège
Maître d'œuvre	AW architectes sprl
Budget	9,7 millions d'euros HTVA et hors études

4.1.2 CONTEXTE HISTORIQUE ET GEOGRAPHIQUE

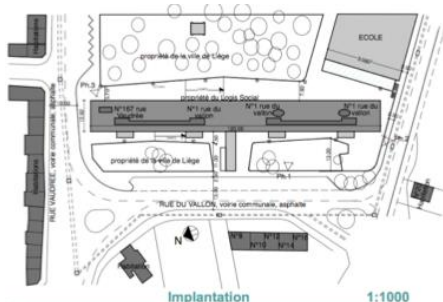


Figure 81 - Plan d'implantation
(AW Architectes, 2013)

Cet immeuble, situé en plein centre d'Angleur, fait partie d'un ensemble de 3 immeubles du même type construits sur 2,2 hectares et se base sur le modèle de la cité radieuse de Le Corbusier. Il fut construit en 1959 par les architectes Carlier, Lhoest et Mozin du groupe liégeois EGAU à la demande de la Société Coopérative des Maisons à Bon Marché du Canton de Grivegnée pour y loger une partie des 3000 ouvriers travaillant sur le nouveau complexe ferroviaire de Kinkempois. Face aux besoins économiques et sociaux de l'époque, une construction à étages s'est imposée de manière à rentabiliser au mieux les mètres carrés disponibles au sol, à la fois pour diminuer le coût du terrain par unité de logement mais aussi pour aménager des espaces verts et de détente au sol. (Dewez, et al., 2004)

4.1.3 PROGRAMME DE LA RENOVATION

Le bâtiment est un parallépipède rectangle de 120 m sur 12 m répartis sur 13 étages qui comprennent 211 appartements sociaux. La structure d'origine est en béton armé et les façades sont construites à partir de trois modules préfabriqués en béton également. La toiture d'origine comprend 5 cm d'isolant rigide, qui est la seule isolation dans le bâtiment. Quatre chaudières au gaz permettent d'alimenter un chauffage central distribuant chaque appartement. Les menuiseries sont en bois et munies d'un simple vitrage. L'immeuble est donc un véritable gouffre énergétique.

Lors de cette rénovation, le maître d'ouvrage souhaitait d'une part, remettre le bâtiment aux normes actuelles de confort et d'autre part, améliorer ses performances énergétiques à la fois à l'échelle du bâtiment et des appartements. La rénovation s'effectue en 8 phases, correspondant aux 8 demi-cages d'escaliers, qui permettent aux locataires de rester dans leur appartement. La fin du chantier est prévue pour 2014. Au niveau des accès, les cages d'escaliers ont été individualisées afin de ramener le bâtiment à une échelle plus humaine pour plus de sécurité.

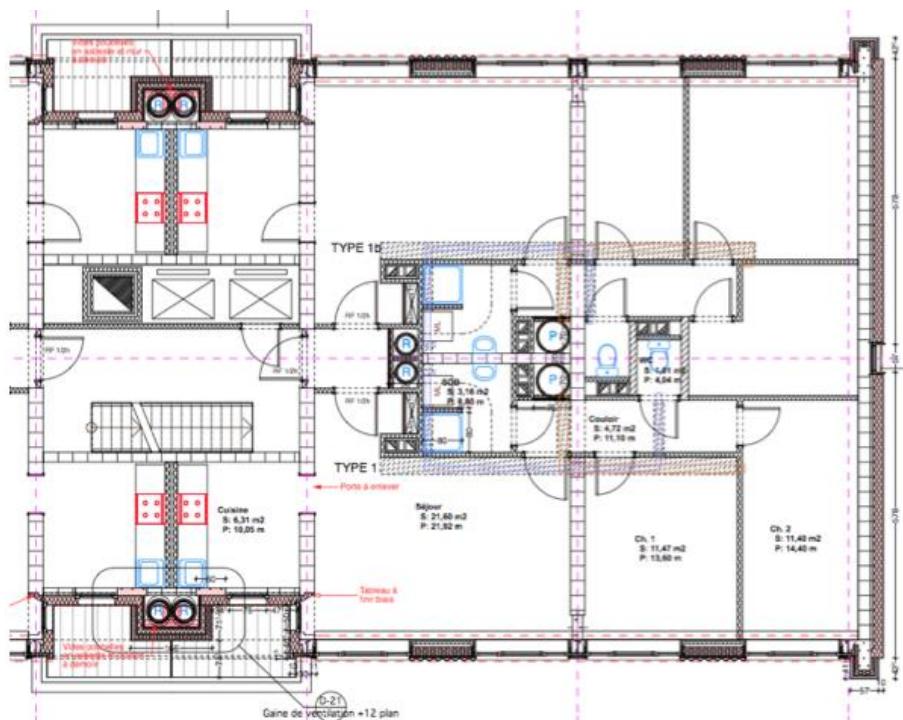


Figure 82 - Plan de deux appartements (AW Architectes, 2013)

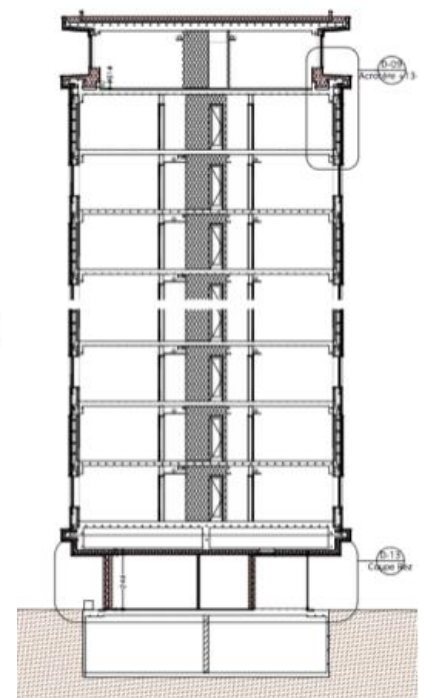


Figure 83 - Coupe transversale (AW Architectes, 2013)

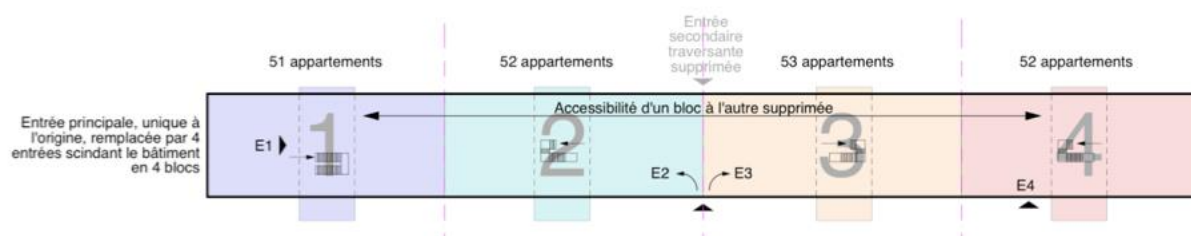


Figure 84 - Schéma des circulations au rez-de-chaussée (AW Architectes, 2013)

4.2 TECHNIQUES DE RENOVATION

4.2.1 ENVELOPPE

FAÇADES

Un des défis majeurs dans cette rénovation était la suppression des nombreux ponts thermiques tout en respectant le caractère patrimonial du bâtiment et le budget assez limité du maître d'ouvrage (environ 450 €/m²). La solution retenue pour l'isolation des façades est une nouvelle peau qui englobe les façades principales du bâtiment existant. Cette peau respecte l'aspect initial du bâtiment en maintenant la trame existante grâce à l'utilisation de matériaux différents tels que des panneaux de bardage en fibre-ciment et des panneaux de façade ondulés fabriqués à base de résines et de fibre de bois.

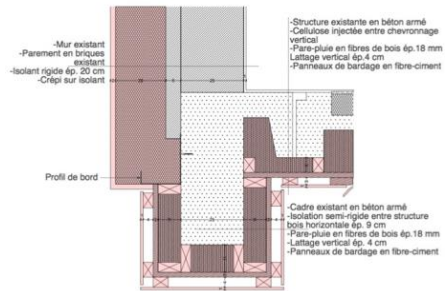


Figure 85 - Détail en plan de l'isolation de la bande périphérique (AW Architectes, 2013)

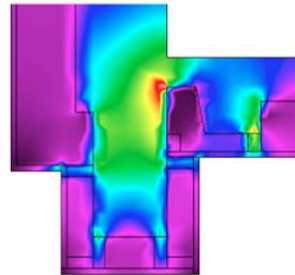


Figure 86 - Flux de chaleur (AW Architectes, 2013)

▪ Façades principales

Cette nouvelle peau est composée d'une structure de bois en poutres en I remplies d'une couche de 20 cm de cellulose insufflée, recouverte par un pare-pluie en fibres de bois et un bardage en fibres de ciment. Pour éliminer au mieux les ponts thermiques, les balcons ont été transformés en jardins d'hiver. Les nouvelles allèges des balcons sont également en ossature remplie avec 10 cm d'isolant puis recouvertes d'un crépi isolant de 10 cm.

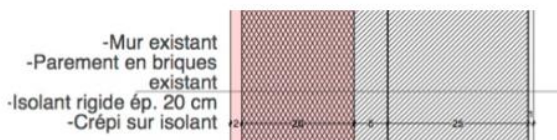


Figure 87 - Détail de l'isolation de la petite façade (AW Architectes, 2013)

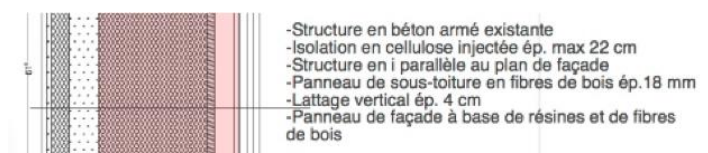


Figure 88 - Détail de l'isolation des grandes façades (AW Architectes, 2013)

▪ Petites façades

Les petites façades, étant presque aveugles, ont été revêtues par l'extérieur de 20 cm d'isolant rigide.



Figure 89 - (a) Nouvelle peau extérieure en caisson de bois - (b) Isolation des petites façades - (c) Façade en cours de rénovation (AW Architectes, 2013)

▪ Cas particulier : Rez-de-chaussée

Le rez-de-chaussée se compose à la fois de locaux non chauffés et extérieurs et d'appartements. Seuls les appartements ont été isolés en façade avec 16 cm de laine de verre.

TOITURE

L'isolation en toiture existante a été renforcée par une couche supplémentaire de 20 cm de laine de roche qui emballa également les éléments en porte-à-faux. L'étanchéité d'origine, bien conservée est réutilisée comme pare-vapeur.

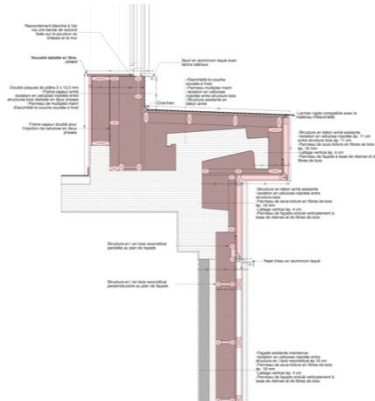


Figure 90 - Détail en coupe de l'isolation de l'acrotère (AW Architectes, 2013)

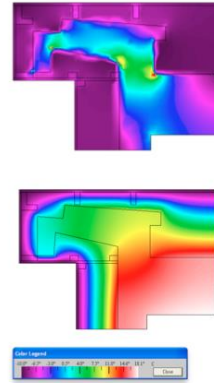


Figure 91 - Flux de chaleur et température des matériaux (AW Architectes, 2013)

DALLE DE SOL ET PLANCHERS

Une nouvelle chape sèche avec isolation rigide de 6 cm a été placée au-dessus de la chape d'origine. La dalle entre les espaces extérieurs ou non chauffés et les appartements au 1^{er} étage a été isolée grâce à une structure en bois et un bardage.



Figure 92 - Nouveaux châssis (AW Architectes, 2013)



Figure 93 - Isolation du plancher (AW Architectes, 2013)

CHASSIS

Les châssis d'origine ont été remplacés par des châssis PVC triple vitrage à l'exception des châssis des appartements du rez-de-chaussée qui ont été remplacés par des châssis en aluminium à coupures thermiques avec des doubles vitrages supers isolants.

4.2.2 SYSTEMES

CHAUFFAGE ET VENTILATION

D'une part, les quatre chaudières au gaz d'origine ont été supprimées et remplacées par une chaudière à pellets installée dans la cave. D'autre part, un système de ventilation double flux avec récupérateur de chaleur a également été installé pour chaque bloc.

Le nouveau système de chauffage se base sur cette ventilation double flux dont le débit de ventilation a dû être augmenté. En effet, l'air frais amené depuis l'extérieur est réchauffé une première fois par l'air vicié, extrait depuis les locaux humides, via un échangeur. Il est ensuite chauffé de manière complémentaire par la chaudière à pellets puis amené à la température souhaitée dans les locaux secs. L'air ainsi réchauffé atteint une température de 18°C dans tous les appartements en plein hiver. Les occupants peuvent augmenter la température en utilisant des compléments électriques. Ce nouveau système a permis d'économiser environ 1,5 millions d'euros.

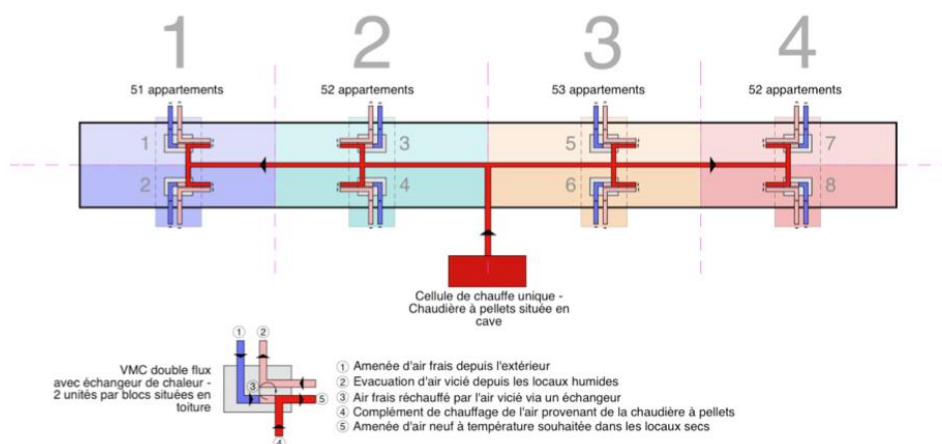


Figure 94 - Fonctionnement du système de chauffage
(AW Architectes, 2013)

ETANCHEITE A L'AIR

L'étanchéité à l'air a été particulièrement soignée. En effet, elle joue un double rôle : augmenter le confort des habitants et contrôler la ventilation, ce qui a un impact positif sur les dépenses énergétiques. Des rubans en polyéthylène ont été posés sur le pourtour de l'encadrement des fenêtres avant leur pose. Les deux bouts du ruban ont ensuite été collés de façon étanche afin d'assurer une étanchéité parfaite entre le châssis et les murs périphériques.

Des tests Blower Door ont été réalisés et ont permis de mettre en avant des problèmes de mise en œuvre et des défauts d'étanchéité. Le bâtiment atteint finalement une étanchéité de 1 renouvellement d'air par heure contre 6,7 auparavant.

ELECTRICITE

Chaque luminaire présent dans le bâtiment est muni d'un système d'éclairage économe en énergie et d'un capteur de lumière qui permet de régler l'intensité de la lumière artificielle en fonction de la lumière naturelle incidente. Les zones de passage sont en plus équipées de détecteurs de présence. Un plan lumière est également mis en place pour mettre en évidence certaines parties du bâtiment telles que les rampes, les cages d'escalier et les perrons d'entrée. L'électricité nécessaire à l'éclairage des communs et de la chaufferie est fournie par des panneaux photovoltaïques placés en toiture.

4.2.3 ENVIRONNEMENT

MATERIAUX

La majorité des matériaux utilisés lors de cette rénovation sont durables et avec une faible énergie grise : cellulose soufflée pour l'isolation, plâtre et fibres de cellulose pour les panneaux de finition, fibres de bois pour le pare-pluie et poutres de bois pour la structure des caissons.

4.3 ECONOMIES

Cette rénovation permet de remettre le bâtiment aux normes, de diminuer les besoins énergétiques globaux du bâtiment, d'améliorer le confort des bâtiments et de conserver l'aspect général du bâtiment. Une étude PHPP réalisée sur le bâtiment a montré que la rénovation permet de diviser les besoins en énergie du bâtiment par 12. En effet, les besoins de chaleur de chauffage annuel d'un appartement moyen s'élèvent théoriquement à 28,84 kWh/m².an contre 359,66 kWh/m².an avant la rénovation. De plus, les émissions totales annuelles de CO₂ d'un appartement passent de 135,48 kg/m².an à 92 kg/m².an, induisant à l'échelle du bâtiment, une réduction de plus de 96 % de ces émissions. Les chiffres des consommations réelles ne peuvent encore être calculés car cela ne fait pas encore un an que les premiers habitants ont réintégré leur logement.

Types d'appartement	Appart moyen rénové	Appart moyen existant	Améliorations	Unités	En %
Nombre	1,00	1,00		Pce	
SRE	67,34	67,34		m2	
Besoins de chaleur de chauffage annuel	28,84	359,66	-330,82	kWh/(m2a)	-91,98%
Taux d'étanchéité à l'air	1,00	6,70	-5,70	h-1	-85,07%
Puissance de chauffe	15,31	106,89	-91,58	W / m²	-85,68%
Besoins EP Fluides	53,25	581,33	-528,08	kWh/(m2a)	-90,84%
Total besoins EP Fluides globaux	3 722,43	39 982,35	-36 259,92	kWh/a	-90,84%
Besoins EP eco par photovoltaïque	0,98	0,00	0,98	kWh/(m2a)	
Total besoins EP eco par photovoltaïque	68,75	0,00	68,75	kWh/a	
Emissions totales équivalents CO ²	13,92	135,48	-121,56	Kg/(m²a)	-89,73%
Emissions totales équivalents CO ²	937,10	9 115,39	-8 178,29	Kg/a	-89,72%
Co ² économisés par photovoltaïques	0,21	0,00	0,21	Kg/(m²a)	
Total Co ² économisés par photovoltaïques	14,19	0,00	14,19	Kg/a	
Puissance de chauffe nécessaire	1 031,46	7 196,57	-6 165,11	W	-85,67%
Consommation totale en EP Bâtiment Complet	714 705,83	Kwh/a	-117 695 324,90	Kwh/a	
Emissions totales en Equivalent CO ² Bâtiment complet	899 615,97	T/a	-26 092,83	T/a	-96,67%
Plus de 10x mieux isolés					
Etanchéité à l'air plus de 6,5x meilleur					
Emission de carbone diminuée de près de 97 %, économie de 26092 T de co2/an					

Légende

- SRE Surface de référence énergétique
- EP Fluides Consommation avec les pertes de tous les appareils produisant de la chaleur ramenée en énergie primaire

Tableau 6 – Economies
(AW Architectes, 2013)

4.4 AUTRES : ASPECT SOCIAL

La rénovation de ce bâtiment a été un défi. En effet, c'est un nouveau type de rénovation du patrimoine récent, à l'opposé des bâtiments anciens datant des derniers siècles. Beaucoup de questions se sont posées : « Comment respecter le caractère historique du bâtiment ? », « Comment donner une meilleure image à ce type de bâtiment souvent dénigré ? », « Quelles sont les techniques à utiliser lors de la rénovation ? », « Comment les habitants vont-ils vivre la rénovation ? ». Une des caractéristiques de ce projet réside donc dans son aspect social. En effet, le propriétaire a fait le choix de conserver le bâtiment et non pas de le détruire, malgré la mauvaise réputation de ce type de logements afin d'améliorer le confort des occupants, attachés à leur logement et à leur quartier. De plus, lors de la rénovation, les habitants ont été informés du déroulement des travaux et ils ont bénéficié d'une aide pour se reloger le temps du chantier. Lorsqu'ils réintégreront leurs appartements, ils bénéficieront d'une formation pour apprendre à utiliser leur nouveau logement de façon adéquate. Enfin, un écrivain écrira avec la participation des habitants, un texte qui sera visible sur le bâtiment de manière à permettre aux habitants de s'approprier leur nouvel espace.

5 BUREAUX DU CPAS| FOREST (B)

Les informations relatives à ce bâtiment proviennent de différentes sources telles que le dossier de presse du projet fourni par le bureau d'architecture A2M (A2M, 2010), une présentation de M. Moreno-Vacca du bureau d'architecture A2M (Moreno-Vacca, 2011), l'info fiche « Bâtiments exemplaires 2008 » (Bruxelles Environnement, 2010), la revue be.passive (Cohen, 2011), la fiche descriptive développée dans le cadre du projet ERFIN (R.E.D, 2013) ainsi qu'une présentation dans le cadre d'un « séminaire bâtiment durable ». (Willem, 2013)

5.1 PRESENTATION DU BATIMENT ETUDIE

5.1.1 FICHE D'IDENTITE



Figure 95 - Façade Sud(a) avant rénovation - (b) après rénovation (A2M, 2010)

Localisation	Rue Vanpé, 50 - 1190 Forest (B)
Programme	Rénovation et réhabilitation énergétique d'un immeuble de bureaux
Typologie	Immeuble mitoyen de style Art Déco
Reconnaissance patrimoniale	Zone de protection de l'abbaye de Forest
Reconnaissance énergétique	Très basse énergie - Bâtiment exemplaire 2008
Période de construction	1934
Année de rénovation	2008-2011
Superficie	1017 m ²
Maître d'ouvrage	Centre public d'aide sociale de Forest
Maître d'œuvre	A2M sc sprl
Bureau d'études	MATRIciel
Budget	1 466 329 € HTVA
Coûts de construction	1575 €/m ² (sans primes) ou 1441 €/m ² (avec primes)

5.1.2 CONTEXTE HISTORIQUE ET GEOGRAPHIQUE

Cet immeuble de style Art Déco, construit en 1934, se trouve dans la zone de protection de l'abbaye de Forest. Situé au coin de la rue de Liège et de la rue Vanpé, il présente deux grandes façades en briques ornées de modénatures sculptées en pierre. A l'origine, les espaces intérieurs sont répartis sur deux niveaux et un sous-sol. Malgré les nombreuses transformations du bâtiment, le granito d'origine au sol et dans la cage d'escalier principale est conservé, ce qui en fait sa particularité.

Au fil du temps, l'environnement urbain a considérablement changé, notamment avec la construction de hauts bâtiments adjacents qui ont peu à peu écrasé l'immeuble.

En 2007, le bâtiment est dans un état lamentable, pratiquement inutilisable et ne remplissait plus les normes de sécurité et de confort. Quelques bureaux subsistaient encore grâce à la présence d'une énorme chaudière au mazout. En plus de la présence d'amiante, les châssis à l'arrière et trois des grands châssis à rue en menuiserie finement travaillée ont été remplacés par des châssis PVC.

Le CPAS de Forest a donc profité de l'appel à projets de Bâtiments Exemplaires de la Région Bruxelloise pour rénover cet immeuble en bureaux, manquant cruellement dans la région. Les principales préoccupations de ce projet étaient d'atteindre de très bonnes performances énergétiques et environnementales, ainsi que de conserver le caractère historique du bâtiment par sa façade à rue et son escalier principal.



Figure 96 - Zone de protection (en trait rouge) de l'abbaye de Forest (en bleu) (A2M, 2010)



Figure 97 - Maintien du revêtement de sol en granito d'origine (A2M, 2010)

5.1.3 PROGRAMME DE LA RENOVATION

La structure d'origine a été conservée mais on observe une densification à la fois verticale et horizontale :

- Extension verticale car un étage en toiture a été ajouté dans un style contemporain, afin de contrebalancer l'effet de hauteur des bâtiments voisins. De plus, ce nouvel étage en ossature légère en bois permet d'augmenter le nombre de bureaux au sein du bâtiment. Au-dessus de cet étage supplémentaire, se trouve un nouveau petit volume également en bois abritant un local technique nécessaire pour le système de ventilation.
- Extension horizontale car le bâtiment s'agrandit également en cœur d'îlot. La cour intérieure est d'abord débarrassée des ajouts successifs au cours des années afin d'apporter plus de lumière aux espaces intérieurs. Ensuite, un jardin est creusé et une annexe est construite sur deux niveaux.

La façade ainsi que le plus possible d'éléments d'origine sont conservés, comme l'escalier qui a été mis en valeur grâce à une nouvelle baie d'angle. On retrouve au sous-sol les archives et dans l'annexe une grande salle polyvalente modulable, des sanitaires, une cuisine et des locaux techniques. Au rez-de-chaussée se situent la zone d'accueil et des bureaux et dans l'annexe se trouve une salle de réunion. Les deux premiers étages accueillent des bureaux.

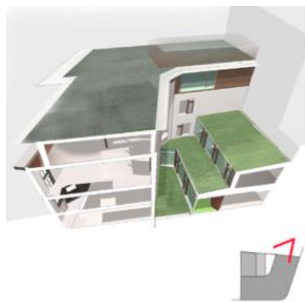


Figure 98 - Volumétrie en cœur d'îlot (A2M, 2010)

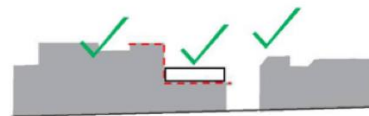


Figure 99 - Ajout d'un nouvel étage (A2M, 2010)

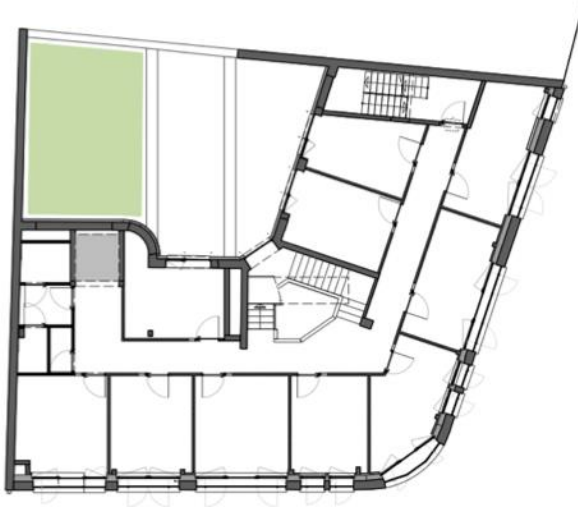


Figure 100 - Plan du premier étage
(A2M, 2010)

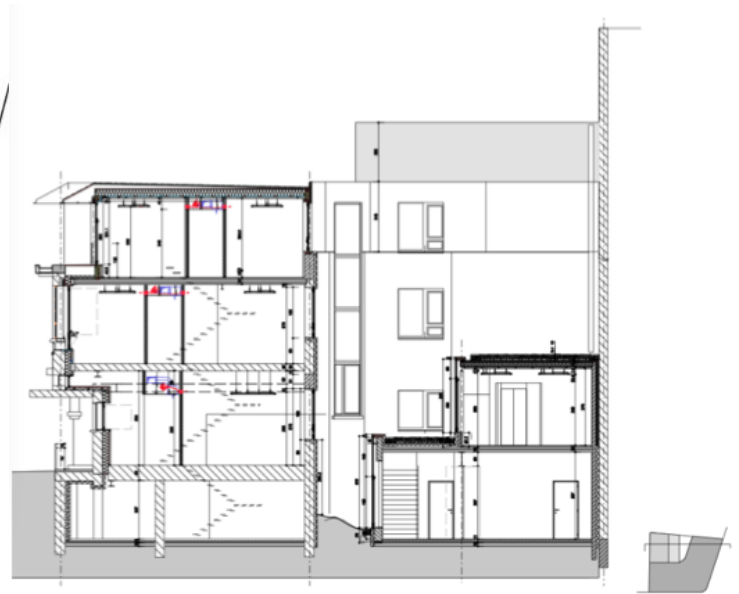


Figure 101 - Coupe transversale
(A2M, 2010)

5.2 TECHNIQUES DE RENOVATION

5.2.1 ENVELOPPE

FAÇADES

Afin de garantir un confort optimal aux occupants tout en réduisant les déperditions énergétiques et en supprimant les ponts thermiques, le bâtiment est doublé dans son épaisseur par une nouvelle couche d'isolation. Cette couche isolante continue passe derrière la façade à rue, englobe ensuite l'étage et l'annexe supplémentaires pour ensuite recouvrir par l'extérieur la façade arrière.

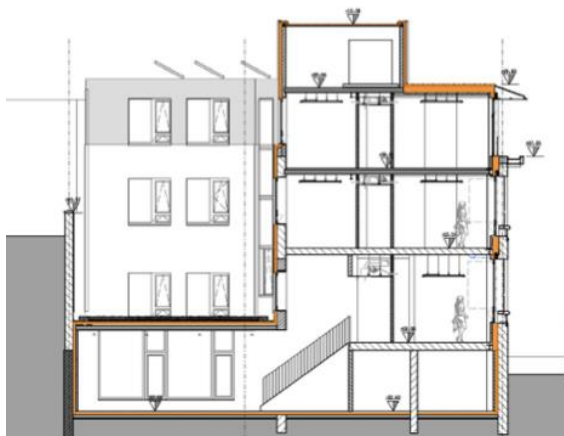


Figure 102 - Schéma de l'isolation continue
(A2M, 2010)

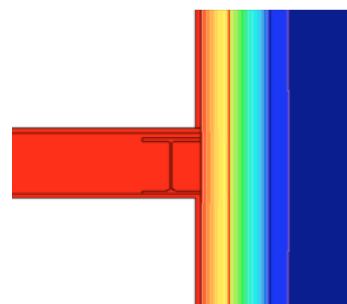


Figure 103 - Flux des températures
(A2M, 2010)

▪ Façade avant

Pour mettre en œuvre cette isolation continue, les dalles ont été découpées sur 20 cm à partir de la façade à rue et une nouvelle structure de type poutre colonne a été ajoutée à l'intérieur pour reprendre les charges des dalles. Une fois les encoches découpées dans la dalle en béton pour y accueillir les ancrages de la façade, la poutre et les ancrages sont placés. Ces derniers sont composés de tiges métalliques traversant la poutre et la façade et des plaques en inox permettent d'assurer la stabilité de la façade qui était désolidarisée du reste du bâtiment. Les cavités sont ensuite remplies de béton et les colonnes en béton armé sont coulées sur place. Finalement, la façade à rue a été doublée à l'intérieur par des caissons en OSB de 20 cm remplis de cellulose dans l'espace vide laissé par la découpe de la dalle. Afin de prévenir les risques d'accumulation d'humidité, la paroi a été étudiée et a finalement été hydrofugée. (cf. Les risques de l'isolation par l'intérieur, p. 20)

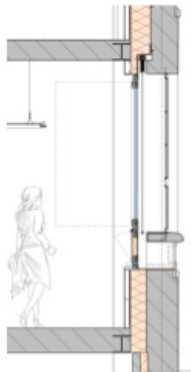


Figure 104 - Coupe dans la façade avant (A2M, 2010)



Figure 105 - (a) Découpe de la dalle – (b) Encoche de la dalle – (c) Mise en place des colonnes en béton armé – (d) Mise en place de l'ossature bois (A2M, 2010)

▪ Façade arrière

La façade arrière, ne présentant pas d'intérêt patrimonial particulier, a pu être isolée par l'extérieur avec des panneaux de polystyrène expansé de 10 cm d'épaisseur collés sur les briques existantes puis recouverts par un enduit extérieur blanc. Du côté intérieur, des plaques de plâtre sont vissées sur une ossature métallique type Metal Stud.



Figure 106 - Vue depuis la cour intérieure (A2M, 2010)

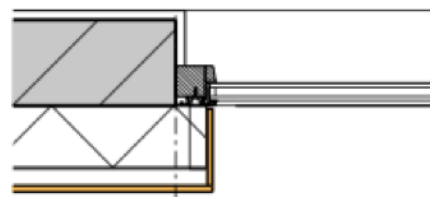


Figure 107 - Détail en plan de la façade arrière (A2M, 2010)

▪ Annexe en toiture

L'annexe a été construite en ossature légère en bois remplie de 15 cm de cellulose. Un panneau OSB de 22 mm est posé du côté intérieur et la finition intérieure est en plâtre posée sur une ossature métallique. Un pare pluie en fibre de bois de 18 mm est posé du côté extérieur. Une couche d'air sépare cette ossature du revêtement extérieur, composé de panneaux de Trespa (revêtement en résine thermodurcissable) en imitation bois.

TOITURE

La nouvelle toiture plate, au-dessus de l'étage supplémentaire, se compose, de l'extérieur vers l'intérieur de : une étanchéité, 5 cm de laine minérale, un panneau d'OSB, une isolation en cellulose de 23 cm entre gîtage 8/23 tous les 60 cm, un freine-vapeur, une double plaque de plâtre, un vide d'air et de nouveau une plaque de plâtre accrochée sur une ossature métallique.

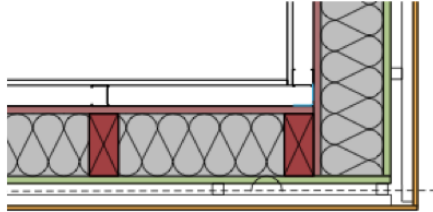


Figure 108 - Détail en plan de l'annexe
(A2M, 2010)



Figure 109 - Façades Sud et Ouest
(A2M, 2010)

DALLE DE SOL, PLANCHERS ET MURS ENTERRES

▪ Dalle de sol

8 cm de polyuréthane sont projetés sur la dalle existante.

▪ Murs enterrés

Le mur semi-enterré côté rue est isolé par l'intérieur avec 10 cm de polystyrène extrudé. Une nouvelle maçonnerie de 9 cm d'épaisseur est ensuite construite du côté intérieur de nouvelle maçonnerie. Le mur semi-enterré de l'autre côté, est situé contre le mur mitoyen. Il est isolé par l'intérieur avec du polystyrène expansé recouvert par des plaques de plâtre.

CHASSIS

Les châssis métalliques d'origine en simple vitrage ont été conservés afin de garder l'aspect d'origine de la façade. Pour améliorer les performances énergétiques du bâtiment, ils ont été doublés par l'intérieur avec de nouveaux châssis performants en double vitrage, installés dans l'alignement de l'isolation. Les châssis en PVC quant à eux n'étaient pas d'origine et ont été remplacés par de nouveaux châssis métalliques correspondant avec ceux des plans et doublés de la même manière que les châssis d'origine. Des protections solaires avec lamelles réglables automatiques sont installées, soit entre les deux vitrages pour le bâtiment d'origine, soit à l'extérieur pour l'annexe.

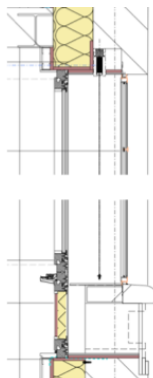


Figure 110 - Détail en coupe
du double châssis
(A2M, 2010)



Figure 111 - Double châssis
(A2M, 2010)

5.2.2 SYSTEMES

CHAUFFAGE

Une chaudière à condensation est installée au sous-sol.

VENTILATION

Un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur et rendement de 90 % est installé dans l'étage technique en toiture. Une simulation a permis de déterminer le nombre d'heures de surchauffe par an par zone du bâtiment. Les résultats détaillés en Annexe 6 montrent qu'une température supérieure à 25 °C est atteinte durant environ 1000 h par an et une température supérieure à 28 °C est atteinte environ 500 h par an. Les façades à rue Sud et Ouest sont les plus critiques. Un système de refroidissement passif était donc nécessaire pour garantir le confort des occupants.. Celui-ci a été mis en place grâce à :

- La limitation des charges internes et externes via des protections solaires extérieures réglables, un éclairage efficace (sondes de présence et de niveau d'éclairage) et une bureautique à faible charge interne,
- Un système de night-cooling permettant de refroidir le bâtiment durant la nuit. En effet, l'air extérieur nocturne plus froid traverse d'abord les grilles d'origine en façade puis les parois opaques oscillantes en partie basse des fenêtres. Il refroidit ensuite l'air intérieur qui est extrait par la cage d'escalier et évacué via un lanterneau en toiture. L'ouverture des fenêtres (cf. Figure 112) est gérée par la GTC (Gestion des Techniques Centralisées) selon les différences de température entre l'intérieur et l'extérieur.

Finalement, les simulations montrent que la température intérieure est supérieure à 25 °C durant 45 h.

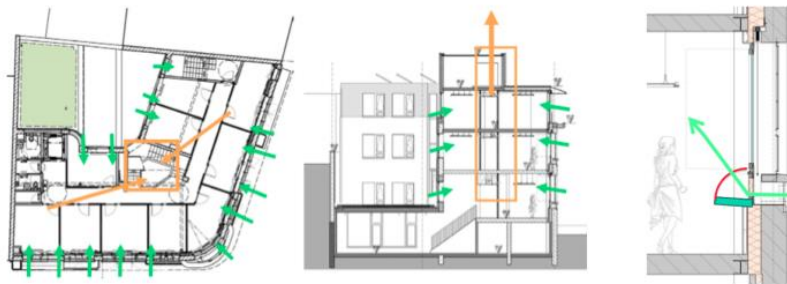


Figure 112 - Night-cooling
(A2M, 2010)

ÉTANCHEITÉ A L'AIR

Un test Blower Door a été effectué et a montré une étanchéité à l'air de 1,3 h⁻¹.

ELECTRICITÉ

Des panneaux photovoltaïques monocristallins ont été installés en toiture sur 30 m² afin de fournir une partie de l'électricité nécessaire au bon fonctionnement du bâtiment. De plus, les sondes de présence et de niveau d'éclairage permettent une économie d'électricité non négligeable.

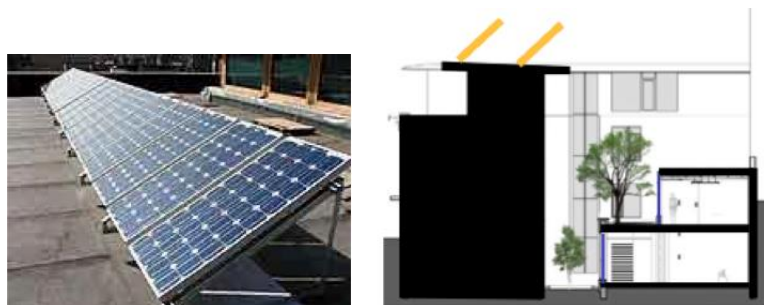


Figure 113 - Panneaux photovoltaïques
(A2M, 2010)

5.2.3 ENVIRONNEMENT

TOITURE VEGETALISEE

Les deux toitures en cœur d'îlot ont été végétalisées dont celle du premier étage de manière extensive. La cour intérieure est également végétalisée.



Figure 114 - Toitures végétales
(A2M, 2010)

EAU

Un réservoir d'eau de pluie de 3000 l a été installé pour répondre aux besoins d'eau pour les toilettes et les douches.

5.3 ECONOMIES

Les besoins nets de chauffage après rénovation ont été calculés d'après le logiciel PHPP et s'élèvent à 19 kWh/m².an en 2011, contre 335 kWh/m².an avant rénovation, en 1934. Cela représente une diminution des besoins de près de 94%. A titre de comparaison, la consommation moyenne d'un bâtiment ancien abritant des bureaux publics varie entre 100 et 220 kWh/m².an. (Architecture et Climat, 2013)

Le niveau global d'isolation est passé d'un niveau K147 à un niveau K22.

Le niveau de consommation d'énergie primaire, quant à lui, est passé d'un niveau E_w229 à un E_w50. A titre de comparaison, un bâtiment neuf abritant des bureaux et donc soumis à la réglementation PEB doit satisfaire à un niveau K35 et un niveau E_w80. (SPW, 2013)

Ces différentes améliorations permettent d'économiser 26.310 €/an.

5.4 AUTRES : UTILISATION DE LOGICIEL

L'isolation par l'intérieur peut engendrer des problèmes de refroidissement de la paroi et donc des accumulations de condensats qui risquent de dégrader la paroi. Une simulation dynamique hygrothermique a donc été menée afin de vérifier le comportement de la paroi, grâce au logiciel WUFI. Cette simulation a montré que le mur d'origine isolé par l'intérieur avec 20 cm de cellulose comporte des risques d'accumulation d'humidité entre le mur d'origine et les nouveaux caissons isolants. En effet, à cause de cette isolation intérieure et du niveau d'absorption élevé du mur de la façade, le mur s'humidifie et ne peut plus sécher. Cette humidité, conservée en surface, présente donc des risques de gels importants sur un an. Il a finalement été décidé d'appliquer un traitement hydrofuge sur la façade afin de la rendre imperméable et non absorbante à l'eau tout en conservant sa perméabilité à la vapeur d'eau.

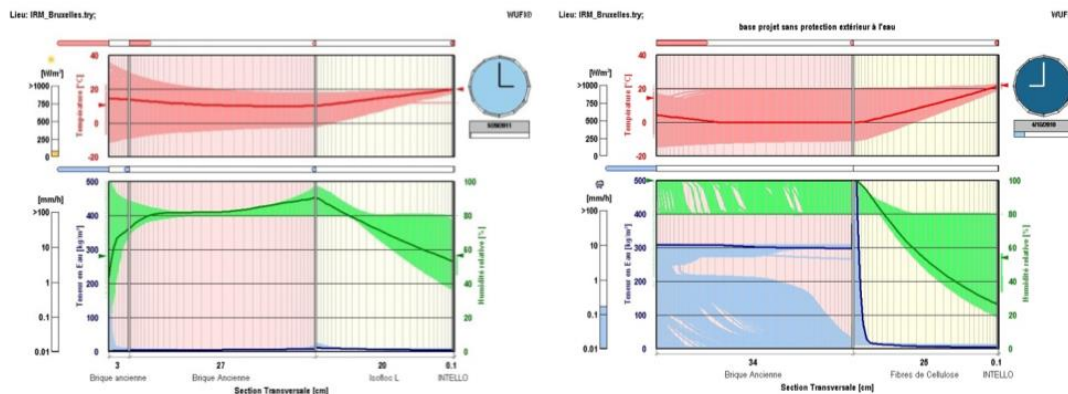


Figure 115 - Simulation de la paroi avec mur isolé par l'intérieur, sans et avec traitement hydrofuge
 Rouge : température [°C] - Bleu : teneur en eau [%] - Vert : humidité relative [kg/m³]
 (A2M, 2010)

6 MOULIN CASTRAL | HOLLOGNE-SUR-GEER (B)

Les informations relatives à ce bâtiment proviennent de différentes sources telles que la fiche descriptive dans le cadre du projet ERFIN (R.E.D, 2013), une rencontre avec M. Lorenzi (Lorenzi, 2014) ainsi que les documents fournis par le bureau (Lorenzi, 2006) et le site du propriétaire sur le moulin. (Lorenzi)

6.1 PRESENTATION DU BATIMENT ETUDIE

6.1.1 FICHE D'IDENTITE



Figure 116 - (a) Moulin à farine - (b) Moulin à drèche et corps de logis - (c) Intérieur du moulin à drèche (Lorenzi, 2006)

Localisation	Rue du Centre 27, Hollogne-sur-Geer (B)
Programme	Rénovation et réhabilitation énergétique d'un ancien moulin
Typologie	Moulin à eau
Reconnaissance patrimoniale	Classé comme monument en 1977 et site protégé
Période de construction	1646 pour le moulin à farine XVIII ^e siècle pour le moulin à drèche
Année de rénovation	2006-2011
Superficie	150 m ²
Maître d'ouvrage	Pierre Lorenzi
Maître d'œuvre	Pierre Lorenzi, architecte

6.1.2 CONTEXTE HISTORIQUE ET GEOGRAPHIQUE

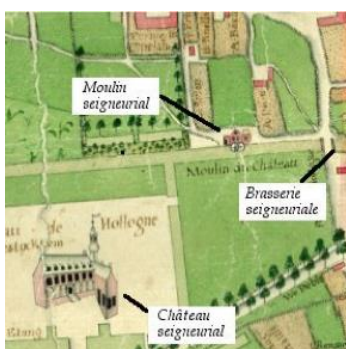


Figure 117 - Carte dressée par G. Leduc en 1801, arpenteur géomètre forestier (Lorenzi, 2006)

Le moulin à eau de Hollogne-sur-Geer, situé aux sources du Geer, en Hesbaye, fait partie d'un ensemble seigneurial comportant un château dont les premières traces datent des XI^e - XII^e siècles et disparu aujourd'hui et une brasserie datant de 1753 dont le pignon à rue est classé. Le site du moulin est composé d'un moulin à farine pourvu de deux paires de meules et de deux emplacements de roues à aubes, d'un moulin à drèche, d'un corps de logis et de bâtiments agricoles datant de 1878. Le moulin est classé ainsi que le site environnant. A l'origine, un barrage fut construit pour alimenter les douves du château médiéval. Afin de profiter de la force motrice de l'eau, un moulin fut ensuite érigé par le seigneur de Hollogne, Godefroid de Seraing en 1646. Un deuxième moulin, accolé au moulin à farine, fut construit au XVIII^e siècle et aurait eu pour fonction de moudre les résidus d'orge de la brasserie toute proche pour alimenter le bétail. Le vannage et le barrage en amont de la roue permettaient de retenir l'eau du Geer pendant la nuit jusqu'à ce que le débit d'eau soit suffisant pour faire tourner la roue. Le moulin se composait à l'origine d'un niveau réparti sur trois travées mais il fut rehaussé d'un niveau et demi au début du XIX^e siècle.

Le moulin a cessé toute activité en 1948 à la suite de la destruction partielle du barrage-déversoir et le cours du Geer fut dévié. Les bâtiments furent toutefois utilisés comme ferme jusqu'en 2002.

Le soubassement et les chaînages d'angle sont en pierres calcaires et les murs, dont l'épaisseur varie entre 50 et 60 cm d'épaisseur, sont en briques.

6.1.3 PROGRAMME DE LA RENOVATION

Le bâtiment, lorsqu'il a été acheté par les propriétaires en 2003, était en très mauvais état. Le propriétaire, l'architecte Pierre Lorenzi, a entrepris des travaux de restauration du bâtiment et du mécanisme en 2006 et 2007 en donnant au moulin une nouvelle affectation qui permettrait d'exploiter au mieux les grands volumes et espaces intérieurs du moulin.

Les moulins ont été reconvertis au rez-de-chaussée et au premier étage en centre de séminaire et salles de fête, ce qui permet, selon le souhait des propriétaires, de transmettre au public le patrimoine architectural de la région. Cette nouvelle affectation permet de plus de respecter la volumétrie existante sans ajouter de cloisonnement et sans percer de nouvelles baies, ce qui aurait été nécessaire pour une habitation. Le deuxième étage est maintenant utilisé comme bureau pour le propriétaire.

Le corps de logis a gardé sa fonction d'habitation et est actuellement occupé par les propriétaires. Les anciens bâtiments agricoles seront transformés en gîtes ruraux basse énergie, dont un sera accessible aux PMR.

La production d'électricité verte a rapidement été considérée et la roue a recommencé à tourner en 2008 jusqu'en 2011. Le propriétaire a également l'intention de reconstruire les autres roues afin de rendre au bâtiment son aspect d'origine.

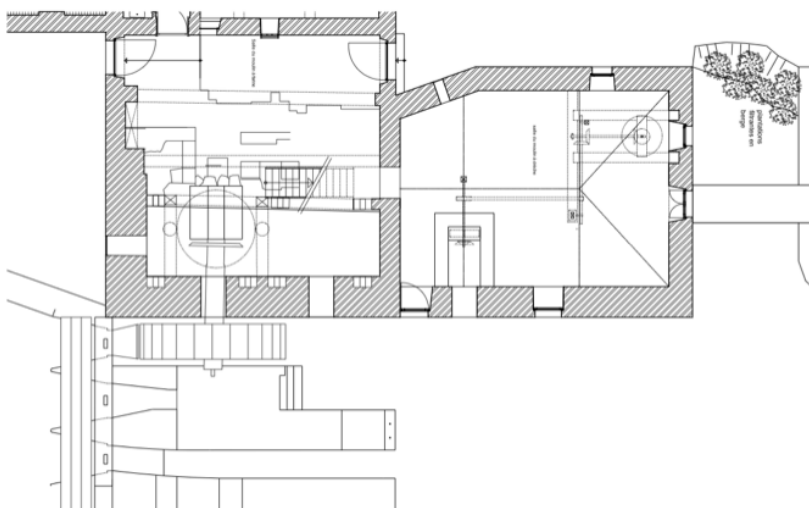


Figure 118 - Rez-de-chaussée du moulin à farine (gauche) et du moulin à drèche (droite)
(Lorenzi, 2006)

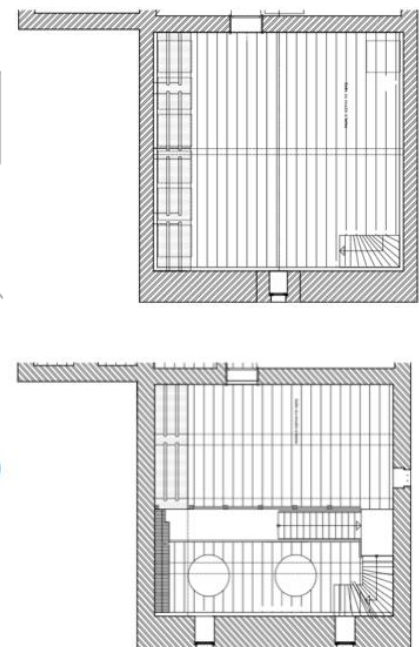


Figure 119 - 1er et 2e étages du moulin à farine
(Lorenzi, 2006)

6.2 TECHNIQUES DE RENOVATION

ENVELOPPE

Les murs du moulin et du corps de logis n'ont pas été isolés, selon le souhait du propriétaire. Les maçonneries intérieures et extérieures ont donc simplement été restaurées.



Figure 120 - Rez-de-chaussée et 1er étage du moulin à farine (Lorenzi, 2006)

La charpente du moulin d'origine est conservée. Un contre-chevonnage a été posé entre les pannes et l'ensemble a été isolé avec une épaisseur maximale de 14 cm de laine de verre au faîtage et de 30 cm au pied de versant de toiture. Un pare-vapeur est posé du côté chaud de l'isolant. Un isolant acoustique de 4 cm d'épaisseur avec un revêtement noir permettant de mettre en évidence les pannes est ensuite posé devant le pare-vapeur. Des ouvertures ont été créées sur toute la longueur du pan ouest. Les traces de l'ancien niveau de la toiture sont toujours visibles. Les anciens clous en bois utilisés pour solidariser les pannes et les chevrons sont rendus visibles. Le monte-sac est conservé.

La charpente du corps de logis, par contre, avait été remplacée et ne présentait pas d'intérêt visuel. Elle a été isolée avec 36 cm de laine de verre.

La couverture actuelle en tuiles avait été placée par l'ancien propriétaire. Il est prévu de les remplacer par des ardoises naturelles, comme c'était le cas à l'origine.

Il n'y a pas de sous-toiture dans la partie des moulins mais bien dans la partie du corps de logis. Celle-ci avait été mise en place par l'ancien propriétaire mais elle est actuellement en mauvais état et elle sera remplacée lors des travaux de la couverture.

La dalle de sol est isolée avec 8 cm de polyuréthane projeté et est recouverte par du carrelage, plus résistant au vu de la fonction du moulin.

Les châssis ont été remplacés par des châssis en bois double vitrage $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Le colombier a été restauré et un châssis en aluminium a été placé. Des châssis simple vitrage ont été placés dans les œillards qui ne sont pas utilisés. Une plaque de plexiglas a été placée autour de l'arbre en chêne de la roue en activité et tourne avec celle-ci. Des tentures devant les portes et des joints autour de celles-ci permettent d'améliorer l'étanchéité à l'air du bâtiment.



Figure 121 - Colombier (a) avant et (b) après restauration (Lorenzi, 2006)



Figure 122 - Roue et œillard (Lorenzi, 2006)

SYSTEMES

L'électricité nécessaire pour l'éclairage, les prises de courants et le chauffage était fournie par le moulin. Les câbles parcourant le bâtiment sont placés dans des gaines métalliques visibles et réversibles. Le rez-de-chaussée est équipé d'un chauffage par le sol et des radiateurs de récupération en fonte permettent de chauffer les étages supérieurs tout en servant de garde-corps.

6.3 AUTRES : PRODUCTION D'ELECTRICITE VERTE

RESTAURATION DU MECANISME

Afin de permettre la production d'électricité, une restauration du mécanisme et des roues était nécessaire. Le mécanisme et les roues à aubes en bois du XVII^e siècle ayant disparu - à l'exception de traces dans la maçonnerie et du vannage - c'est le mécanisme et la roue en métal actuels, datant du XIX^e siècle, qui ont été restaurés. Cette restauration s'est faite de telle façon à respecter l'aspect ancien du système : épaisseur de la tôle, même nombre de fixations, etc. Les pièces irrécupérables ont été retirées et remplacées par des pièces identiques à celles d'origine, notamment l'arbre en chêne et les augets.

Le vannage et le barrage-déversoir ont également été restaurés. Le générateur est placé en-dessous du mécanisme.



Figure 123 - Mécanisme du XIX^e siècle
(Lorenzi, 2006)



Figure 124 - Roue avant et après restauration
(Lorenzi, 2006)

NIVEAU DE L'EAU

Lorsque le moulin était en activité entre 2008 et 2011, le niveau d'eau était inférieur d'environ 60 cm à celui d'origine. La production d'électricité du moulin, dépendant de la hauteur de la chute d'eau, du débit et de la constance de celui-ci, n'atteignait alors qu'un quart de sa capacité, c'est-à-dire la consommation d'une habitation et demi.

D'après M. Lorenzi, une restauration à l'identique du niveau de l'eau d'origine aurait permis d'atteindre une puissance de 3 à 5 kW, ce qui correspond à la consommation électrique de 5 à 10 habitations et à 1 % de la consommation des ménages de la commune. Cela aurait permis de réduire de 4,5 tonnes les émissions de CO₂ tandis que le surplus de production aurait pu être injecté sur le réseau public.

ARRÊT DE L'ACTIVITE DU MOULIN

Le moulin a cessé toute activité en 2011 à cause de ce niveau d'eau trop faible qui endommageait le mécanisme du moulin. En effet, 37 augets sur les 40 ont dû être remplacés et l'axe de la roue commençait aussi à subir des dommages.

Il aurait été possible de surélever le niveau d'eau pour le restaurer à son niveau d'origine mais d'après la Province, le risque d'inondations en amont est trop important pour les habitations voisines et le réseau d'égouttage mis en place après l'arrêt du moulin en 1948.

7 REFUGE FORTIFIE | OMAL (B)

Les informations relatives à ce bâtiment proviennent de différentes sources telles qu'une présentation de M. Deruyver portant sur le Patrimoine et l'Energie (Deruyver, 2014), deux rencontres avec M. Petit du Bureau TRIO Architecture (Petit, 2014) ainsi que les documents fournis par le bureau (TRIO Architecture, 2014) et une étude menée par M. Evrard d'Architecture et Climat (Evrard, 2011).

7.1 PRESENTATION DU BATIMENT ETUDIE

7.1.1 FICHE D'IDENTITE



Figure 125 – (a) Façades nord-ouest/sud-ouest et sud-ouest/sud-est – (b) Intérieur (Evrard, 2011)

Localisation	Rue Jules Stienet, 43 – Geer (B)
Programme	Restauration, réaffectation et extension en logement unifamilial
Typologie	Refuge fortifié
Reconnaissance patrimoniale	Monument classé depuis 1947 et site classé depuis 1977
Période de construction	Environ 1625
Année de rénovation	2015
Superficie	122 m ²
Maître d'ouvrage	M. J. de Pierpont
Maître d'œuvre	TRIO Architecture

7.1.2 CONTEXTE HISTORIQUE ET GEOGRAPHIQUE

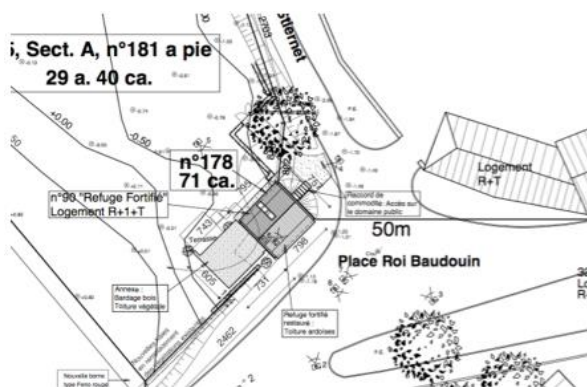


Figure 126 – Implantation (TRIO Architecture, 2014)

Cette tour-colombier fortifiée fut construite en 1625 par les époux Mollin-Menjoye à Omal, en Région Wallonne dans le but de protéger les villageois des bandits et des troupes passant sur la chaussée romaine toute proche. A proximité se trouvent le manoir d'Omali ainsi qu'une butte féodale qui sont également classés. A l'origine, une tour symétrique se trouvait en face du refuge actuel. Des traces d'une ancienne fonderie datant du XVIII^e -XIX^e siècle sont présentes. Le refuge fut utilisé comme fournil jusqu'au XX^e siècle avant d'être laissé à l'abandon. Un ancien four à pain subsiste encore au sud-est. La toiture s'est effondrée lors de la 2^e Guerre Mondiale et un des deux pignons a disparu lors d'une tempête. Une toiture temporaire couvre actuellement l'ensemble.

Les murs sont en briques maçonneries à la chaux et leur épaisseur varie selon les façades, d'environ 40 à 55 cm. Le soubassement, les encadrements des ouvertures et les chaînages d'angle sont en moellons de calcaire. L'étage des combles abrite sur chacune de ses façades un certain nombre de trous pour les pigeons. Le plancher entre le rez-de-chaussée et le premier étage est composé de voûsettes en briques supportées par des poutres en bois. On trouve encore dans les murs les traces de l'ancien voligeage et l'encastrement de l'escalier. (Mahiels)

7.1.3 PROGRAMME DE LA RENOVATION

L'ancien fournil, ne présentant pas d'intérêt historique, sera remplacé par une annexe horizontale en bois avec une toiture végétale, en contraste avec la tour verticale minérale. Le pignon manquant ainsi que le foyer seront reconstruits à l'identique en briques anciennes. Un hall, un séjour et une cuisine sont prévus au rez-de-chaussée du refuge tandis qu'un salon se trouve dans l'annexe. Au 1^{er} étage se trouvent une chambre et une salle de bain. Les combles pourront accueillir un bureau ou une nouvelle chambre.

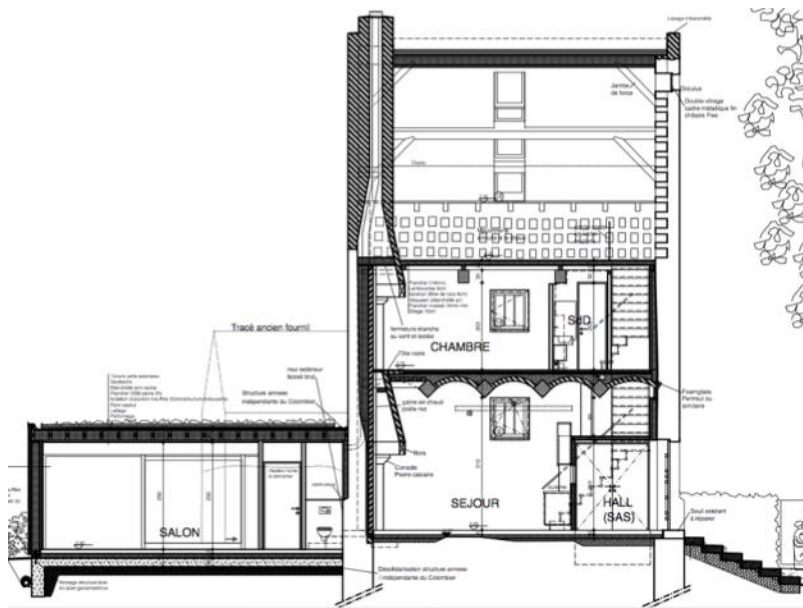


Figure 127 – Coupe longitudinale
(TRIO Architecture, 2014)

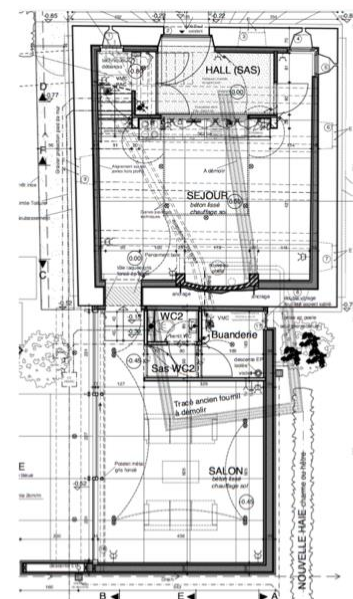


Figure 128 – Plan du RDC
(TRIO Architecture, 2014)

7.2 TECHNIQUES DE RENOVATION

7.2.1 ENVELOPPE

Les murs seront isolés par l'intérieur avec de la cellulose insufflée pour un meilleur contact avec le mur intérieur. Puisque les murs penchent légèrement vers l'intérieur et ont des épaisseurs fortement variables d'un point à l'autre du bâtiment, l'épaisseur de l'isolant sera donc aussi variable de sorte que le mur intérieur soit d'aplomb. L'épaisseur minimale de l'isolant sera de 6 cm au point le plus bas du mur afin de pouvoir insuffler correctement la cellulose. Un badigeonnage à la chaux sera placé sur la maçonnerie avec l'isolation afin d'améliorer l'accroche de l'isolant. Cette technique a l'avantage d'être réversible.

L'étage des combles ne sera par contre pas isolé afin de préserver les trous des pigeons.

La toiture sera isolée avec 12 cm entre les chevrons et recouverte d'ardoises naturelles. Des ouvertures en toiture seront créées.

La dalle de sol sera isolée avec 10 cm de polyuréthane. Les combles ne faisant pas partie du volume chauffé, le plancher entre ceux-ci et le 1^{er} étage sera isolé avec 8 cm de fibres de bois. De plus, les sommiers d'origine n'ayant pas une section suffisante, de nouveaux sommiers de 30 cm de section seront placés.

De nouveaux **châssis** métalliques en aluminium avec double vitrage seront placés dans la continuité de l'isolation intérieure afin d'éviter les ponts thermiques et de telle sorte que les montants ne soient pas visibles depuis l'extérieur. Certaines arquebusières seront rebouchées par manque d'espace pour l'installation d'un vitrage. Des barreaux en ferronnerie en denture, identiques à ceux d'origine, seront ajoutés aux endroits manquants, de même que les ancrs manquantes.

7.2.2 SYSTEMES

Une pompe à chaleur, un système de ventilation double flux ainsi qu'un poêle à bois seront installés. Le rez-de-chaussée et le 1^{er} étage seront chauffés par le sol.

7.3 UTILISATION DE LOGICIEL

Deux détails, dont un dans le soubassement en pierre calcaire (cf. Figure 129) et un dans la brique (cf. Figure 130), ont été étudiés par M. A. Evrard sur deux façades différentes, à l'aide du logiciel WUFI Pro, portant l'étude à un total de quatre détails. Les simulations permettent de déterminer le comportement hygrothermique de la paroi et d'évaluer le risque d'accumulation d'humidité et de condensation interne ainsi que le risque de dégradation des poutres en bois. Les simulations ont été menées sur 3 ans pour un climat intérieur de classe 2 et un climat extérieur correspondant au climat de référence belge. Les conditions initiales sont constantes soit 20 °C et 80 % d'humidité relative.

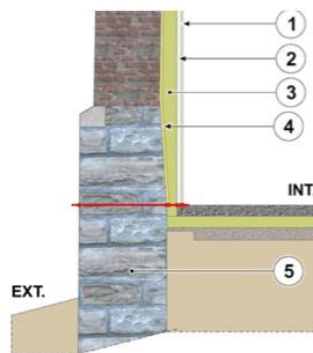


Figure 129 - Détail 2
(Evrard, 2011)

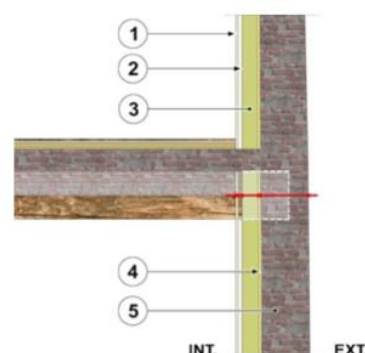


Figure 130 - Détail 3
(Evrard, 2011)

	Composition (mm)	Détail 1	Détail 3	Composition (mm)	Détail 2	Détail 4
		N-O	S-E		N-O	S-E
1	Enduit intérieur	12,5	12,5	Enduit intérieur	12,5	12,5
2	Couche d'air	35	35	Couche d'air	35	35
	Freine-vapeur	-	-	Freine-vapeur	-	-
3	Isolant	60	60	Isolant	170	10
4	Enduit à la chaux	20	20	Enduit à la chaux	20	20
5	Pierre calcaire	695	765	Brique	420	565
	U (W/m ² .K)	0,441	0,437		0,178	0,248

Tableau 7 - Composition des parois

7.3.1 ANALYSE DE BASE

L'évolution de la teneur en eau totale dans la paroi permet de voir si le comportement hygrothermique de la paroi est à l'équilibre ou si la paroi a tendance à se charger en humidité année après année.

Les détails 2 et 4 (dans la brique) montrent une stabilisation de la teneur en eau totale dans la paroi. (cf. Figure 131, détail 2)

Les détails 1 et 3 (dans le soubassement) montrent généralement une diminution ou une stabilisation de la teneur en eau au fil des années. (cf. Figure 131, détail 1) Cependant, quatre cas sur les dix-huit sont à rejeter car la teneur en eau continue à augmenter chaque année ce qui entraîne la saturation de la maçonnerie et peut engendrer un risque de dégradation de la paroi. (cf. Figure 131, détail 3) Ces différences entre les cas testés s'expliquent par les propriétés hygrothermiques encodées pour la pierre calcaire. Les cas à rejeter correspondent aux matériaux dont l'absorption d'eau liquide a été fixée sans modifier les autres paramètres hygrothermiques. Ces matériaux n'existent peut-être donc pas. De plus, l'évolution de la teneur en eau dans l'isolant et l'humidité relative à l'interface entre la maçonnerie et l'isolant ne présentent pas de valeur critique. Malgré cela, la composition de la paroi semble tout de même valide, même si les matériaux devraient être caractérisés de manière précise afin de vérifier le risque d'accumulation.

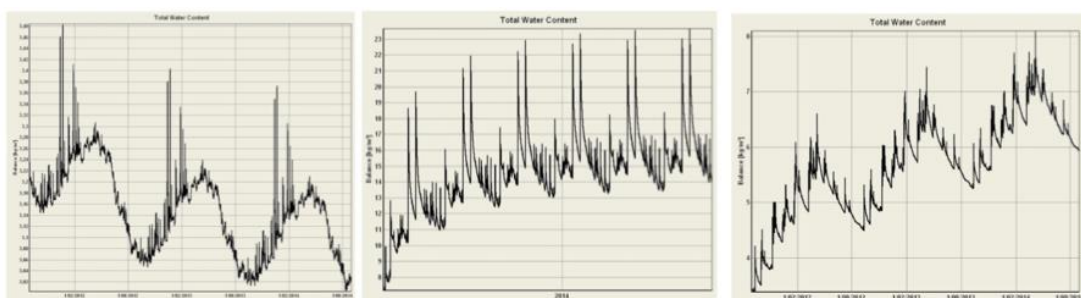


Figure 131 - Détails 1, 2 et 3: teneur en eau totale (Evrard, 2011)

L'évolution de la teneur en eau dans l'isolant permet de vérifier que la teneur en eau dans l'isolant est inférieure à certaines valeurs limites qui pourraient entraîner sa dégradation, telles que 20 % en masse pour le bois, 18 % pour les panneaux OSB et 30% pour la cellulose insufflée. Tous les cas respectent cette limite.

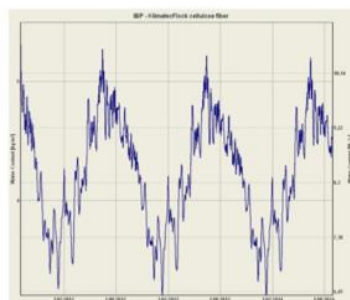


Figure 132 - Détail 1: teneur en eau de l'isolant (Evrard, 2011)

L'humidité relative à l'interface entre la maçonnerie et l'enduit de propreté ainsi qu'entre l'enduit et l'isolant permet de vérifier si un risque de condensation existe à ces interfaces. Les valeurs obtenues sont toujours inférieures à 95 % et il n'y a donc pas de risque de condensation.

7.3.2 ANALYSE COMPLEMENTAIRE

Il faut également vérifier que la structure en bois portant les voûsettes ne présente pas de risque de dégradation dû à une teneur en eau du bois trop importante. Pour ce faire, il faut vérifier que la teneur eau de la brique à un centimètre sous la surface de la brique ne dépasse pas 17 kg/m^3 dans les détails 2 et 4 (dans la brique).

Pour le détail 2 (dans la façade nord-ouest, plus critique pour les pluies battantes), les simulations montrent que les teneurs en eau sont largement supérieures à cette limite et le bois présente donc un risque important de dégradation (cf. Figure 133, au-dessus).

Pour le détail 4, dans la façade sud-est, les teneurs en eau sont également supérieures à la limite plusieurs mois par an et les poutres en bois présentent donc un léger risque de dégradation. (cf. Figure 133, en-dessous).

L'application d'un hydrofuge sur la surface extérieure de la brique est une solution pour limiter la teneur en eau de la brique à 15 kg/m^3 et de cette manière éviter la dégradation des poutres en bois.

Les architectes, préconisant une approche globale du bâtiment et une approche passive, ont finalement retenu la solution d'emballer les embouts de poutres avec du verre cellulaire afin d'éviter un échange d'humidité entre la maçonnerie et le bois. Cette solution est certes plus onéreuse mais constitue une mesure à plus long terme que l'hydrofugation.

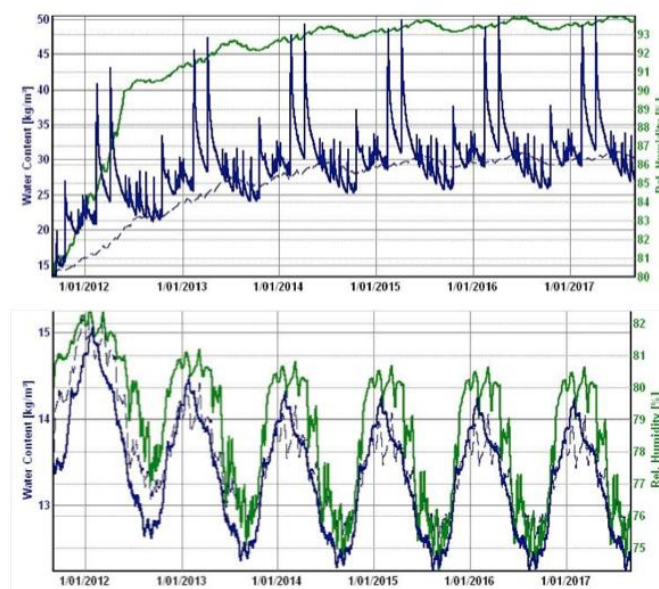


Figure 133 - Cas 2.1.A et cas 2.2.A : Evolution de l'humidité dans la brique du côté intérieur (Evrard, 2011)

7.4 AUTRES : COMPROMIS PATRIMOINE ET ENERGIE

Cet exemple illustre bien le compromis qui a été trouvé entre la conservation du patrimoine et l'amélioration énergétique du bâtiment.

D'une part, comme dit précédemment, les murs des combles ne seront pas isolés afin de préserver cette qualité patrimoniale conférée entre autres par les trous à pigeons situés dans les combles. Afin d'assurer un confort optimal aux occupants, la toiture et le plancher intermédiaire seront tout de même isolés.

D'autre part, des études archéologiques ont été menées afin d'étudier le bâtiment et de répertorier les différentes traces archéologiques : présence de l'ancien fournil, etc. C'est seulement après ces relevés archéologiques que l'intégration d'une annexe et la pose d'une isolation intérieure ont été décidées.

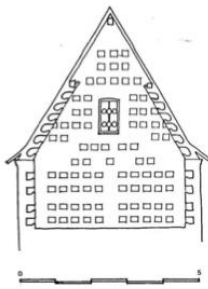


Figure 134 - Coupe des combles
(Deruyver, 2014)



Figure 135 - Traces (a) antérieures à la construction – (b) de l'ancienne fonderie – (c) de l'ancien fournil
(Deruyver, 2014)

8 CONCLUSION DE L'ANALYSE DE CAS

Les six cas présentés dans ce chapitre montrent qu'il est possible de concilier conservation du patrimoine et rénovation énergétique.

En effet, de façon générale, ils parviennent à :

- conserver la fonction d'origine ou l'adapter aux besoins de la société. C'est le principe de conservation intégrée, préconisée par la Charte Européenne pour le patrimoine architectural de 1975⁶ ;
- améliorer la performance énergétique du bâtiment, grâce à l'isolation de l'enveloppe et/ou l'amélioration des systèmes et parfois atteindre des standards énergétiques performants;
- conserver les caractéristiques patrimoniales du bâtiment telles que les châssis d'origine, les façades principales, etc.

De façon plus précise,

- **La maison Hankar à Bruxelles** montre que, malgré les contraintes urbanistiques en milieu urbain et les caractéristiques patrimoniales d'un bâtiment (sgraffites, moulures, etc.), il est possible d'améliorer de façon considérable ses performances énergétiques.
- **L'ancien moulin de l'abbaye de Grandpré** montre que dans le cas de certains bâtiments en milieu rural, il est possible d'intégrer une nouvelle façade intérieure afin de conserver l'aspect extérieur du bâtiment.
- La restauration de **la Résidence « Belle Jardinière » à Angleur** contrairement aux autres cas, consiste simplement à « emballer » par l'extérieur la façade d'origine avec une nouvelle couche d'isolation. Cet exemple semblait cependant intéressant à étudier en raison de l'époque de construction du bâtiment. En effet, les bâtiments des années 60 commencent peu à peu à être reconnus d'un point de vue patrimonial et leurs qualités ne doivent pas être négligées. A titre d'exemple, nous pouvons aussi citer la maison Mozin à Liège, de l'architecte éponyme, construite en 1963 et classée en 2011.
- La rénovation des **bureaux du CPAS à Forest** peut lancer un débat à propos de la façade principale qui perd tout rôle structurel et ne devient plus qu'une peau extérieure.
- **Le moulin castral d'Hollogne-sur-Geer** montre que l'amélioration de la performance énergétique du bâtiment peut, sans trop toucher à l'enveloppe, provenir de l'électricité fournie par la fonction même du bâtiment. Un autre exemple est l'abbaye de Fontevraud, située en France, dont un nouveau pôle énergétique construit à côté du bâtiment d'origine a permis de diviser la consommation d'énergie par deux et les émissions de gaz à effet de serre par 10, grâce à deux chaudières bois et à 92 panneaux photovoltaïques.
- La rénovation du **refuge fortifié d'Omal** montre le compromis qui peut être trouvé entre conservation du patrimoine et amélioration énergétique.

Les deux tableaux qui suivent montrent un résumé des techniques de rénovation utilisées ainsi que les valeurs des coefficients de transmission thermiques U des parois pour les quatre premiers cas de rénovation énergétique, pour lesquels la documentation était la plus précise. A titre de comparaison, les critères de certifications passive, très basse énergie et basse énergie ainsi que les exigences PEB actuelles se trouvent dans l'Annexe 1.

⁶ « La conservation intégrée est le résultat de l'action conjuguée des techniques de la restauration et de la recherche de fonctions appropriées » (Conseil de l'Europe, 1975)

ENVELOPPE									
CAS "CLASSIQUES"	Parois		Dalle de sol		Toiture			Châssis	
	Composition	U (W/m².K)	Composition	U (W/m².K)	Composition	U (W/m².K)	Autre	Composition	Composition
Maison Hankar	Maison Hankar								
Bâtiment basse énergie et Bâtiment exemplaire 2009	Façade avant : isolation par l'intérieur (2 cm de mortier isolant)	U = 1,01	Pas d'isolation	/	Toiture à versants : isolation combinée (23 cm d'ouate de cellulose)	U = 0,18	Nouvelle sous-toiture	Double châssis : bois DV	Remplacement châssis : bois TV
	Façade arrière : isolation par l'extérieur (12 cm de fibres de bois)	U = 0,25			Nouvelle toiture plate : 17 cm de cellulose + 8 cm de resol				
	Annexe : nouvelle structure en bois (15 cm de cellulose + 12 cm de fibres de bois)	U = 0,15			Abbaye Gesves				
Abbaye Gesves	Abbaye Gesves								
/	Bâtiment principal : isolation par l'intérieur (caissons avec 10 cm de laine de roche)	U=0,35	Isolation par le haut (5 cm de PUR projeté)	U = 0,51	Toiture à versants : isolation combinée (18-26 cm de cellulose)	U = 0,17	Nouvelle sous-toiture	Double châssis : métallique et bois DV	Remplacement châssis : bois DV
	Gîte : pas d'isolation	U = 1,87							
	Annexe : isolation par l'intérieur (5 cm de liège + 9 cm de blocs silico-calcaire collés)	U = 0,57			Immeuble à Angleur				
Immeuble à Angleur	Immeuble à Angleur								
/	Isolation par l'extérieur (structure en bois avec 20 cm de cellulose)	/	Isolation par le haut (6 cm)	/	Toiture plate : isolation par le haut (20 cm de laine de roche)	/	Conservation de l'étanchéité	Remplacement châssis : PVC TV	
	CPAS Forest								
	CPAS Forest	CPAS Forest							
Bâtiment très basse énergie et Bâtiment exemplaire 2008	Façade avant : isolation par l'intérieur (caisson OSB avec 20 cm de cellulose)	U = 0,14	Isolation par le haut (8 cm de PUR projeté)	U = 0,32	Nouvelle toiture plate : 10 cm de laine minérale + 23 cm de cellulose	U = 0,2	Nouvelle toiture plate	Double châssis : métallique DV	Remplacement châssis : métallique DV
	Façade arrière : isolation par l'extérieur (10 cm de XPS)	U = 0,26							
	Annexe : nouvelle structure en bois (15 cm de cellulose)	U = 0,18							

Tableau 8 - Comparatif des cas

Les valeurs des coefficients de transmission thermique en italique ont été calculées grâce au logiciel uparois.net

SYSTEMES		ENVIRONNEMENT		ECONOMIE	
Chauffage	Ventilation	Etanchéité à l'air n50 (h ⁻¹)	ECS	Besoins nets en chauffage (kWh/m ² .an)	
				Avant	Après
Maison Henlkar					
Chaudière à condensation 24 kW	Système D avec récupération de chaleur, rendement 88% By Pass estival et night cooling	1,5	4,7 m ² de panneaux solaires thermiques	180	44
Abbaye Gesves					
Chaudière à pellets 35 kW	2 systèmes D avec récupération de chaleur 150 m ³ /h	Pas de test effectué	7,5 m ² de panneaux solaires thermiques 2 ballons de stockage de 500l	/	28,5
Immeuble à Angleur					
Chaudière à pellets	Système D avec récupération de chaleur	1	Chaudière à pellets	360	29
CPAS Forest					
Chaudière à condensation 24 kW	Système D avec récupération de chaleur, rendement 90 % Nigh cooling	1,31	30 m ² de panneaux photovoltaïques Réservoir d'eau de pluie de 3 m ³	335	19

Tableau 9 - Comparatif des cas

METHODOLOGIE

Après avoir exposé les différentes techniques de rénovation actuelles et analysé divers exemples, cette troisième partie développe une proposition de méthodologie dans le cadre d'une rénovation énergétique d'un bâtiment à intérêt patrimonial résidentiel ou tertiaire en Régions Bruxelles-Capitale et Wallonne. Cette méthodologie s'adresse principalement à tout propriétaire de monument à intérêt patrimonial ainsi qu'à tout architecte en charge de travaux de restauration d'un monument à intérêt patrimonial.

Immanquablement, chaque cas de restauration de bâtiment est particulier ; l'époque de construction et la fonction du bâtiment, les matériaux et les systèmes constructifs utilisés, leur situation géographique, leur orientation et leur mitoyenneté ne sont que quelques exemples de facteurs qui varient d'un bâtiment à l'autre. Cette méthodologie n'a donc pas pour vocation d'être suivie à la lettre mais constitue un outil d'aide à la décision qui permettrait à tout propriétaire ou auteur de projet de poser les premières bases et les premiers choix en matière de rénovation énergétique d'un bâtiment à intérêt patrimonial.

Cet outil d'aide à la conception se concentre sur l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment et se présente sous la forme de quatre arborescences : toiture, sol, murs extérieurs et châssis. En effet, ce type de solution constitue la réponse la plus lisible et la plus compréhensible à la question posée. Pour chaque élément, il est expliqué, étape par étape, quel aspect étudier et quelles sont les questions à se poser afin de déterminer quelle solution sera la plus adaptée à sa configuration. Les réponses aux différentes questions permettent finalement d'arriver à une proposition de solution adéquate. Les différentes solutions qui peuvent apparaître en fin d'analyse sont expliquées en détail dans la troisième partie « Etat de l'art », avec leurs avantages, leurs inconvénients, leur mise en œuvre et les précautions à prendre.

L'amélioration des systèmes sous la forme d'arborescence n'est pas abordée dans ce chapitre. En effet, les différents choix d'amélioration ont été exposés dans la troisième partie de ce travail « Etat de l'art » et, au vu de la diversité des solutions et de la complexité de leur mise en place en fonction du contexte et de la configuration du bâtiment, il a été décidé de ne pas l'aborder sous forme d'arbre décisionnel.

Cet outil d'aide à la conception a été réalisé sur base de la littérature existante relative à la rénovation classique des bâtiments : le site Energie+ développé par Architecture et Climat de l'université de Louvain-la-Neuve, l'ouvrage « L'isolation thermique écologique » de J.-P. Oliva ainsi que le Guide Bâtiment Durable édité par Bruxelles Environnement. Les différentes recommandations et solutions préconisées par ces ouvrages ont ensuite été adaptées aux besoins et aux caractéristiques des bâtiments à intérêt patrimonial, sur base de l'état de l'art et de l'étude de cas réalisés dans les première et deuxième parties de ce travail ainsi que sur base d'autres exemples caractéristiques dont les conclusions n'ont pas été présentées ici.

Comme je l'ai dit, chaque arborescence correspond à une partie de l'enveloppe du bâtiment. Il va de soi que la restauration d'un bâtiment est une approche globale et qu'isoler uniquement une partie de l'enveloppe sans aucune considération pour le reste du bâtiment n'a pas de sens.

⁷ La « Fiche 3.2 : comparatif des systèmes de chauffage et ECS pour les maisons individuelles et les immeubles à appartements en conception passive et rénovation basse énergie », éditée par Bruxelles-Environnement présente quelques pistes de choix dans le cas d'une rénovation basse énergie d'une maison individuelle.

1 POURQUOI ISOLER ?

1.1 A L'ECHELLE DE LA BELGIQUE, FAUT-IL ISOLER ?

OUI

- Si on n'isole pas un bâtiment lors de sa restauration, son coût énergétique sera plus important et il sera peut-être plus difficile de trouver un investisseur pour lui donner une nouvelle affectation. Le manque de solution dans les réaffectations de bâtiments anciens risque, à terme, de vider les bâtiments de leurs occupants et, sans entretien, ceux-ci risquent de se dégrader plus rapidement.
- En plus des factures énergétiques importantes, l'inconfort des occupants est également important. (Deruyver, 2014) L'effet de paroi froide est supprimé, les températures de surface augmentent ce qui améliore le confort. (AUP, et al., 2010)

NON

- Si les propriétés hygrothermiques des murs ne sont pas étudiées, une isolation mal conçue et/ou mal mise en œuvre est dangereuse pour la survie du bâtiment et risque d'accélérer sa dégradation.
- La Région Wallonne et la Région de Bruxelles-Capitale comptent ensemble environ 1 500 000 bâtiments pour environ 3900 bâtiments classés, ce qui représente 0,26 % du parc immobilier. Le patrimoine représente donc une très petite part du bâti. (DMS; SPF Finances, 2013; Deruyver, 2014)

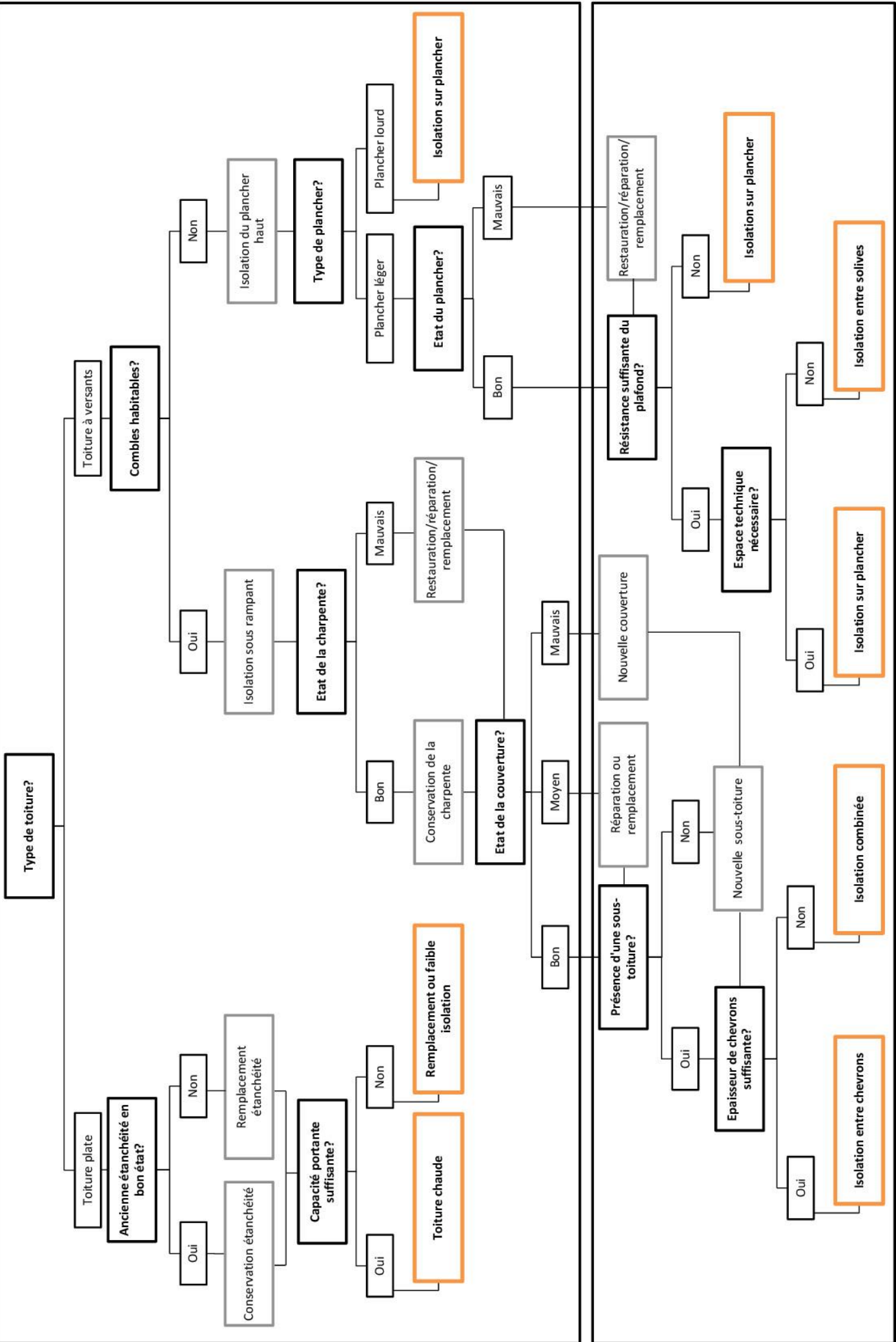
1.2 A L'ECHELLE DU BATIMENT, FAUT-IL ISOLER ?

Certains critères, cités ici de manière exhaustive, sont à prendre en compte lors de ce choix :

- la répartition des déperditions thermiques du bâtiment qui dépend de son environnement, de sa situation, de son contexte, ...
 - les caractéristiques patrimoniales extérieures ou intérieures,
 - l'espace disponible,
 - les contraintes réglementaires urbanistiques,
 - la mise en œuvre,
 - le coût,
 - les risques hygrothermiques.
- (Hygroba, 2013)

1. DIAGNOSTIC

2. CRITERES TECHNIQUES



2 COMMENT ISOLER ?

2.1 LA TOITURE

2.1.3 DIAGNOSTIC

La première étape consiste à établir un diagnostic de la toiture d'un point de vue de :

TPOLOGIE ET FONCTION DE LA TOITURE

De quel type est la toiture ?

- **Toiture à versants**
 - Quel est le système constructif utilisé ?
 - Pannes et chevrons
 - Fermes et chevrons
 - Les combles sont-ils aménagés ou le seront-ils dans le futur ? Si oui, quel est le type de plancher entre les combles et le volume chauffé ?
 - Plancher léger (ossature bois, etc.)
 - Plancher lourd (dalle de béton, etc.)
- **Toiture plate**
 - De quelle nature est le support ?
 - Dalle de béton
 - Éléments préfabriqués
 - Planchers en bois
 - Quels sont les matériaux qui la composent ?
 - La toiture a-t-elle été modifiée au cours du temps ? A-t-elle été isolée par après ?

ÉTAT SANITAIRE DE LA TOITURE

Après avoir identifié le type de toiture, sa fonction et sa composition, une évaluation de son état sanitaire est nécessaire. En cas de dégradations, les causes sont déterminées et corrigées. Les éléments détériorés sont ensuite restaurés, remplacés et/ou renforcés selon la gravité des dégradations. L'Annexe 7 présente les dégradations courantes d'une toiture en pente et d'une toiture plate ainsi que des pistes de solutions. Les questions à se poser pour établir son diagnostic sont différentes en fonction du type de toiture :

- **Toiture à versants avec combles habitables**

Lorsque les combles sont habitables ou le seront dans le futur, l'isolant est placé entre les rampants.

Etat de la charpente

- Certains éléments sont-ils dégradés par l'humidité (traces de pourriture, etc.)?
- Certains éléments sont-ils dégradés par des insectes (trous d'envol, etc.) ?
- Certains éléments sont-ils dégradés par des champignons ?
- La panne faitière est-elle droite et les versants sont-ils plans ?
- La charpente présente-t-elle des traces de réparations antérieures ?



Figure 136 – Dégradations de la charpente (CSTC, 2010)

Etat de la couverture

- La couverture est-elle toujours étanche à l'eau : pas de fuites lors de grosses pluies ou de dégâts dus à l'humidité, notamment aux abords des cheminées et des jonctions avec les maisons mitoyennes ?
- La couverture présente-t-elle des tuiles/ardoises cassées ou fissurées ?
- Quel est l'état des corniches ?

Si l'ensemble de la toiture est en trop mauvais état, l'entièreté de la couverture est remplacée. C'est alors l'occasion de placer une nouvelle sous-toiture.

- **Toiture à versants avec combles non habitables**

Si les combles ne sont pas habitables, l'isolant est placé soit sur le plancher ou soit entre les solives séparant les combles du volume chauffé, en fonction de la typologie du plancher.

Etat du plancher supérieur

- Certains éléments sont-ils dégradés par l'humidité (traces de pourriture, etc.) ?
- Certains éléments sont-ils dégradés par des insectes (trous d'envol, etc.) ?
- Certains éléments sont-ils dégradés par des champignons ?

- **Toiture plate**

Etat du support

- Le support présente-t-il-elle des traces d'humidité telles que des moisissures, des efflorescences ?
- La face inférieure du support présente-t-elle des dégradations telles que des fissurations, de la corrosion, des traces d'attaque d'insectes, des moisissures ou des tâches d'humidité ?
- La pente est-elle suffisante ?
- Le support présente-t-il une flèche anormale ?
- La membrane d'étanchéité est-elle en bon état et bien fixée sur le support ?
Si oui, elle peut être conservée et utilisée comme pare-vapeur afin de créer une toiture chaude. Sinon, elle sera remplacée par un nouveau pare-vapeur.

2.1.4 CRITERES TECHNIQUES

Des critères techniques permettent ensuite de déterminer de façon plus précise quelle technique d'isolation sera préférable.

- **Toiture à versants avec combles habitables**

Sous-toiture

- Y a-t-il une sous-toiture ?
- Si oui, est-elle en bon état et étanche à l'eau ?

La sous-toiture permet de protéger la toiture du vent et de la pluie et d'évacuer vers l'extérieur l'eau éventuelle infiltrée ou condensée. Généralement, les bâtiments anciens n'en présentent pas. L'enlèvement de la couverture est alors nécessaire afin de placer la une nouvelle sous-toiture. (cf. Toiture, p.8)

Epaisseur de chevrons

- L'épaisseur des chevrons permet-elle de poser une épaisseur suffisante d'un point de vue résistance thermique ?

Si oui, on procède à une **isolation entre chevrons**. Dans le cas contraire, une **isolation combinée** sera choisie, c'est-à-dire que l'isolant est placé à la fois entre les chevrons et les pannes, suivant l'épaisseur d'isolant recommandée.

- **Toiture à versants avec combles non habitables et plancher léger**

Résistance du plafond

- Le plafond peut-il supporter la surcharge engendrée par l'isolant ?

Si oui, une **isolation entre solives** est possible. Le besoin d'un espace technique déterminera la solution finalement retenue.

Espace technique

- Un espace technique entre le plafond et la structure est-il nécessaire afin d'y placer les techniques, des luminaires, etc.?

Si oui, une isolation sur plancher est possible. Si ce n'est pas le cas, une **isolation entre solives** est envisageable si, comme dit précédemment, le plafond est suffisant pour supporter la surcharge engendrée par l'isolant.

- **Toiture à versants avec combles non habitables et plancher lourd**

Résistance du plancher

- Le plancher peut-il supporter la surcharge engendrée par l'isolant ?

Dans le cas d'un plancher lourd type dalle de béton en bon état et pouvant supporter l'isolant, on procède à une **isolation sur plancher**.

- **Toiture plate**

Résistance du support

- La structure peut-elle supporter la surcharge engendrée par la pose de l'isolant et d'un éventuel lestage ?

Si la toiture était lestée à l'origine, le support est alors capable de supporter l'ancien ou un nouveau lestage qui le remplacerait. Dans le cas contraire, la capacité portante du support doit être vérifiée.

Finalement, si la capacité portante de la toiture est suffisante, l'isolant est posé sur le support d'origine afin de créer une **toiture chaude** avec lestage éventuel. Dans le cas où la capacité portante du support n'est pas suffisante, une épaisseur moindre d'isolation ou un remplacement total de la toiture peut être envisagée.

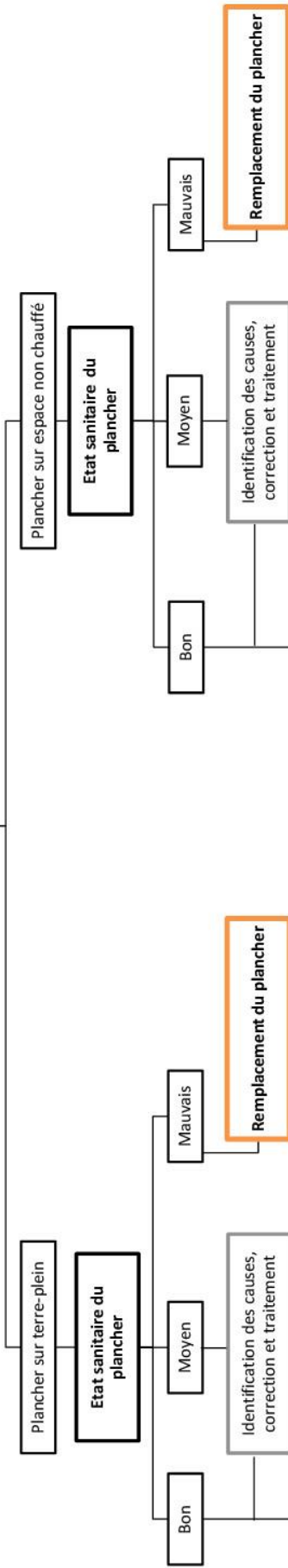
2.1.5 RECOMMANDATIONS

Certaines précautions sont à prendre par rapport à :

- Choix des isolants
- Raccords avec les murs extérieurs
- Pose du pare-vapeur côté intérieur

1. DIAGNOSTIC

Type d'espace sous-jacent?

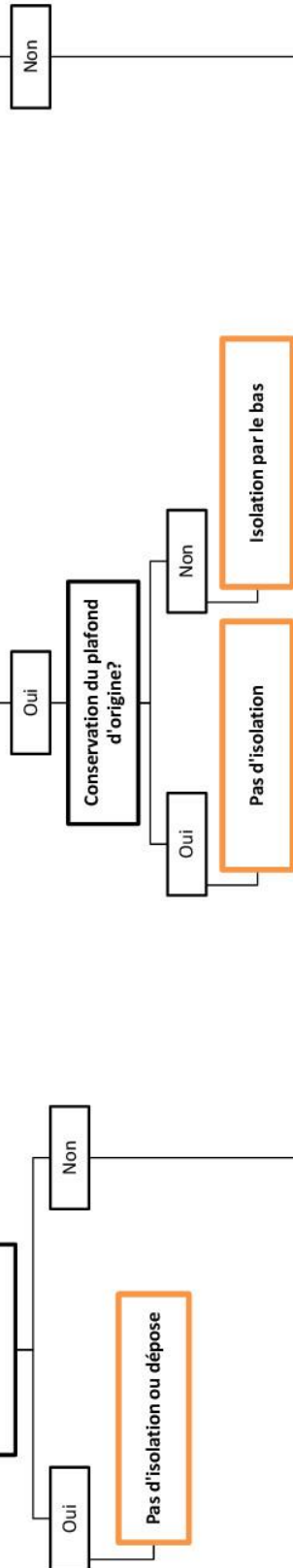


2. CRITERES PATRIMONIAUX

Conservation du plancher d'origine?

Conservation du plafond d'origine?

Qualité patrimoniale



3. CRITERES TECHNIQUES

Typologie

Surépaisseur du plancher possible?



2.2 SOL

2.2.1 DIAGNOSTIC

La première étape consiste à établir un diagnostic du sol en place d'un point de vue de :

TPOLOGIE DU SOL

Quel est le type d'espace sous-jacent ?

- **Plancher sur terre-plein**
 - Comment est constitué le sol ? S'agit-il d'une chape sur un fond de fouilles, sur remblais de cailloux ou tout venant ?
 - Le sol a-t-il été modifié au cours du temps ? Une membrane étanche a-t-elle été ajoutée ?
- **Plancher sur espace non chauffé**
 - De quoi est constitué le plancher ?
 - Plancher d'origine préindustriel : voûte ou structure bois avec poutres et solives
 - Plancher de transition : voûtain de briques sur poutrelles en acier ou solives en bois
 - Plancher d'origine industriel : dalle de béton pleine ou sur poutrelles et hourdis

ÉTAT SANITAIRE DU PLANCHER

- **Plancher sur terre-plein**
 - Le plancher d'origine peut-il être conservé entièrement ou en partie ?
 - Le sol présente-t-il des traces d'humidité telles que des moisissures, des efflorescences ?
 - Dans le cas d'un plancher en bois, le sol présente-t-il des dégradations dues aux insectes, champignons ?
- **Plancher sur espace non chauffé**
 - Le plancher d'origine peut-il être conservé entièrement ou en partie ?
 - Peut-il supporter l'ajout d'un isolant ?

En cas de dégradations du plancher, les causes seront déterminées et résolues. Les pièces dégradées seront ensuite restaurées, remplacées et/ou renforcées. Si le plancher d'origine est en trop mauvais état, il sera remplacé par un nouveau plancher.

2.2.2 CRITERES PATRIMONIAUX

Ensuite, la qualité patrimoniale du plancher doit être étudiée afin de déterminer s'il doit être conservé ou non. Cette qualité patrimoniale peut ne pas être présente dans toutes les pièces et peut concerner le plancher d'origine et/ou le plafond d'origine, notamment dans le cas des voûtes.

- **Plancher sur terre-plein**

Plancher d'origine

- Le plancher présente-t-il une finition intérieure particulière de par les matériaux utilisés ou la technique utilisée ?

Dans le cas d'un plancher sur terre-plein de valeur patrimoniale et de bonne qualité, il faut alors étudier s'il est plus judicieux de laisser le sol en place sans isolation ou de **le déposer puis de le redéposer**, au risque de l'abîmer. De plus, cette dernière solution est assez onéreuse et plus lourde à mettre en œuvre. Si par contre, il ne présente pas de valeur patrimoniale particulière, des critères techniques vont permettre de déterminer la solution la plus adaptée.

- **Plancher sur espace non chauffé**

La valeur patrimoniale des deux faces du plancher doit être étudiée :

Plancher d'origine

- Le plancher présente-t-il une finition intérieure particulière de par les matériaux utilisés ou la technique utilisée ?

S'il présente des caractéristiques historiques à conserver, une **isolation par le haut** n'est pas envisageable. Si par-contre, il ne présente pas de valeur patrimoniale particulière, des critères techniques vont déterminer quelle solution est la plus adaptée.

Plafond d'origine

- Le plafond présente-t-il une finition intérieure particulière de par les matériaux utilisés ou la technique utilisée (voûtes, etc.) ?

Dans le cas où les deux faces du plancher présentent des caractéristiques patrimoniales, une isolation n'est guère envisageable. Cependant, ce cas de figure n'apparaît généralement pas sur toute la surface du plancher du bâtiment, il est alors possible d'isoler certaines parties du plancher.

Si le plancher d'origine présente une valeur patrimoniale à conserver, contrairement au plafond d'origine, une **isolation par le bas** peut être envisagée.

2.2.3 CRITÈRES TECHNIQUES

▪ Sol sur terre-plein

Surépaisseur

- La hauteur sous plafond des pièces est-elle suffisante pour une surépaisseur du plancher d'environ 20 cm ?
- Les hauteurs sous linteau des portes sont-elles suffisantes pour cette surépaisseur ?
- Les allèges des fenêtres peuvent-elles être plus basses ?
- Les arrivées et départs d'escalier peuvent-ils être aménagés ?
- Les radiateurs existants peuvent-ils être conservés ? L'espace entre le sol et le bas du radiateur est-il suffisant ?

Si cette surépaisseur est possible, le plancher est **isolé par le haut**. Dans le cas contraire, le plancher sera soit remplacé ou ne sera pas isolé.

▪ Plancher sur espace non chauffé léger

Dans ce cas, il faut vérifier si **une isolation entre solives** est possible.

▪ Plancher sur espace non chauffé lourd

Surépaisseur

- La hauteur sous plafond des pièces est-elle suffisante pour une surépaisseur du plancher d'environ 20 cm ?
- Les hauteurs sous linteau des portes sont-elles suffisantes pour cette surépaisseur ?
- Les allèges des fenêtres peuvent-elles être plus basses ?
- Les arrivées et départs d'escalier peuvent-ils être aménagés ?
- Les radiateurs existants peuvent-ils être conservés ? L'espace entre le sol et le bas du radiateur est-il suffisant ?

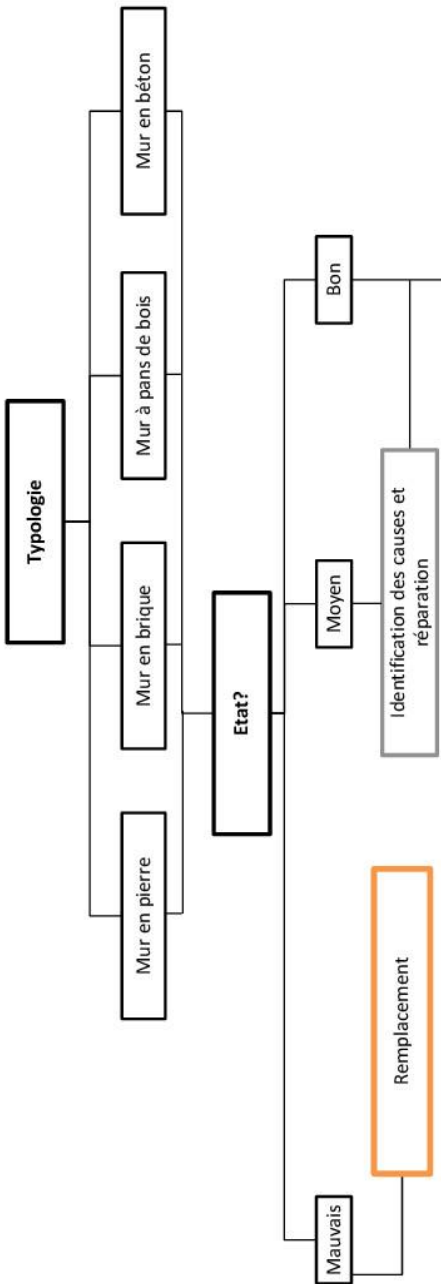
Si cette surépaisseur est possible, le plancher est **isolé par le haut**. Dans le cas contraire, le plancher sera **isolé par le bas** si le plafond d'origine le permet et que la hauteur sous plafond du local adjacent est suffisante.

2.2.4 RECOMMANDATIONS

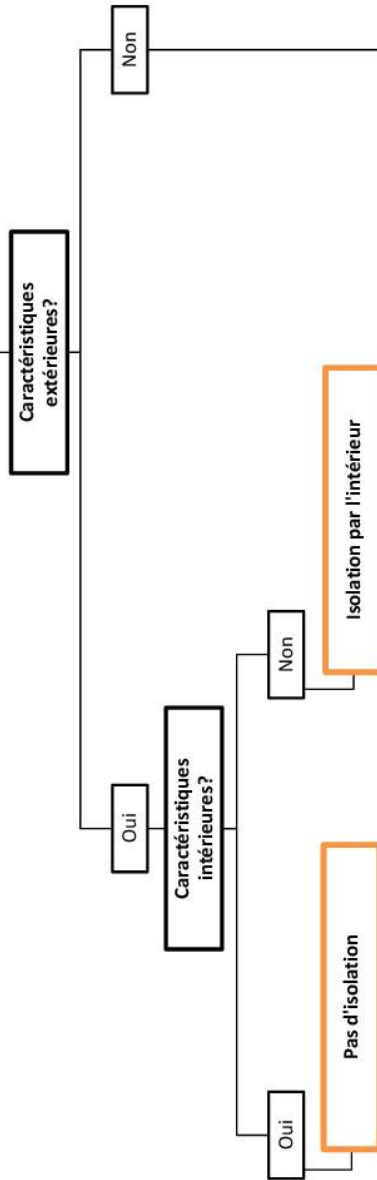
Certaines précautions sont à prendre par rapport à :

- l'inertie thermique du sol à conserver ou non
- la pose d'un chauffage par le sol
- aux raccords avec l'isolation des murs
- la perméabilité à la vapeur d'eau. Les films étanches sont à éviter car l'humidité du sol ne peut plus s'évaporer par la dalle et va se concentrer dans les murs périphériques qui vont se charger en humidité et entraîner des dégradations. (MPF, 2011)

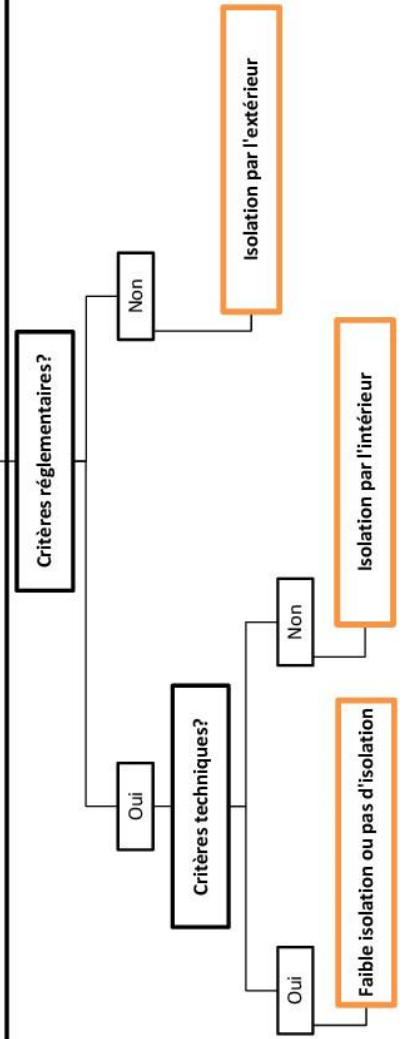
1. DIAGNOSTIC



2. CRITERES PATRIMONIAUX



3. CRITERES REGLEMENTAIRES ET TECHNIQUES



2.3 MURS EXTERIEURS

2.3.1 DIAGNOSTIC

La première étape consiste à établir un diagnostic du mur d'un point de vue de :

TPOLOGIE DU MUR

- De quel type est le mur ? De quels matériaux est-il constitué?
 - Murs en pierre
 - Murs à pans de bois ou colombage
 - Murs en briques
 - Murs en béton
- Le mur a-t-il été modifié au cours du temps ?
- Son environnement immédiat a-t-il été modifié ?

ÉTAT DU MUR

- Le mur présente-t-il des traces d'humidité telles que des moisissures, des efflorescences ou des traces de sel?
- Est-il sec et protégé des pénétrations d'eau : pluie, remontée capillaire, humidité de construction ?
- Le mur est-il en assez bon état pour supporter les conditions climatiques sans l'apport de l'environnement intérieur?

L'identification des causes des dégradations et leur correction sont donc primordiales. Ces dégradations peuvent être expliquées par des ouvrages perturbants qui ont modifié l'environnement immédiat du mur (trottoirs, dalles de ciment, etc.) ou sa composition (enduits étanches, isolation etc.) La création de systèmes drainants peut permettre d'éloigner l'humidité du mur.

2.3.2 CRITERES PATRIMONIAUX

Ensuite, la qualité patrimoniale du mur doit être étudiée afin de déterminer si son aspect esthétique doit être conservé ou non. Cette qualité patrimoniale peut ne pas être présente sur toutes les façades et dans toutes les pièces. Un système mixte d'isolation est alors envisageable.

CARACTERISTIQUES EXTERIEURES

- La façade est-elle classée ?
- Le mur présente-t-il un intérêt historique, de par ses matériaux, sa modénature, etc.?

Si la réponse à une de ces questions est oui, une isolation par l'extérieur n'est pas envisageable. Il faut dès lors étudier les caractéristiques intérieures afin de voir si une isolation par l'intérieur est possible.

CARACTERISTIQUES INTERIEURES

- Le mur présente-t-il des traces archéologiques intérieures à conserver ?
- Le mur présente-t-il des moulures ou des décors intérieurs ?

Dans ces différents cas de figure, une isolation par l'intérieur n'est pas envisageable. Cependant, si le mur présente des traces archéologiques et qu'elles ont été étudiées et répertoriées, une isolation par l'intérieur peut être envisagée. (cf. Refuge fortifié d'Omal, p.74)

2.3.3 CRITERES REGLEMENTAIRES

Ensuite, des critères réglementaires vont déterminer si une isolation par l'extérieur est possible :

- Un alignement de la rue doit-il être respecté ?
- Existe-t-il un règlement urbanistique par rapport à l'utilisation du revêtement extérieur ?

Si les réponses à ces questions sont non, une isolation par l'extérieur est possible. C'était notamment le cas pour la façade arrière de la Maison Hankar, qui ne présentait pas de contraintes patrimoniales et urbanistiques.

2.3.4 CRITERES TECHNIQUES

Finalement, des critères techniques vont permettre de faire le choix d'une isolation intérieure ou non.

- Les dormants sont-ils suffisamment larges pour permettre une isolation intérieure? (batée, linteau et tablette) ?
- Est-il possible d'isoler le sol, les murs de refend et le plafond pour éviter les ponts thermiques ?
Une isolation par l'intérieur engendre des nœuds constructifs compliqués à gérer, notamment au droit des planchers et des murs de refend. Ceux-ci peuvent amener une apparition de condensation et par la suite de moisissures.
- Le mur ne présenterait-il pas des risques de condensation ?
A cet effet, il est conseillé d'étudier la paroi et son comportement hygrothermique après une isolation par l'intérieur, à l'aide d'un logiciel décrivant les transferts thermiques et hydriques en régime dynamique. La pose d'un hydrofuge en façade peut alors être nécessaire.

Si la réponse à chacune de ces questions est oui, une **isolation par l'intérieur** peut alors être envisageable.

2.3.5 RECOMMANDATIONS

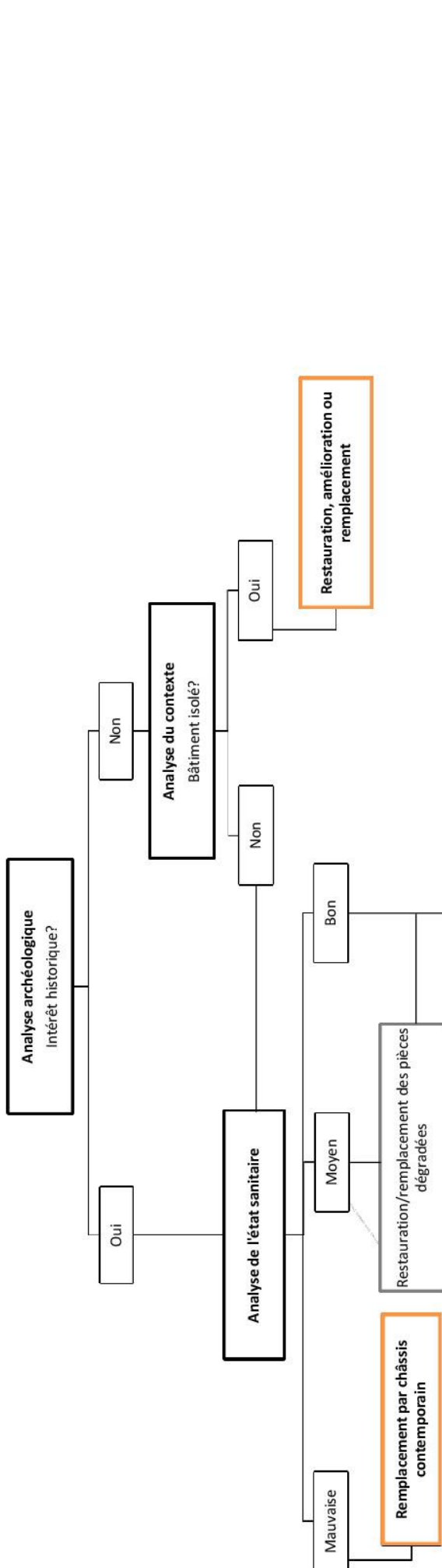
Certaines précautions sont à prendre quant à :

- Choix des isolants
- Compatibilité des isolants avec les matériaux du mur
- Perméabilité à l'air et à la vapeur d'eau. Un revêtement étanche viendrait compromettre cet équilibre et endommager le mur
- Inertie thermique
- Raccord avec l'isolation des plafonds et des dalles de sol

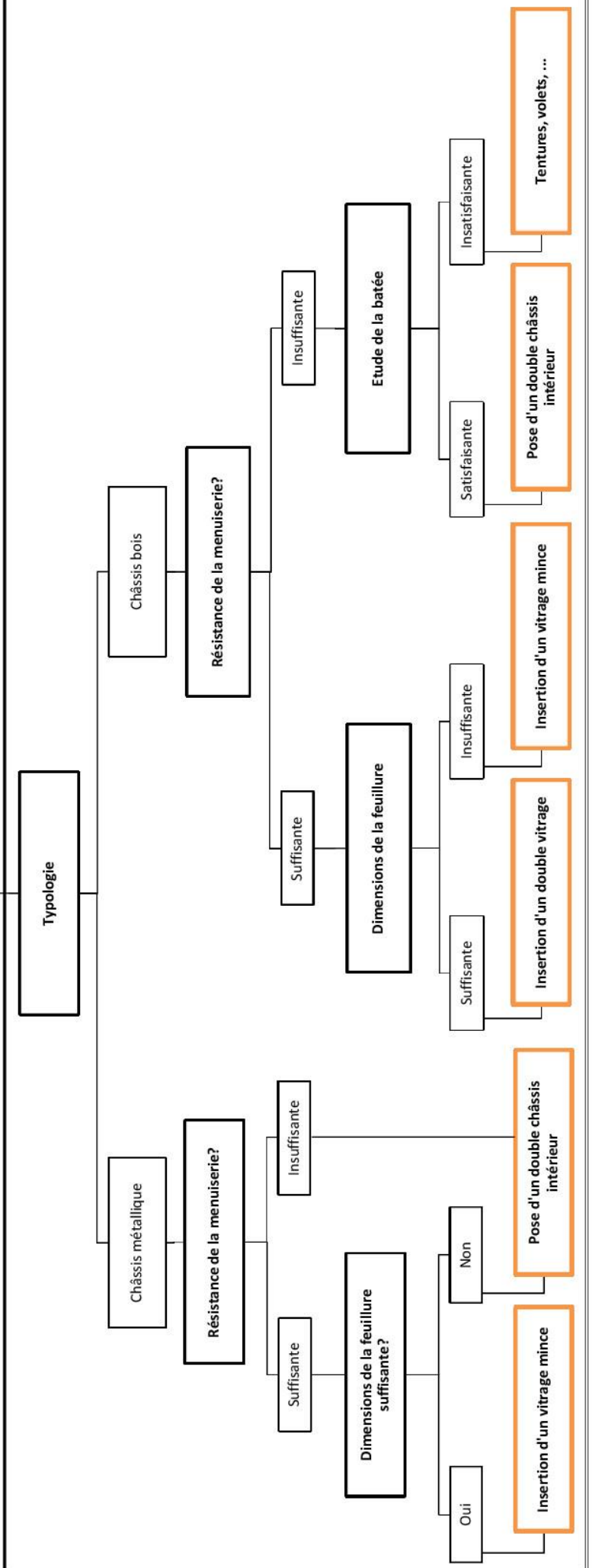
2.3.1 REMARQUES

Si, pour différentes raisons, une isolation n'est pas possible, une correction thermique peut être appliquée sur la paroi et permet de conserver les propriétés originelles du mur en améliorant ses performances thermiques. Cette correction thermique vise à diminuer l'effet de paroi froide grâce à l'application d'un enduit intérieur de maximum 5 cm d'épaisseur et perméable à la vapeur d'eau tel que le chaux chanvre ou le plâtre. (Piéreuse, 2013)

1. DIAGNOSTIC



2. EVALUATION DE SES CARACTERISTIQUES



2.4 CHASSIS

2.4.1 DIAGNOSTIC

La première étape consiste à établir un diagnostic du châssis. A cette fin, plusieurs analyses préalables sont nécessaires avant de décider du choix de l'amélioration du châssis. Ce chapitre se base sur la circulaire relative aux interventions sur monuments classés en matière de châssis et le texte « Choix Durable des châssis ».

ANALYSE ARCHEOLOGIQUE

La première étape consiste à mener une analyse archéologique du châssis de façon objective afin de démontrer son intérêt ou non.

- Le bâtiment est-il classé, inscrit sur la liste de sauvegarde ou situé dans un bien à intérêt patrimonial ?
- Le châssis présente-il une valeur historique ?
 - Est-il d'origine ? A-t-il été conçu en même temps que la façade ?
 - De quand date-t-il ??
- Le châssis présente-t-il une valeur esthétique ?
 - Divisions particulières dans le châssis (petit-bois, ferrures, etc.) ?
 - Formes particulières (courbes, cintres, etc.) ?
 - Décors ou volets sur la face intérieure ainsi que dans l'embrasure de la baie ?
- Le châssis présente-t-il une valeur technique ?
 - Système de fermeture/ouverture particulier (gueule de loup et mouton, etc.) ?
 - Système de raccord ouvrant/dormant particulier (guillotine, etc.) ?
 - Quincailleries remarquables (crémone, etc.) ?
- Le châssis présente-t-il des matériaux nobles ou irremplaçables ?
 - Chêne ancien, etc.
 - Vitraux
 - Verres particuliers : martelés, soufflés, glacés, ferrures, ...
- Quels sont le style et les caractéristiques du châssis ? (en ce compris, l'analyse de sa face intérieure ainsi que de l'embrasure de la baie : présence de décors ou de volets ?)

ANALYSE URBANISTIQUE

Une analyse du contexte urbanistique du bâtiment est ensuite menée :

- Le bâtiment est-il intégré dans un ensemble urbain cohérent ou est-il isolé ?
- Certaines façades sont-elles visuellement isolées ?

ANALYSE DE L'ÉTAT SANITAIRE

L'état sanitaire du châssis est ensuite étudié à l'aide d'un relevé des pathologies :

- Quel est l'état général du châssis ?
- Finitions : le châssis présente-t-il de la peinture écaillée, boursouflée, etc. ?
- Menuiseries : les profilés sont-ils dégradés ? Présentent-ils un gauchissement, de la pourriture, de la corrosion, etc. ?
- Vitrage : le verre a-t-il perdu de la transparence ? Est-il brisé ?
- Quincailleries : les quincailleries sont-elles usées, corrodées, cassées, remplacées, etc. ?

A la suite de ces 3 analyses, il est possible de conclure s'il est possible ou non de restaurer le châssis d'origine. En règle générale, la restauration sera toujours préférée au remplacement mais si l'état du châssis ne le permet pas, celui-ci peut être remplacé par un châssis neuf.

Dans le cas d'un remplacement d'un petit nombre de châssis en mauvais état sur l'ensemble des châssis similaires du bâtiment, les nouveaux châssis se rapprocheront le plus possible de ceux d'origine. Une demande de remplacement sera déposée.

Si par-contre, le remplacement concerne une grande majorité des châssis du bâtiment, les nouveaux châssis devront à la fois être performants d'un point de vue énergétique et respecter à la fois le style du bâtiment et le contexte urbanistique. Ceux-ci devront se démarquer avec un style contemporain afin d'éviter le « faux-vieux ». Un certificat de patrimoine est alors nécessaire.

2.4.2 EVALUATION DES CARACTÉRISTIQUES

Après l'analyse du châssis et la décision de le conserver, une évaluation de ses caractéristiques permet de choisir quelle technique d'amélioration est la plus adaptée pour sa configuration. L'insertion d'un vitrage à l'aide d'un profilé d'adaptation est à éviter dans le cas de bâtiment à caractère patrimonial car il modifie fortement l'aspect extérieur du bâtiment. La pose d'un survitrage n'est également pas recommandée à cause de sa difficulté d'entretien, des problèmes de condensation et d'accumulation de poussière entre le châssis et le survitrage. Le type de châssis détermine quelles solutions sont envisageables ou non.

CHASSIS EN BOIS

▪ Résistance de la menuiserie

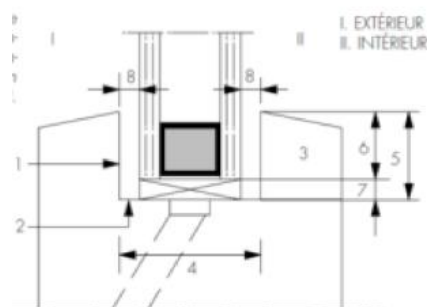
La résistance de la menuiserie doit être évaluée afin de vérifier si les ouvrants et les charnières d'origine peuvent supporter la surcharge engendrée par un nouveau vitrage simple ou double.

▪ Dimensions de la feuillure

Si les ouvrants et les charnières sont suffisants pour supporter le poids d'un nouveau vitrage, les dimensions de la feuillure sont ensuite mesurées afin de vérifier si **l'insertion d'un double vitrage** dans le châssis est possible. A cet effet, la largeur utile et la hauteur utile de la feuillure doivent être mesurées.

Si celles-ci ne sont pas suffisantes, un approfondissement de la feuillure peut être mené si l'épaisseur du profilé le permet et un double vitrage peut y être inséré.

Cependant, dans le cas de châssis à petit-bois par exemple, l'approfondissement de la feuillure n'est pas possible ou le châssis ne peut supporter la surcharge engendrée par un double vitrage, **l'insertion d'un vitrage feuilleté**, procédé plus coûteux, peut alors être envisagée. Dans ce cas, le CSTC préconise un fond de feuillure de minimum 18 mm et un espace entre le vitrage et le profilé de minimum 3 mm. Certains fabricants recommandent des dimensions moins contraignantes. (Cf. Annexe 8)



1. Contre-feuillure	5. Hauteur utile de feuillure
2. Fond de feuillure	6. Hauteur de prise en feuillure ou hauteur d'appui
3. Parclose	7. Jeu périphérique (ou jeu de fond de feuillure)
4. Largeur utile de feuillure	8. Jeux latéraux

Figure 137 – Feuillure
(CSTC, 2001)

▪ Capacité portante

Si la menuiserie n'a pas une capacité portante suffisante pour un nouveau vitrage, une étude de la baie sera menée afin de voir s'il est possible d'ajouter un nouveau **double châssis** du côté intérieur.

- La fenêtre intérieure pourrait-elle s'ouvrir malgré le double châssis ?
- Des radiateurs sont-ils présents dans la batée ?
- Des éléments de finition intérieure tels que des moulures, des tablettes de fenêtre, des chambranles, plafonnage sont-ils à conserver ?

CHASSIS METALLIQUE

Dans le cas d'un châssis métallique, nous l'avons vu, l'insertion d'un double vitrage ou d'un survitrage est généralement impossible.

▪ Dimensions de la feuillure

Les dimensions de la feuillure déterminent dès lors la possibilité d'insérer un vitrage mince dans les profilés métalliques d'origine. (cf. Annexe 8) Si elle est suffisante, il convient de vérifier la capacité portante du châssis. Si elle n'est pas suffisante, la pose d'un **double châssis** est nécessaire.

2.4.3 RECOMMANDATIONS

Dans le cas où le placement d'un double châssis du côté intérieur est possible, certaines précautions sont à prendre :

- Choix du nouveau châssis
- Bonne ventilation de l'espace entre les deux châssis afin d'empêcher la condensation entre les deux châssis
- Système de ventilation à prévoir

En dépit de cela, une solution plus classique telle que la mise en place de **tentures épaisses ou de volets** sera mise en place.

3 CONCLUSION

Chaque élément de l'enveloppe se voit donc analysé selon une structure assez récurrente :

La première étape comprend toujours un **diagnostic** de l'élément à étudier à travers la détermination de sa typologie, sa datation, les matériaux et techniques utilisés, son état sanitaire, etc.

Ses **caractéristiques historiques et patrimoniales** sont ensuite étudiées. Ces étapes sont nécessaires dans le processus de restauration d'un monument historique, comme le préconise l'article 9 de la Charte internationale sur la Conservation et la Restauration des Monuments et des Sites datant de 1964 – communément appelée Charte de Venise- et ratifiée en Belgique en 1965 : « *La restauration est une opération qui doit garder un caractère exceptionnel. Elle a pour but de conserver et de révéler les valeurs esthétiques et historiques du monument et se fonde sur le respect de la substance ancienne et de documents authentiques. Elle s'arrête là où commence l'hypothèse, sur le plan des reconstitutions conjecturales, tout travail de complément reconnu indispensable pour raisons esthétiques ou techniques relève de la composition architecturale et portera la marque de notre temps. La restauration sera toujours précédée et accompagnée d'une étude archéologique et historique du monument.* » (Icomos, 1964)

Finalement, d'autres considérations plus **techniques** telles que l'espace disponible, la capacité portante, etc. permettent de choisir la solution la plus adaptée à l'élément.

L'élément sera donc restauré et ses performances améliorées si son état le permet. Cependant, si l'élément est dans un état de dégradation trop avancé et que ses qualités historiques sont démontrées, il peut être remplacé, en respectant l'article 12 de la Charte de Venise :

« *Les éléments destinés à remplacer les parties manquantes doivent s'intégrer harmonieusement à l'ensemble, tout en se distinguant des parties originales, afin que la restauration ne falsifie pas le document d'art et d'histoire.* »

CONCLUSION & PERSPECTIVES

Le contexte énergétique actuel nous incite à rénover le parc immobilier existant, en ce compris les bâtiments à intérêt patrimonial. Cependant, ces types de rénovation sont assez peu nombreuses en Région Wallonne et Bruxelles-Capitale, notamment en raison du manque de connaissance des techniques d'interventions, du coût des travaux, du manque de main d'œuvre spécialisé, etc. Pourtant, outre la conservation et la pérennité du bien, une rénovation énergétique améliore le confort des occupants et diminue leur facture énergétique.

L'élaboration d'un outil d'aide à la rénovation, sur base de la littérature et d'analyses de cas, était donc nécessaire afin de promouvoir ce type de rénovation.

Toutefois, trouver le bon compromis entre conservation du patrimoine et efficacité énergétique n'est pas simple. En effet, beaucoup de facteurs sont à prendre en compte dans une réflexion globale. La structure d'une rénovation énergétique d'un bâtiment à intérêt patrimonial pourrait se résumer comme suit :

1. Examen approfondi des caractéristiques du bâtiment

Avant toute intervention sur un bâtiment à intérêt patrimonial, il est absolument nécessaire de bien connaître ses caractéristiques patrimoniales et techniques ainsi que son état sanitaire.

- a. *Caractéristiques patrimoniales* : raisons du classement, présence de décors, archéologie du bâti, type de matériaux utilisés, histoire du bâtiment, qualité des menuiseries, ...
- b. *Caractéristiques techniques* : comportement hygrothermique, inertie, ...
- c. *Etat sanitaire* : présence de sels ou d'humidité, dégradations éventuelles de certains éléments.

2. Définition d'une fonction adaptée au bâtiment

Après avoir identifié les caractéristiques et l'état sanitaire du bâtiment, la question de la fonction du bâtiment doit être abordée. La fonction d'origine peut être conservée, adaptée ou une nouvelle fonction peut être définie en prenant en compte à la fois les aspects énergétiques et les aspects patrimoniaux du bâtiment.

3. Hiérarchisation des interventions

L'importance des interventions envisagées et leur pertinence doit ensuite être évaluée en fonction de différents paramètres qui sont souvent difficiles à évaluer :

- l'amélioration du confort
- l'impact écologique
- le budget disponible
- les temps de retour.

4. Compromis entre patrimoine et efficacité énergétique

Les interventions sont ensuite choisies en veillant à conserver les propriétés d'origine du bâtiment, que ce soit d'un point de vue patrimonial ou technique. Ces interventions peuvent viser :

a. *L'amélioration de l'enveloppe*

Celle-ci permet de réduire les pertes par transmission et par infiltration et d'ainsi réduire les besoins en énergie du bâtiment. Elles peuvent consister en :

- l'isolation des parois
- L'étanchéification des parois
- Le traitement des châssis

b. *Le choix de systèmes performants*

Ceux-ci permettent de garantir un confort optimal aux occupants et de diminuer les consommations énergétiques. En effet, le contrôle de la qualité de l'air intérieur est nécessaire grâce à un système de ventilation performant. Le remplacement d'une ancienne chaudière permet de faire des économies importantes.

c. *Prise en compte de l'aspect environnemental*

Les matériaux utilisés lors de la rénovation seront de préférence renouvelables et avec un faible impact environnemental.

Lorsqu'elles sont compatibles avec la conservation du patrimoine, les énergies renouvelables seront intégrées dans la rénovation.

Le traitement de l'eau de pluie et la gestion des déchets de chantier permettent également des économies avec peu de moyens.

La rénovation énergétique d'un bâtiment à intérêt patrimonial, menée dans une réflexion globale et en gardant à l'esprit toutes les caractéristiques du bâtiment, permet des économies d'énergie considérables, comme les analyses de cas l'ont démontré.

Cependant, les connaissances relatives au bâti ancien sont assez limitées, notamment en raison du nombre réduit de restaurations menées en Région Wallonne et Bruxelles-Capitale. Plus précisément, les techniques associées au type d'isolation retenue et principalement à l'isolation par l'intérieur sont encore peu connues. En effet, de nombreuses questions subsistent :

- La pose d'un hydrofuge, en complément d'une isolation par l'intérieur, est-elle nécessaire ?
- Quels sont réellement les avantages des isolants écologiques dans ce type de restauration, par rapport à des isolants minéraux par exemple ?

Nous avons vu dans l'analyse de cas que l'utilisation d'isolants écologiques était assez répandue dans le cas des murs. Par contre, au niveau du sol, des isolants synthétiques sont majoritairement utilisés. Des isolants écologiques convenant à ce type d'utilisation existent-ils ?

- Le chanvre, encore peu utilisé et pourtant en pleine expansion en Région Wallonne, pourrait-il convenir à ce type de restauration ?
- L'isolation partielle du bâtiment n'engendrerait-elle pas de risques de dégradations plus importantes au sein des parois non isolées ?
- En cas d'isolation par l'intérieur, est-il recommandé d'utiliser un pare-vapeur, un freine-vapeur ou un freine-vapeur intelligent ?
- Comment assurer une bonne mise en œuvre de l'étanchéité à l'air dans tout le bâtiment ?

Ces lacunes sont dues à la fois au manque de main d'œuvre qualifiée dans le domaine et au manque de connaissances des différentes techniques.



Figure 138 - Château de Clabecq
(R.E.D, 2013)

Un exemple probant de restauration énergétique d'un bâtiment à intérêt patrimonial est celle du Château de Clabecq, réalisée entre 2009 et 2013. Ce château du XVII^e siècle, dont les façades et la toiture sont classées, était à l'abandon depuis de nombreuses années et a été divisé en 17 logements sociaux pour le Fonds du Logement Wallon et Roman Païs.

La première phase des travaux portait sur les façades et la toiture et a permis de former des artisans à la taille de la pierre afin de restaurer les encadrements de baie.

La seconde phase des travaux portait sur les aménagements intérieurs : isolation par l'intérieur, étanchéité à l'air et ventilation. A la fin du chantier, les tests Blower Door ont montré que les objectifs d'étanchéité à l'air n'étaient pas atteints, en raison de sa mauvaise mise en œuvre.

Finalement, des corrections ont pu être faites afin de parvenir à une étanchéité à l'air suffisante. (R.E.D, 2013) Ce chantier a permis de montrer le manque de formation et de connaissance des entreprises quant au choix de la technique d'isolation, à la pose des matériaux et à la mise en œuvre de l'étanchéité à l'air dans le cas de restauration de bâtiment à intérêt patrimonial.

La multiplication de ce type de chantier permettrait d'étendre nos connaissances techniques et de former des artisans spécialisés dans ce type de restauration. Cela permettrait de sensibiliser les entreprises et les particuliers à cette problématique afin de promouvoir l'importance de la conservation du patrimoine et de l'amélioration de ses performances énergétiques.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 - Consommation unitaire totale par m ² de bâtiments (à climat normal) (Entranze, 2008) 1	
Figure 2 - Musée Curtius, Liège (Wikipedia, 2014)	2
Figure 3 - Niveau de consommation en chauffage par type de bâtiments et groupe d'âge (kWh/m ² .an) en Flandres (Belgique) (BPIE)	4
Figure 4 - Comportement hygrothermique du bâti ancien et moderne (Pender, 2011)	5
Figure 5 - Déphasage de différents matériaux (MPF, 2011)	6
Figure 6 - Principes de l'inertie thermique (Architecture et Climat, 2013)	6
Figure 7 - Défauts d'étanchéité à l'air d'un châssis (DGUHC, et al., 2007)	6
Figure 8 - Propriétés bioclimatiques du bâti ancien (MPF, 2011)	6
Figure 9 - Fonctionnement hygrométrique d'un mur traditionnel (a) non isolé et (b) isolé de façon moderne (MPF, 2011)	7
Figure 10 - Pose d'une sous-toiture (Architecture et Climat, 2013)	8
Figure 11 - Coupe transversale d'une toiture existante sans contre-lattes, munie a posteriori d'une isolation et d'une sous-toiture de substitution (CSTC, 2010)	9
Figure 12 - Isolation (a) entre gîtes en rouleaux - (b) sur gîtage en rouleaux (GDF Suez)	10
Figure 13 - Plancher (a) non circulaire - (b) circulaire (Architecture et Climat, 2013)	10
Figure 14 - Isolation (a) entre chevrons - (b) combinée (Architecture et Climat, 2013)	11
Figure 15 - Courants convectifs (Architecture et Climat, 2013)	12
Figure 16 - Isolation par l'extérieur (Architecture et Climat, 2013)	12
Figure 17 - Toiture chaude (Architecture et Climat, 2013)	13
Figure 18 - Isolation d'une toiture plate en structure bois (Bruxelles Environnement, 2009)	13
Figure 19 - Isolation d'un plancher inférieur (a) par le bas - (b) par le haut (Glavie)	14
Figure 20 - Age du logement en Belgique (Entranze, 2008)	17
Figure 21 - Isolation par l'extérieur (Glavie)	18
Figure 22 - Isolation par l'intérieur (Glavie)	19
Figure 23 - Effet de convection (Evrard, et al., 2011)	20
Figure 24 - Situation sans pare-vapeur en hiver et en été (Evrard, et al., 2011)	20
Figure 25 - Humidification par la pluie et évaporation en surface (Evrard, et al., 2011)	20
Figure 26 - Effet de l'inertie (Evrard, et al., 2011)	21
Figure 27 - Méthode de Glaser (Evrard, et al., 2011)	22
Figure 28 - Glasta (Physibel)	22
Figure 29 - WUFI (Fraunhofer IBP)	22
Figure 30 - Condensation sur le simple vitrage et condensation dans les murs suite à la pose d'un double vitrage (Bertrand, 2008)	25
Figure 31 - Pose d'un joint entre ouvrant et dormant (Luyckx, 2014)	26
Figure 32 - Pose d'un survitrage (Bruxelles Environnement; Detremmerie, et al., 2012)	26
Figure 33 - (a) Châssis existant en bois avec simple vitrage - (b) Intégration d'un double vitrage (Luyckx, 2014)	27
Figure 34 - Châssis à petit-bois (Bruxelles Environnement)	27
Figure 35 - Profilés et double vitrage pour rénovation (Saint-Gobain Glass)	28
Figure 36 - Pose d'un double vitrage dans un profilé d'adaptation (Detremmerie, et al., 2012)	28
Figure 37 - Intégration d'un simple vitrage feuilleté dans un (a) châssis en bois existant - (b) châssis métallique existant (Bruxelles Environnement)	28
Figure 38 - Intégration d'un double châssis en applique, sur la face intérieure du mur de façade, avec isolation intérieure (Bruxelles Environnement)	29
Figure 39 - (a) Cellulose - (b) Fibre de bois - (c) Liège - (d) Chanvre (Ecobati)	32
Figure 40 - Laine de mouton et plumes de canard (Ecobati)	33
Figure 41 - (a) Laine de roche - (b) Verre cellulaire - (c) Vermiculite (Construire Durable, 2014)	33
Figure 42 - VMC simple flux (Deruyver, 2014)	36
Figure 43 - VMC double flux (Deruyver, 2014)	36
Figure 44 - Système de chauffage (Deruyver, 2014)	37
Figure 45 - Encombrement d'une réserve à granulés de bois (Architecture et Climat, 2013)	38

Figure 46 - Combustibles : bûches, plaquettes, pellets (Architecture et Climat, 2013).....	38
Figure 47 - (a) Séjour 1 - (b) Façade avant - (c) Salle à manger (Marc Van der Stricht Architecte, 2010).....	44
Figure 48 - Façade arrière avant et après rénovation (Closson, et al., 2013).....	45
Figure 49 - Vues axonométriques : situations existante et projetée (Marc Van der Stricht Architecte, 2010)	45
Figure 50 - Plans du rez-de-chaussée et du 1er étage (Marc Van der Stricht Architecte, 2010).....	45
Figure 51 - Coupe longitudinale (Marc Van der Stricht Architecte, 2010).....	45
Figure 52 - Isolation de l'annexe (Marc Van der Stricht Architecte, 2010).....	46
Figure 53 - Détail en coupe de la façade arrière existante (Marc Van der Stricht Architecte, 2010).....	46
Figure 54 - Détail en coupe de la nouvelle toiture (Marc Van der Stricht Architecte, 2010).....	47
Figure 55 - Détail de la toiture (Marc Van der Stricht Architecte, 2010).....	47
Figure 56 - Double châssis côté rue (Marc Van der Stricht Architecte, 2010).....	47
Figure 57 - Détail du double châssis (Marc Van der Stricht Architecte, 2010).....	47
Figure 58 - Intégration des panneaux dans la toiture (Marc Van der Stricht Architecte, 2010).....	48
Figure 59 - Vue de la toiture depuis la rue (Marc Van der Stricht Architecte, 2010).....	48
Figure 60 - Besoins nets de chauffage (Fruchart, 2011).....	49
Figure 61 - Besoins nets en énergie (Fruchart, 2011).....	49
Figure 62 - Bâtiment (a) avant rénovation - (b) après rénovation (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	50
Figure 63 - Implantation (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	50
Figure 64 - Coupes longitudinale et transversale (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	51
Figure 65 - Plan du rez-de-chaussée (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	51
Figure 66 - Coupe dans l'habitation (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	52
Figure 67 - Coupe dans l'annexe (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	52
Figure 68 - Rénovation de la toiture (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	53
Figure 69 - Toiture restaurée (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	53
Figure 70 - Détail de la toiture (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	53
Figure 71 - Détail d'un nouveau plancher intermédiaire (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	53
Figure 72 - Détail de la nouvelle dalle de sol (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	53
Figure 73 - Double châssis (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	53
Figure 74 - Châssis métallique (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	53
Figure 75 - Façades Sud et Est (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	54
Figure 76 - Nouvelles baies (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	54
Figure 77 - Toiture de l'annexe (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	54
Figure 78 - Stockage des pellets (Bureau Coupez et Associés, 2011).....	54
Figure 79 - Schéma de la filière d'épuration (filtre végétalisé Epuval 5G) (Epuval, 2010).....	55
Figure 80 - Façade Ouest (a) avant rénovation - (b) après rénovation (AW Architectes, 2013).....	56
Figure 81 - Plan d'implantation (AW Architectes, 2013).....	56
Figure 82 - Plan de deux appartements (AW Architectes, 2013).....	57
Figure 83 - Coupe transversale (AW Architectes, 2013).....	57
Figure 84 - Schéma des circulations au rez-de-chaussée (AW Architectes, 2013).....	57
Figure 85 - Détail en plan de l'isolation de la bande périphérique (AW Architectes, 2013).....	58
Figure 86 - Flux de chaleur (AW Architectes, 2013).....	58
Figure 87 - Détail de l'isolation de la petite façade (AW Architectes, 2013).....	58
Figure 88 - Détail de l'isolation des grandes façades (AW Architectes, 2013).....	58
Figure 89 - (a) Nouvelle peau extérieure en caisson de bois - (b) Isolation des petites façades - (c) Façade en cours de rénovation (AW Architectes, 2013).....	58
Figure 90 - Détail en coupe de l'isolation de l'acrotère (AW Architectes, 2013).....	59
Figure 91 - Flux de chaleur et température des matériaux (AW Architectes, 2013).....	59
Figure 92 - Nouveaux châssis (AW Architectes, 2013).....	59
Figure 93 - Isolation du plancher (AW Architectes, 2013).....	59
Figure 94 - Fonctionnement du système de chauffage (AW Architectes, 2013).....	60
Figure 95 - Façade Sud(a) avant rénovation - (b) après rénovation (A2M, 2010).....	62
Figure 96 - Zone de protection (en trait rouge) de l'abbaye de Forest (en bleu) (A2M, 2010).....	63
Figure 97 - Maintien du revêtement de sol en granito d'origine (A2M, 2010).....	63
Figure 98 - Volumétrie en cœur d'îlot (A2M, 2010).....	63
Figure 99 - Ajout d'un nouvel étage (A2M, 2010).....	63
Figure 100 - Plan du premier étage (A2M, 2010).....	64

Figure 101 - Coupe transversale (A2M, 2010).....	64
Figure 102 - Schéma de l'isolation continue (A2M, 2010).....	64
Figure 103 - Flux des températures (A2M, 2010).....	64
Figure 104 - Coupe dans la façade avant (A2M, 2010).....	65
Figure 105 - (a) Découpe de la dalle – (b) Encoche de la dalle – (c) Mise en place des colonnes en béton armé – (d) Mise en place de l'ossature bois (A2M, 2010).....	65
Figure 106 - Vue depuis la cour intérieure (A2M, 2010).....	65
Figure 107 - Détail en plan de la façade arrière (A2M, 2010).....	65
Figure 108 - Détail en plan de l'annexe (A2M, 2010).....	66
Figure 109 - Façades Sud et Ouest (A2M, 2010).....	66
Figure 110 - Détail en coupe du double châssis (A2M, 2010).....	66
Figure 111 - Double châssis (A2M, 2010).....	66
Figure 112 - Night-cooling (A2M, 2010).....	67
Figure 113 - Panneaux photovoltaïques (A2M, 2010).....	67
Figure 114 - Toitures végétales (A2M, 2010).....	68
Figure 115 - Simulation de la paroi avec mur isolé par l'intérieur, sans et avec traitement hydrofuge (A2M, 2010).....	69
Figure 116 - (a) Moulin à farine - (b) Moulin à drèche et corps de logis - (c) Intérieur du moulin à drèche (Lorenzi, 2006).....	70
Figure 117 - Carte dressée par G. Leduc en 1801, arpenteur géomètre forestier (Lorenzi, 2006).....	70
Figure 118 - Rez-de-chaussée du moulin à farine (gauche) et du moulin à drèche (droite) (Lorenzi, 2006).....	71
Figure 119 - 1 ^{er} et 2 ^e étages du moulin à farine (Lorenzi, 2006).....	71
Figure 120 - Rez-de-chaussée et 1er étage du moulin à farine (Lorenzi, 2006).....	72
Figure 121 - Roue et œillard (Lorenzi, 2006).....	72
Figure 122 - Colombier (a) avant et (b) après restauration (Lorenzi, 2006).....	72
Figure 123 - Mécanisme du XIXe siècle (Lorenzi, 2006).....	73
Figure 124 - Roue avant et après restauration (Lorenzi, 2006).....	73
Figure 125 - (a) Façades nord-ouest/sud-ouest et sud-ouest/sud/est – (b) Intérieur (Evrard, et al., 2011).....	74
Figure 126 - Implantation (TRIO Architecture, 2014).....	74
Figure 127 - Coupe longitudinale (TRIO Architecture, 2014).....	75
Figure 128 - Plan du RDC (TRIO Architecture, 2014).....	75
Figure 129 - Détail 2 (Evrard, et al., 2011).....	76
Figure 130 - Détail 3 (Evrard, et al., 2011).....	76
Figure 131 - Détails 1, 2 et 3: teneur en eau totale (Evrard, et al., 2011).....	77
Figure 132 - Détail 1: teneur en eau de l'isolant (Evrard, et al., 2011).....	77
Figure 133 - Cas 2.1.A et cas 2.2.A : Evolution de l'humidité dans la brique du côté intérieur (Evrard, et al., 2011).....	78
Figure 134 - Coupe des combles (Deruyver, 2014).....	79
Figure 135 - Traces (a) antérieures à la construction – (b) de l'ancienne fonderie – (c) de l'ancien fournil (Deruyver, 2014).....	79
Figure 136 – Dégradations de la charpente (CSTC, 2010).....	86
Figure 137 – Feuillure (CSTC, 2001).....	97
Figure 138 – Château de Clabecq (R.E.D, 2013).....	113
Figure 139 - Pose d'un simple vitrage (CSTC, 2001).....	113
Figure 140 - Pose d'un simple vitrage (Van Ruysdael, 2014).....	113

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Valeur isolante de matériaux d'isolation écologique et épaisseurs requises (Bruxelles Environnement, 2009).....	11
Tableau 2 - Tableau récapitulatif des interventions (Levy, et al., 2011)	24
Tableau 3 - Comparaison des performances de différentes solutions de rénovation énergétique d'un châssis en chêne de 15 mm de section avec un simple vitrage de 4 mm (Detremmerie, et al., 2012).....	24
Tableau 4 - Tableau récapitulatif des propriétés techniques des matériaux isolants (Bruxelles Environnement, 2009).....	30
Tableau 5 - Choix des isolants (Bruxelles Environnement, 2009).....	31
Tableau 6 - Economies (AW Architectes, 2013).....	61
Tableau 7 - Composition des parois.....	76
Tableau 8 - Comparatif des cas.....	81
Tableau 9 - Comparatif des cas.....	82
Tableau 10 - Exigences thermiques à respecter en Région Wallonne pour les travaux de rénovation importants ou simples (CSTC, 2014).....	106
Tableau 11 - Exigences thermiques à respecter en Région Wallonne pour les changements d'affectation (CSTC, 2014).....	106
Tableau 12 - Exigences thermiques à respecter dans la Région de Bruxelles-Capitale pour les rénovations lourdes et simples (CSTC, 2014).....	106
Tableau 13 - Valeurs U maximales admissibles ($W/m^2.K$) ou valeurs R minimales ($m^2.K/W$) à réaliser en Région wallonne, en Région de Bruxelles-Capitale et en Région flamande (CSTC, 2014).....	107
Tableau 14 - Définition des standards énergétiques (pmp, 2014).....	107
Tableau 15 - Bilans thermiques (Bruxelles-Environnement, 2010).....	108
Tableau 16 - U_w des dispositifs d'amélioration d'un châssis (Bruxelles Environnement).....	108
Tableau 17 - U_g des dispositifs d'amélioration d'un châssis (Bruxelles Environnement).....	108
Tableau 18 - Comparatif des types d'isolant (Bruxelles-Environnement, 2010)	109
Tableau 19 - Comparatif des applications et mises en œuvre d'isolant (Bruxelles-Environnement, 2010).....	109
Tableau 20 - Comparatif des coûts d'isolant (Bruxelles-Environnement, 2010).....	110
Tableau 21 - Caractéristiques techniques de l'UNILIT (Arte Constructo, 2006).....	110
Tableau 22 - Détail des coûts de la rénovation énergétique de la Maison Hankar (Closson, et al., 2013).....	111
Tableau 23 - Calcul des heures de surchauffe (Willem, 2013).....	111
Tableau 24 - Détail des dégradations d'une toiture à versants (Bruxelles Environnement, 2009).....	112
Tableau 25 - Détail des dégradations d'une toiture plate (Bruxelles Environnement).....	112
Tableau 26 - Hauteur utile de feuillure minimale (CSTC, 2001).....	113
Tableau 27 - Largeur utile de feuillure minimale (CSTC, 2001)	113

ANNEXES

ANNEXE 1

INTRODUCTION : RÉGLEMENTATION ET STANDARDS ÉNERGÉTIQUES

Exigences en vigueur	Bâtiments résidentiels	Immeubles de bureaux et de service, bâtiments destinés à l'enseignement	Bâtiments ayant une autre destination (*)	Bâtiments industriels
Isolation thermique	U_{max} ou R_{min} (éléments rénovés)	U_{max} ou R_{min} (éléments rénovés)	U_{max} ou R_{min} (éléments rénovés)	-
Performance énergétique	-	-	-	-
Climat intérieur	Amenées d'air (résidentiel) dans les locaux où les châssis de fenêtres ou de portes extérieurs sont remplacés	Amenées d'air (non-résidentiel) dans les locaux où les châssis de fenêtres ou de portes extérieurs sont remplacés	Amenées d'air (non-résidentiel) dans les locaux où les châssis de fenêtres ou de portes extérieurs sont remplacés	-

(*) Sont repris dans cette catégorie : les hôpitaux et cliniques, les bâtiments du secteur Horeca, les installations sportives, les bâtiments qui abritent les commerces,...

Tableau 10 - Exigences thermiques à respecter en Région Wallonne pour les travaux de rénovation importants ou simples (CSTC, 2014)

Exigences en vigueur	Bâtiments résidentiels	Immeubles de bureaux et de service, bâtiments destinés à l'enseignement	Bâtiments ayant une autre destination (*)	Bâtiments industriels
Isolation thermique	• max. K65 • U_{max} ou R_{min}	• max. K65 • U_{max} ou R_{min}	• max. K65 • U_{max} ou R_{min}	• max. K65 • U_{max} ou R_{min}
Performance énergétique	-	-	-	-
Climat intérieur	Dispositif de ventilation (résidentiel)	Dispositif de ventilation (non-résidentiel)	Dispositif de ventilation (non-résidentiel)	-

(*) L'affectation indiquée en tête des colonnes est l'affectation nouvelle. Concerne les bâtiments ou parties de bâtiments pour lesquels, après le changement d'affectation, contrairement à la situation antérieure, de l'énergie est consommée pour les besoins des personnes en vue d'obtenir une température intérieure spécifique, ou les bâtiments industriels qui reçoivent une affectation de bâtiment résidentiel, d'immeuble de bureaux et de services ou de bâtiments destinés à l'enseignement.
(*) Sont repris dans cette catégorie : les hôpitaux et cliniques, les bâtiments du secteur Horeca, les installations sportives, les bâtiments qui abritent les commerces,...

Tableau 11 - Exigences thermiques à respecter en Région Wallonne pour les changements d'affectation (CSTC, 2014)

Exigences en vigueur	Habitations individuelles (*)	Résidentiel commun (*)	Bureaux et services, enseignement	Soins de santé, culture et divertissement, restaurants et cafés, commerces ou sport	Autre affectation (*)
Isolation thermique	U_{max} ou R_{min}	U_{max} ou R_{min}	U_{max} ou R_{min}	U_{max} ou R_{min}	U_{max} ou R_{min}
Performance énergétique	-	-	-	-	-
Climat intérieur	<ul style="list-style-type: none"> En cas d'ajout, de suppression ou de remplacement des fenêtres d'un local: <ul style="list-style-type: none"> - dispositifs d'amenée ou d'évacuation d'air (résidentiel) (*) - ventilation intensive Local nouvellement créé: dispositifs d'amenée ou d'évacuation d'air (résidentiel) 	<ul style="list-style-type: none"> En cas d'ajout, de suppression ou de remplacement des fenêtres et pour tout local nouvellement créé: dispositifs d'amenée ou d'évacuation d'air (non-résidentiel) 	<ul style="list-style-type: none"> En cas d'ajout, de suppression ou de remplacement des fenêtres et pour tout local nouvellement créé: dispositifs d'amenée ou d'évacuation d'air (non-résidentiel) (*) 	<ul style="list-style-type: none"> En cas d'ajout, de suppression ou de remplacement des fenêtres et pour tout local nouvellement créé: dispositifs d'amenée ou d'évacuation d'air (non-résidentiel) 	-

(*) Sont repris dans cette catégorie : les maisons unifamiliales, les appartements, les studios, les appart-hôtels, les flat-hôtels, ...
(*) Sont repris dans cette catégorie : les hôtels, les auberges, les auberges de jeunesse, les motels, les pensions, les établissements pénitentiaires et de rééducation, les maisons de repos, les internats, ...
(*) Sont repris dans cette catégorie : les bâtiments avec activités industrielles ou artisanales, les ateliers, les bâtiments agricoles, les aéroports, les gares, les centres funéraires, ...
(*) En cas de changement d'affectation vers un usage d'habitation individuelle ou de bureaux et services : dispositifs de ventilation.

Tableau 12 - Exigences thermiques à respecter dans la Région de Bruxelles-Capitale pour les rénovations lourdes et simples (CSTC, 2014)

Élément de construction	U_{max} (W/m ² .K)	R_{min} (m ² .K/W)
1. PAROIS DELIMITANT LE VOLUME PROTÉGÉ , à l'exception des parois formant la séparation avec un volume protégé adjacent.		
1.1. PAROIS TRANSPARENTES, à l'exception des portes et portes de garage (voir 1.3), des murs-rideaux ⁽¹⁾ (voir 1.4) et des parois en briques de verre (voir 1.5) [et des parois transparentes autres que le verre ⁽²⁾]	$U_{W,max} = 1.80$ $U_{D,max} = 1.10$	
1.2. PAROIS OPAQUES, à l'exception des portes et portes de garage (voir 1.3) et des murs-rideaux ⁽¹⁾ (voir 1.4)		
1.2.1. toitures et plafonds	0.24	
1.2.2. murs non en contact avec le sol, à l'exception des murs visés en 1.2.4.	0.24	
1.2.3. murs en contact avec le sol		1.50
1.2.4. parois verticales et en pente en contact avec un vide sanitaire ou avec une cave en dehors du volume protégé		1.40
1.2.5. planchers en contact avec l'environnement extérieur [ou au-dessus d'un espace adjacent non chauffé] ⁽³⁾	0.30	
1.2.6. autres planchers (planchers sur terre-plein, au-dessus d'un vide sanitaire ou au-dessus d'une cave en dehors du volume protégé, planchers de cave enterrés)	0.30	1.75
1.3. PORTES ET PORTES DE GARAGE (cadre inclus)	$U_{D,max} = 2.00$	
1.4. MURS-RIDEAUX ⁽⁴⁾	$U_{CW,max} = 2.00$ $U_{D,max} = 1.10$	
1.5. PAROIS EN BRIQUES DE VERRE	2.00	
1.6. [PAROIS TRANSPARENTES AUTRES QUE LE VERRE à l'exception des portes et portes de garage (voir 1.3), des murs-rideaux (voir 1.4) ⁽²⁾]	2.00 $U_{D,max} = 1.60$ ⁽⁴⁾	
2. PAROIS ENTRE 2 VOLUMES PROTÉGÉS SITUÉS SUR DES PARCELLES ADJACENTES	1.0	
3. LES PAROIS OPAQUES SUIVANTES À L'INTÉRIEUR DU VOLUME PROTÉGÉ OU ADJACENT À UN VOLUME PROTÉGÉ SUR LA MÊME PARCELLE à l'exception des portes et portes de garage:		
3.1. ENTRE UNITÉS D'HABITATION DISTINCTES		
3.2. ENTRE UNITÉS D'HABITATION ET ESPACES COMMUNS (cage d'escalier, hall d'entrée, couloirs, ...)	1.0	
3.3. ENTRE UNITÉS D'HABITATION ET ESPACES À AFFECTATION NON RÉSIDENTIELLE		
3.4. ENTRE ESPACES À AFFECTATION INDUSTRIELLE ET ESPACES À AFFECTATION NON INDUSTRIELLE		
(1) « façades légères » en Région flamande (2) Région flamande (3) Région wallonne (4) Indiqué « $U_{D,max}$ » dans l'arrêté		

Tableau 13 - Valeurs U maximales admissibles (W/m².K) ou valeurs R minimales (m².K/W) à réaliser en Région wallonne, en Région de Bruxelles-Capitale et en Région flamande (CSTC, 2014)

		Besoin en énergie pour le chauffage	Besoin en énergie pour le refroidissement	Étanchéité à l'air	Pourcentage de surchauffe	Énergie primaire
Passif Niveau non réglementaire	Résidentiel	≤ 15 kWh/m ² .an		≤ 0,6 h ⁻¹	≤ 5 %	
	Tertiaire	≤ 15 kWh/m ² .an	≤ 15 kWh/m ² .an	≤ 0,6 h ⁻¹	≤ 5 %	95-(2,5 x C*)
Basse énergie Niveau non réglementaire	Résidentiel	≤ 60 kWh/m ² .an				≤ 150 kWh/m ² .an
	Tertiaire	≤ 45 kWh/m ² .an				
Très basse énergie Niveau non réglementaire	Résidentiel et tertiaire	≤ 30 kWh/m ² .an				≤ 95 kWh/m ² .an

Tableau 14 - Définition des standards énergétiques (pmp, 2014)

ANNEXE 2

ETAT DE L'ART : BILANS THERMIQUES

Paroi	Surface	U (W/m ² K)	Composition	Part dans le bilan
Façade	78 m ²	2,3	19 cm brique, 2 cm ciment.	21 %
Ouvertures	30 m ²	4,6	Châssis bois et simple vitrage.	27 %
Toiture	100 m ²	2,4	Tuiles, sous-toiture et charpente	37 %
Sol	75 m ²	3,9	20 cm de béton.	15 %

Tableau 4 : Bilan thermique pour une maison mitoyenne de 216m² et 650m³

Paroi	Surface	U (W/m ² K)	Composition	Part dans le bilan
Façade	178 m ²	2,3	19 cm brique, 2 cm ciment.	46 %
Ouvertures	30 m ²	4,57	Châssis bois et simple vitrage.	16 %
Toiture	100 m ²	2,4	Tuiles, air et planches de bois.	27 %
Sol	75 m ²	3,88	20 cm de béton.	11 %

Tableau 5 : Bilan thermique pour une maison 3 façades de 216m² et 650m³

Paroi	Surface	U (W/m ² K)	Composition	Part dans le bilan
Façade	34 m ²	2,3	19 cm brique, 2 cm ciment.	42 %
Ouvertures	23 m ²	4,57	Châssis bois et simple vitrage.	58 %

Tableau 6 : Bilan thermique pour un appartement 2 façades de +/-115m² et 350m³**Tableau 15 - Bilans thermiques
(Bruxelles-Environnement, 2010)****ANNEXE 3**

ETAT DE L'ART : LES CHASSIS

Uw en W/m ² K	Double ouvrant	Simple ouvrant	Guillotine	Petit-bois	Métallique	Bow-window
Dispositif 2 Double vitrage	1,78	1,84	/	/	/	1,99
Dispositif 3 Simple vitrage feuilleté	2,90	2,90	3,05	2,71	3,70	2,61
Dispositif 3 Double vitrage mince	/	/	1,73	1,72	2,14	/
Dispositif 5 Double châssis intérieur simple vitrage	2,36	2,40	2,44	2,17	2,77	2,02
Dispositif 5 Double châssis intérieur double vitrage	1,71	1,72	1,74	1,63	1,93	1,52
Châssis neuf double vitrage	1,48	1,45	/	1,61	1,57	1,91
Châssis neuf triple vitrage	0,76	0,72	/	/	1,12	/

**Tableau 16 - U_w des dispositifs d'amélioration d'un châssis
(Bruxelles Environnement)**

	Ug en W/m ² K
Dispositif 2 - Double vitrage	1,6
Dispositif 3 - Simple vitrage feuilleté	3,2
Dispositif 3 - Double vitrage mince	1,3
Dispositif 4 - Survitrage	5,8
Dispositif 5 - Double châssis intérieur simple vitrage	5,8
Dispositif 5 - Double châssis intérieur double vitrage	2,9
Châssis neuf double vitrage	1,1
Châssis neuf triple vitrage	0,5

**Tableau 17 - U_g des dispositifs d'amélioration
d'un châssis
(Bruxelles Environnement)**

ANNEXE 4

ETAT DE L'ART : LES ISOLANTS

Type de matériau isolant	Ecobilan	Performance thermique (confort hivernal/confort estival)	Performance acoustique	santé	coût
Naturel	😊	😊/😊	😊	😊*	😊
Minéral	😊	😊/😊	😊	😊	😊
pétrochimique	😞	😊/😞	😞	😞	😊

(*) Durant l'insufflage des flocons de cellulose, un masque à poussière et des lunettes sont indispensables. Une fois le matériau d'isolation placé, il n'y a plus de danger.

Tableau 18 - Comparatif des types d'isolant (Bruxelles-Environnement, 2010)

	Application					Autres remarques	Mise en oeuvre					
	Murs à coulisse	Mur à ossature bois	Planchers	Toits plats	Toits en pente		granulés/ flocons	matelas	Panneaux rigides	Panneaux semi-rigides	Panneaux flexibles	Blocs
Laine de verre	X		X	X	X			X	X	X		
Laine de roche	X		X	X	X			X	X	X		
Verre cellulaire			X	X	X	Application la plus courante : en pied de mur, sur les fondations (contre les ponts thermiques)			X			X
Perlite	X		X	X	X	Renovations! (projeter dans une coulisse existante)	X		X			
Vermiculite	X		X	X	X		X		X			
Granulés de mousse de silicate	X					Renovations! (projeter dans une coulisse existante)	X					
Polystyrène expansé	X		X	X	X				X			X
Polystyrène extrudé	X		X	X	X				X			X
Polyuréthane	X		X	X	X				X			X
Cellulose		X	X		X	Renovations: remplit aussi les espaces irréguliers et difficilement accessibles	X				X	
Fibres de bois	X	X	X	X	X	- Les panneaux résistants à l'eau : aussi comme panneau de sous-toiture ou revêtement d'une paroi. - Performance acoustique : comme couche de désolidarisation entre la structure portante et le revêtement - Plafonds			X	X	X	
Lin		X		X	X	- Sous les planchers en bois - Dans les cloisons intérieures		X			X	
Chanvre		X		X	X	- Sous les planchers en bois - Dans les cloisons intérieures		X			X	
Laine de mouton						- Dans les cloisons intérieures et les planchers intermédiaires - Plafonds acoustiques - Isolation de conduites - Pose verticale: besoin d'un lattage		X				
Liège expansé	X	X	X	X	X	- Panneaux: sous les planchers en bois et chapes - En zones humides - Performances acoustiques: Comme couche de désolidarisation entre structure portante et revêtement	X		X			

Tableau 19 - Comparatif des applications et mises en œuvre d'isolant (Bruxelles-Environnement, 2010)

	Coût	Epaisseur (mm)
Laine de verre	5 - 18 €/m ³	40 - 180
Laine de roche	5 - 18 €/m ³	40 - 180
Verre cellulaire	25 - 35 €/m ³	40 - 60
Perlite	0,1 - 0,2 €/l	/
Vermiculite	0,1 - 0,2 €/l	/
Granulés de mousse de silicate	39* €/m ³	120
Polystyrène expansé	5 - 15 €/m ³	40 - 120
Polystyrène extrudé	7 - 25 €/m ³	40 - 120
Polyuréthane	6,5 - 27,5 €/m ³	20 - 120
Cellulose (flocons)	0,13 €/l	/
Fibres de bois	7 - 24 €/m ³	30 - 100
Lin	14,04 €/m ²	120
Chanvre	5 - 30 €/m ³	50 - 200
Laine de mouton	0,7 - 1,2 €/kg	/
Liège expansé (panneau)	5 - 12** €/m ²	20 - 180

(*) Livré sur place (insufflé) sur une épaisseur de 12 cm
 (**) Prix de panneaux de liège. Le liège en vrac coûte 0,2 €/l.

Tableau 20 - Comparatif des coûts d'isolant
 (Bruxelles-Environnement, 2010)

ANNEXE 5

ANALYSE DE CAS : MAISON HANKAR – SAINT-GILLES

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Densité apparente	350 kg/m ³
Conductivité thermique utile	$\lambda = 0,066$
Consommation théorique	3,5 kg/m ² /cm
Rapport eau/UNILIT 20	0,7 l/kg
Perméabilité à la vapeur d'eau	$\mu = 10$
Classement au feu	Classe 0
PH	> 10,5
Absorption acoustique	Bonne
Emballage	Sacs de 13 kg
Stockage en milieu adapté	6 mois

Tableau 21 - Caractéristiques techniques de l'UNILIT
 (Arte Constructo, 2006)

Total des coûts supplémentaires			
1.	Surcoûts liés à l'Energie (isolation, triple vitrage, VMC...)	36.358	€
2.	Surcoûts liés à l'Eco-Construction (citerne, bois labellisé)	3.957	€
3.	Honoraires supplémentaires Architecte	10.000	€
4.	Honoraires supplémentaires Conseiller Energie	4.719	€
	TOTAL	55.034	€ TVAC
Total des subsides et autres économies			
1.	Primes Régionales Basse Energie	18.190	€
2.	Prime 'Bâtiments exemplaires'	28.174	€
3.	Déductions fiscales	7.800	€
	TOTAL	54.164	€
Economie annuelle de combustible			
1.	Economie de consommation annuelle	1.430	€/an
2.	Réduction de la consommation d'eau	100	€/an
3.	Réduction de la consommation pour l'ECS	122	€/an
	TOTAL	1.652	€/an
Rentabilité économique			
1.	Rentabilité sans primes	33	ans
2.	Rentabilité sans prime 'Bâtiments exemplaires'	18	ans
3.	Rentabilité avec prime 'Bâtiments exemplaires'	1	ans

Tableau 22 - Détail des coûts de la rénovation énergétique de la Maison Hankar (Closson, et al., 2013)

ANNEXE 6

ANALYSE DE CAS : CPAS - FOREST

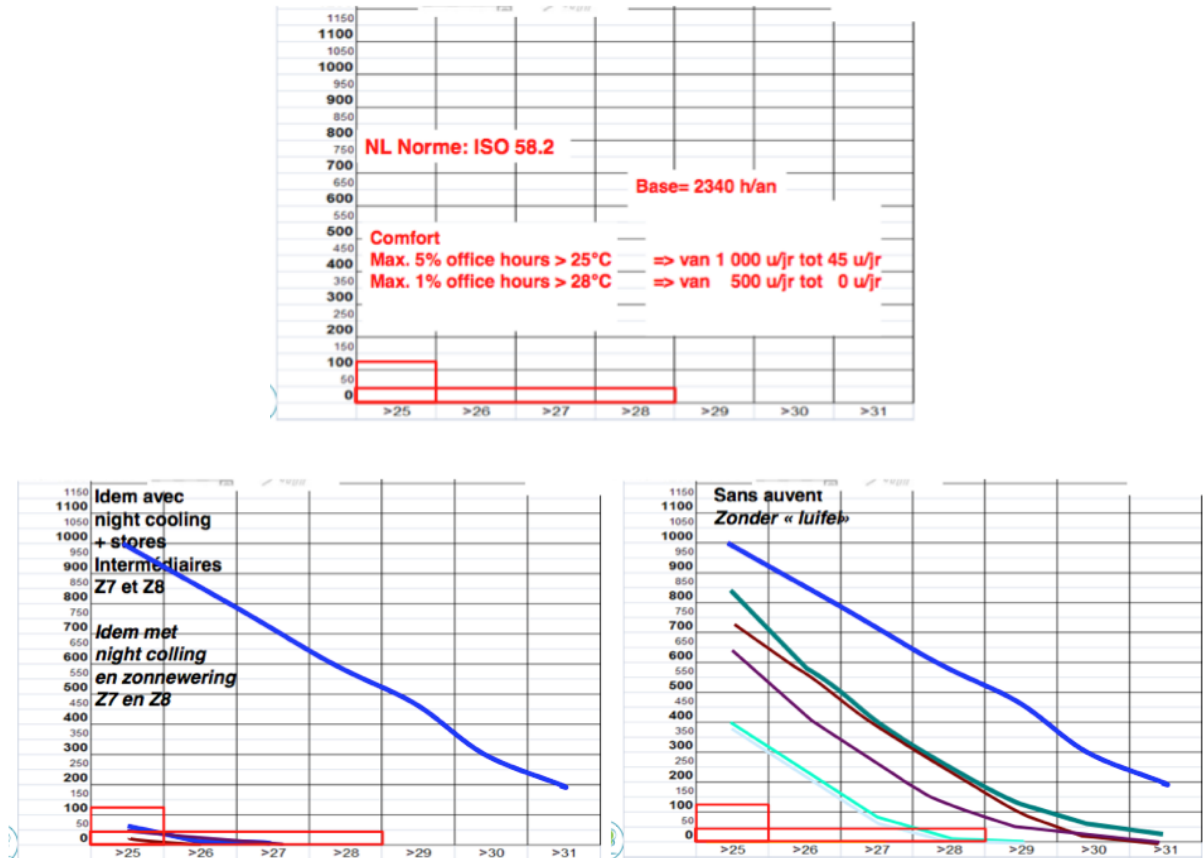


Tableau 23 - Calcul des heures de surchauffe (Willem, 2013)

ANNEXE 7

MÉTHODOLOGIE : LA TOITURE

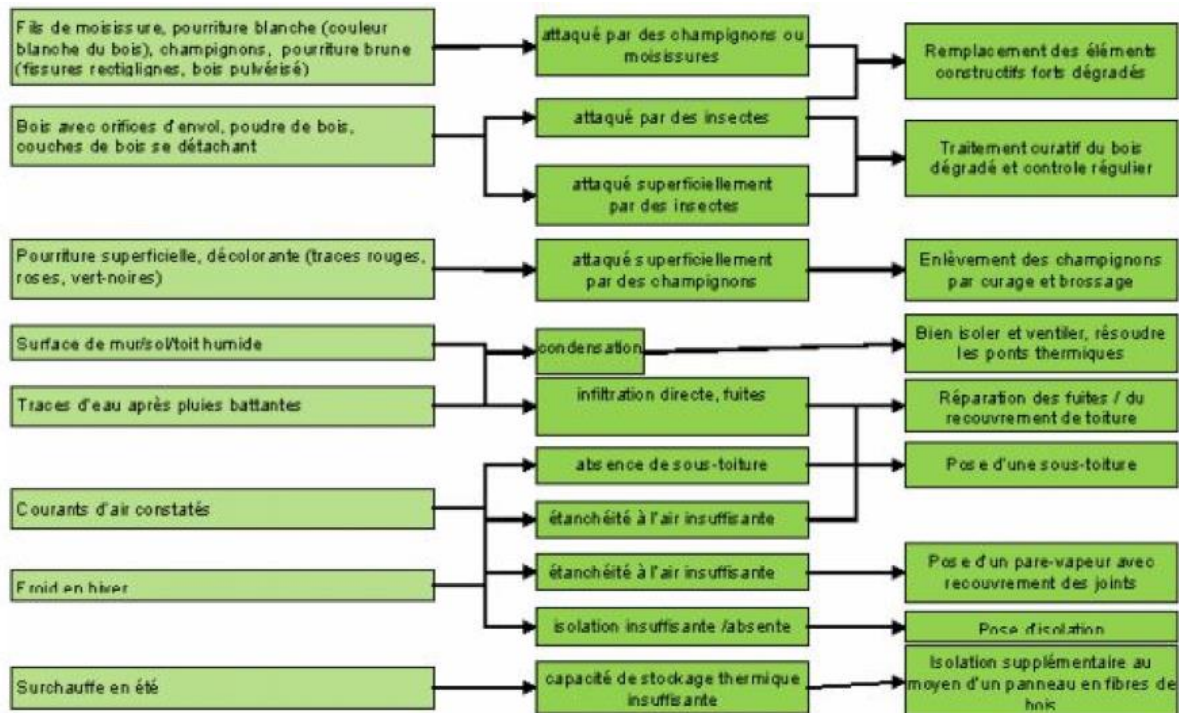


Tableau 24 - Détail des dégradations d'une toiture à versants (Bruxelles Environnement, 2009)

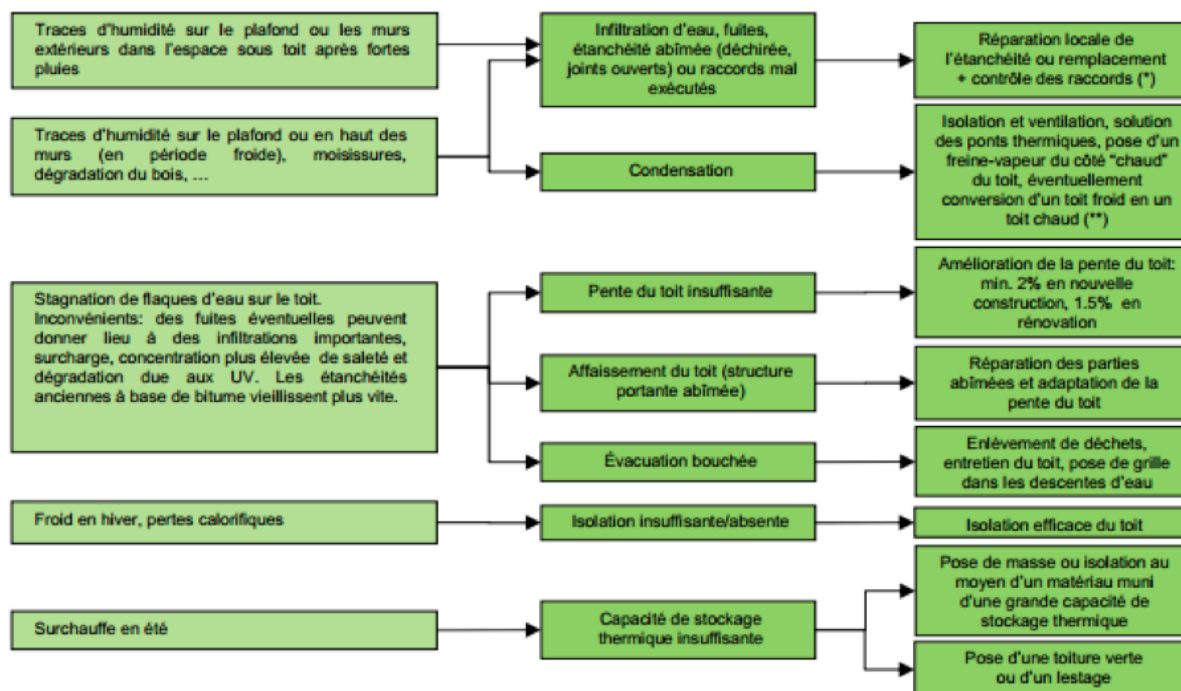


Tableau 25 - Détail des dégradations d'une toiture plate (Bruxelles Environnement, 2009)

ANNEXE 8

MÉTHODOLOGIE : LES CHÂSSIS

SURFACE S DU VITRAGE (m ²)		< 0,25	0,25 ≤ S < 2	2 ≤ S < 6	S ≥ 6
HAUTEUR UTILE DE FEUILLURE MINIMALE	Simple vitrage	10 mm	13 mm	18 mm	25 mm(*)
	Double vitrage	18 mm	18 mm	18 mm	25 mm(*)

(*) En pratique, cela correspond au cas des châssis fixes et/ou des vitrines; une hauteur de feuillure de 25 mm est nécessaire dans ces cas compte tenu des tolérances sur les vitrages et pour la facilité de pose des vitrages vu leurs dimensions.

Tableau 26 - Hauteur utile de feuillure minimale (CSTC, 2001)

TYPE DE VITRAGE	ÉPAISSEUR MINIMALE DU VITRAGE	LARGEUR UTILE DE FEUILLURE MINIMALE	
		Mastic	Profilé d'étanchéité
Double vitrage ou double vitrage haut rendement	4-12-4 = 20 mm 4-15-4 = 23 mm	28 mm 31 mm	26 mm 29 mm
Double vitrage de sécurité (avec verre feuilleté)	4-12-33.2 = 23 mm 4-12-44.2 = 25 mm	31 mm 33 mm	29 mm 31 mm
Double vitrage acoustique - dissymétrique - avec verre feuilleté	4-12-8 = 24 mm 6-15-44.2 = 30 mm	32 mm 38 mm	30 mm 36 mm

Tableau 27 - Largeur utile de feuillure minimale (CSTC, 2001)

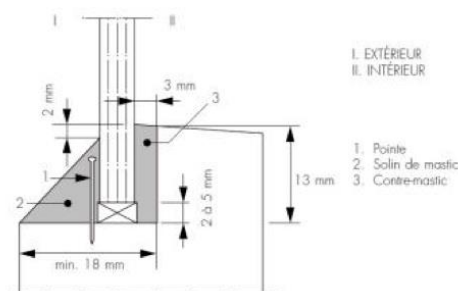


Figure 139 - Pose d'un simple vitrage (CSTC, 2001)

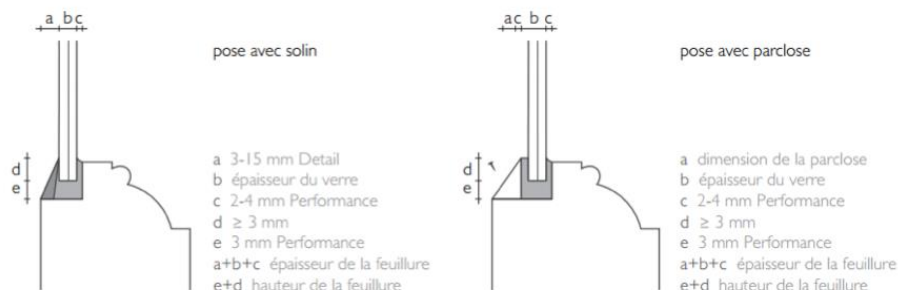


Figure 140 - Pose d'un simple vitrage (Van Ruysdael, 2014)

BIBLIOGRAPHIE

A2M. 2010. Dossier de presse. 2010.

Architecture et Climat. 2013. Améliorer la toiture. *Energie+*. [En ligne] 8, DGO4, 2013. <http://www.energieplus-lesite.be>.

— **2013.** Améliorer les murs. *Energie+*. [En ligne] 8, DGO4, 2013. <http://www.energieplus-lesite.be>.

— **2013.** Améliorer les planchers inférieurs. *Energie+*. [En ligne] 8, DGO4, 2013. <http://www.energieplus-lesite.be>.

— **2013.** Choix d'un chauffage électrique. *Energie+*. [En ligne] 8, DGO4, 2013. <http://www.energieplus-lesite.be>.

— **2013.** Faut-il ajouter une sous-toiture lorsqu'on isole le versant d'une toiture existante ? *Energie+*. [En ligne] 8, DGO4, 2013. <http://www.energieplus-lesite.be>.

— **2013.** La consommation d'électricité et de combustible des bureaux. *Energie+*. [En ligne] 8, 2013. <http://www.energieplus-lesite.be>.

— **2013.** Le choix de l'émetteur de chaleur. *Energie+*. [En ligne] 8, DGO4, 2013. <http://www.energieplus-lesite.be>.

— **2013.** Les chaudières à condensation. *Energie+*. [En ligne] 8, DGO4, 2013. <http://www.energieplus-lesite.be>.

— **2013.** Les chaudières au bois-énergie. *Energie+*. [En ligne] 8, DGO4, 2013. <http://www.energieplus-lesite.be>.

— **2013.** L'inertie thermique. *Energie+*. [En ligne] 8, DGO4, 2013. <http://www.energieplus-lesite.be>.

Arte Constructo. 2006. *UNILIT 20 (VOLCALITE) : Mortier minéral d'isolation thermique*. 2006. Fiches techniques UNILIT.

AUP, Pouget Consultants et Groleau, D. 2010. Guide pour la rénovation énergétique des bâtiments anciens. *Grand Poitiers*. [En ligne] 2010. <http://www.grandpoitiers.fr>.

AW Architectes. 2013. Dossier de présentation du projet. 2013.

— **2010.** *Présentation au ministère et aux locataires : Résidence "La Belle Jardinière", rénovation d'un building de 211 appartements*. 2010.

Barroso, José-Manuel. Europe 2020. *Commission Européenne*. [En ligne] <http://ec.europa.eu>.

Bertrand, Jérôme. 2008. *Le châssis de fenêtres en bois : concilier patrimoine et énergie. Carnet d'entretien. Collection l'Art dans la rue*. Bruxelles : Direction des Monuments et Sites, 2008. pp. 30-39.

Biofib' isolation. Biofib' chanvre. *Biofib' isolation : L'isolation naturelle et performante*. [En ligne] <http://www.biofib-isolation.com>.

BPIE. Consumption levels by different building types and age groups. *BPIE - Data Hub for the energy performance of buildings*. [En ligne] <http://www.buildingsdata.eu>.

Branders, Aline et Evrard, Arnaud. 2011. *Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines : guide d'aide à la conception*. Louvain-la-Neuve : Architecture & Climat, 2011.

Breuls, Virginie et Geelkens, Mélanie. 2014. *20 histoires de rénovation, entre respect de l'environnement, défis énergétiques, valorisation de l'identité patrimoniale et souci de la qualité de vie*. Cluster Eco-construction, 2014.

Brombart, Nicolas et Van der Stricht, Marc. 2014. *Rencontre: Maison Hankar (Marc Van der Stricht Architecte)*. [interv.] Anne-Claire Olivier. Bruxelles, 13 Mars 2014.

Bruxelles Environnement. *Choisir le meilleur mode de production de chaleur*. Bruxelles Environnement. Info fiche Bâtiment Durable.

— Choix durable des châssis. *Guide Bâtiment durable*. [En ligne] <http://guidebatimentdurable.bruxellesenvironnement.be>.

— **2010.** *CPAS Rue Vanpé [014] : Comment allier patrimoine et développement durable*. Bruxelles Environnement, 2010. Info fiche Bâtiment Exemple 2007 .

— G_ENE02 Concevoir un système de ventilation énergétiquement efficace. *Guide Bâtiment Durable*. [En ligne] <http://guidebatimentdurable.bruxellesenvironnement.be>.

— G_ENE03 Diminuer les pertes par transmission. *Guide Bâtiment Durable*. [En ligne] <http://guidebatimentdurable.bruxellesenvironnement.be>.

— G_ENE08 Choisir le meilleur mode de production et de stockage pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. *Guide Bâtiment Durable*. [En ligne] <http://guidebatimentdurable.bruxellesenvironnement.be>.

— G_MAT04 Choix durable des matériaux d'isolation thermique. *Guide Bâtiment Durable*. [En ligne] <http://guidebatimentdurable.bruxellesenvironnement.be>.

- **2011.** Hankar [077] *Rénovation et extension d'une maison mitoyenne unifamiliale 2 façades*. Bruxelles Environnement, 2011. Info fiche Bâtiment exemplaire 2009.
- **2010.** *Isolation thermique : choisir des matériaux sains et écologiques*. Bruxelles : Bruxelles-Environnement, Juillet 2010. Info fiche Bâtiment Durable.
- **2009.** *Isolation thermique et acoustique. Opter pour des matériaux sains présentant un écobilan favorable*. Bruxelles Environnement, Mars 2009. Info fiche Eco-construction.
- **2009.** *Rénover un toit en pente*. Bruxelles Environnement, 2009. Info fiche Eco-construction.
- **2009.** *Rénover une toiture plate*. Bruxelles Environnement, 2009. Info fiche Eco-construction.
- Bureau Coupeuz et Associés. 2011.** Dossier de présentation du projet. 2011.
- Closson, Sophie et Claes, Thierry. 2013.** Projet "Hankar": Expérience d'un maître d'ouvrage. [En ligne] 2013. <http://centreurban.wavenet.be>.
- Cohen, Maurizio. 2011.** Une rénovation. *Be.passive*. Juillet-Août-Septembre 2011, 8, p. 67.
- comprendrechoisir.com.** Isolants : comparatifs des matériaux d'isolation et isolants. *Isolation : mieux comprendre pour bien choisir*. [En ligne] <http://isolation.comprendrechoisir.com>.
- Conseil Central de l'Economie. 2009.** *Le secteur de la construction constitue-t-il un moteur de croissance pour l'économie belge?* [éd.] P.M.E, Classes moyennes et Energie SPF Economie. 2009. p. 66.
- Conseil de l'Europe. 1975.** *Charte Européenne pour le patrimoine architectural*. Amsterdam : 1975.
- Construire Durable. 2014.** Tableaux comparatifs des différents isolants. *construire-durable.com*. [En ligne] 2014. <http://www.construire-durable.com>.
- Coppens, M. et Mme. 2014.** *Echange de mails avec les propriétaires*. [interv.] Anne-Claire Olivier. Juin 2014.
- Coupez, Joël. 2014.** *Rencontre: Abbaye de Grandpré à Gesves (Bureau Coupeuz Architectes)*. [interv.] Anne-Claire Olivier. La Hulpe, 21 Mars 2014.
- Crehay, Romain et Marchal, Didier. 2004.** *La filière bois-énergie*. [éd.] ValBiom (Valorisation de la biomasse asbl) – DGTRE. 2004. p. 45.
- CSTC. 2010.** Aménagement des espaces sous toiture. *Les dossiers du CSTC*. 2010, 2, pp. 1-7.
- **2001.** NIT 221 : La pose des vitrages en feuillure. Septembre 2001.
- **2014.** Réglementation sur la Performance Energétique (RPE). *CSTC*. [En ligne] Février 2014. <http://www.cstc.be>.
- De Meester, T. 2009.** *Guide de la rénovation basse énergie des logements en Belgique*. [éd.] LEHR. Louvain-la-Neuve : Architecture et Climat, 2009.
- De Smet, Camille. 2013.** *Rénovation des maisons bruxelloises au standard passif, TBE ou BE : Bâtiments exemplaires*. Bruxelles Environnement, 31 Mai 2013. Séminaire Bâtiment Durable. p. 14-18.
- Delmotte, C. 2005.** La directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments. *CSTC*. [En ligne] 2005. <http://www.cstc.be>.
- Département de l'énergie et du Bâtiment durable. 2013.** Appliquer la réglementation wallonne - PEB. *Portail de l'Energie en Wallonie*. [En ligne] 2013. <http://energie.wallonie.be>.
- Deruyver, Thomas. 2014.** *Patrimoine & Energie : exemples*. [éd.] pmp. 2014.
- Detremmerie, V., Flamant, G. et Michaux, V. 2012.** Rénovation des fenêtres existantes : remplacement ou autres solutions ? *CSTC*. [En ligne] 2012. <http://www.cstc.be>.
- Dewez, Bénédicte et Di Campli, Flavio. 2004.** Patrimoine - Inventaire du Patrimoine Immobilier Culturel (IPIC), Immeuble à appartements. *Service public de Wallonie Direction générale opérationnelle - Aménagement du territoire, Logement, Patrimoine et Energie*. [En ligne] 2004. <http://spw.wallonie.be/dgo4/>.
- DGO4 - IPW - Centre de la Paix-Dieu.** *Le guide du propriétaire de monument : Brochure didactique à l'attention des propriétaires de bâtiments classés*. [éd.] Région Wallonne. Namur.
- DGUHC, et al. 2007.** *Rapport de synthèse : Connaissance de bâtiments anciens & économies d'énergie*. Août 2007.
- DMS.** Comment protège-t-on ? *Direction des Monuments et des Sites de la Région de Bruxelles-Capitale*. [En ligne] <http://www.monument.irisnet.be>.
- Dobbels, F. 2009.** Isolation thermique des toitures à versants existantes. [éd.] CSTC. *CSTC - Contact*. Septembre 2009, 23.
- Durable.** Isolation écologique. *Durable - Prenons le temps*. [En ligne] <http://isolation.durable.com>.
- Ecobati.** Isolation thermique naturelle. *Ecobati*. [En ligne] <http://www.ecobati.be>.
- Unilit 20 - mortier minéral d'isolation thermique. *Ecobati*. [En ligne] <http://www.ecobati.be>.
- Entranze. 2008.** Share of dwellings built before 1980 in total stock. *Policies to ENforce the TRAnSition to NEarly Zero Energy buildings in the EU-27*. [En ligne] 2008. <http://www.entranze.enerdata.eu>.
- **2008.** Total unit consumption per m2 in buildings (at normal climate). *Policies to ENforce the TRAnSition to NEarly Zero Energy buildings in the EU-27*. [En ligne] 2008. <http://www.entranze.enerdata.eu>.

- Epuval. 2010.** Filière d'épuration individuelle des eaux usées par filtre végétalisé Epuval 5G 1-5EH. *Epuval*. [En ligne] 2010. <http://www.epuval.eu>.
- Evrard, Arnaud. 2011.** *Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines, étude de cas : tour à Omal*. Louvain-la-Neuve : Architecture et Climat, 2011.
- Filloux, Alain. 2010.** *Intégrer les énergies renouvelables*. Nancy : CSTB, 2010. p. 127.
- Fragos, Trouilleux. 2012.** *Le guide de l'isolation*. Paris : comprendrechoisir.com, 2012.
- Fraunhofer IBP. WUFI. WUFI.** [En ligne] <http://www.wufi.de>.
- Fruchart, Valentine. 2011.** *BATEX: Evolution d'une référence constructive*. Bruxelles Environnement, 2011. Formation "L'énergie dans les bâtiments durables". P. 20-24.
- GDF Suez.** L'isolation des combles et des toitures-terrasses. *GDF Suez*. [En ligne] <http://www.gdfsuez-dolcevit.fr>.
- GERON, G.** *Circulaire relative aux interventions sur monuments classés en matière de châssis*. Jambes : DGO4 – Département du Patrimoine : Direction de la Restauration.
- Glavie, Yvan.** G_ENE03 Diminuer les pertes par transmission. *Guide Bâtiments Durable*. [En ligne] <http://guidebatimentdurable.bruxellesenvironnement.be>.
- G_MAT11 Choix durable des revêtements de sol intérieurs. *Guide Bâtiment Durable*. [En ligne] <http://guidebatimentdurable.bruxellesenvironnement.be>.
- Hauglustaine, Jean-Marie et Simon, Francy. 2002.** Guide pratique pour les architectes: L'isolation thermique de la toiture plate. *Portail de l'énergie en Wallonie*. [En ligne] 2002. <http://energie.wallonie.be>.
- **2002.** *La rénovation et l'énergie - Guide pratique pour les architectes*. Ministère de la Région Wallonne, 2002.
- Hygroba. 2013.** *Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes*. Cahier n°0 : Généralités, 2013.
- Icomos. 1964.** *Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites*. Venise : 1964.
- International Energy Agency. 2011.** *lea : Working together to ensure reliable, affordable and clean energy. Belgium : Final consumption (2011)*. [En ligne] 2011. <http://www.iea.org>.
- Jourquin, Matthieu. 2010.** *Conservation et/ou éco-rénovation des châssis du bâti ancien bruxellois?* Bruxelles : Travail personnel, 2010.
- La Maison Ecologique. 2010.** Passez à l'isolation écologique : le tableau comparatif des principaux isolants. *Ecowizz*. [En ligne] 2010. <http://www.ecowizz.net>.
- LEMA, ULg ; Architecture et Climat, UCL.** Le parc de logement wallon : présentation, évaluation et approche de son évolution. *Projet SAFE (Suburban Areas Favoring Energy efficiency)*. [En ligne] <http://www.safe-energie.be>.
- Levy, Pierre, et al. 2011.** Guide sur les reprises de fenêtres en bois dans le bâti ancien. *Grand Poitiers, communauté d'agglomération*. [En ligne] 2011. <http://www.grandpoitiers.fr>.
- 2008.** L'histoire. *L'abbaye de Grandpré*. [En ligne] 2008. <http://www.abbayedegrandpre.be>.
- Loncour, X., et al. 2013.** *Les Dossiers du CSTC : L'isolation intérieure des murs existants : systèmes et dimensionnement*. Bruxelles : 2013.
- Lorenzi, Pierre. s.d..** Dossier de présentation du projet. s.d.
- Le patrimoine. *Moulin castral de Hologne-sur-Geer - 1646*. [En ligne] <http://www.moulindugeer.be>.
- **2014.** *Rencontre: Moulin castral de Hologne-sur-Geer (Pierre Lorenzi)*. [interv.] Anne-Claire Olivier. Hologne-sur-Geer, 24 Avril 2014.
- Luyckx, Frédéric. 2014.** *En restauration, conservation, restauration et amélioration des châssis : Dispositifs et éléments du choix durable*. Bruxelles : Bruxelles-Environnement, Bruxelles-Environnement, 2014. Formation Bâtiment Durable: Menuiseries extérieures, comment choisir?
- Mahiels, F.** La Promenade du Geer – Le circuit par Omal : le refuge. *Omal*. [En ligne] <http://www.omal-epouvantail.be>.
- Marchal, Martine. 2010.** Les châssis anciens vont-ils tous disparaître? *Le Journal de la Restauration*. Juillet-Août-Septembre 2010, Vol. 19, p. 3.
- MATRIciel. 2010.** Fiche 3.2 : comparatif des systèmes de chauffage et ECS pour les maisons individuelles et les immeubles à appartements en conception passive et rénovation basse énergie. *Bruxelles-Environnement*. [En ligne] 2010. <http://documentation.bruxellesenvironnement.be>.
- Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale - AATL - DMS. 2014.** *Registre du patrimoine immobilier protégé dans la Région de Bruxelles-Capitale*. Bruxelles : 2014.
- Ministère de la Région Wallonne. 2007.** Art. 237/2 : Décret-cadre modifiant le Code wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme et du Patrimoine en vue de promouvoir la performance énergétique des bâtiments. 2007.
- Ministère du Logement. 2009.** *Diagnostic de Performance Energétique*. 2009. Guide de Recommandations.

- Moreno-Vacca, Sébastien. 2011.** *Rénovation du CPAS de Forest*. A2M sprl, 2011.
- MPF. 2011.** Fiche 1 - Connaissance du bâti ancien. *Maisons Paysannes de France*. [En ligne] 2011. <http://www.maisons-paysannes.org>.
- **2011.** Fiche 3 - Interventions à réaliser, à éviter. *Maisons Paysannes de France*. [En ligne] 2011. <http://www.maisons-paysannes.org>.
- **2013.** *Présentation du projet ATHEBA PRO (Amélioration Thermique du Bâti Ancien)*. Paris, France : Ministère de l'Écologie, du développement Durable, de l'Énergie et du Logement, Fédération Française du Bâtiment (FFB), Ministère de la Culture et de la Communication (CAPEB), Fondation du Patrimoine, 2013.
- Oliva, Jean-Pierre et Courgey, Samuel. 2011.** *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en oeuvre en neuf et réhabilitation*. Mens : Terre Vivante, 2011.
- Peissel, Gilles. 2010.** *Le bâti ancien, le patrimoine et l'énergie : Guide de recommandations*. Grenoble : Ville de Grenoble, Service Réhabilitation et Patrimoine Urbain, 2010.
- Pender, Robyn. 2011.** *Energy behaviour in historical buildings: limit and potentiels for the project evaluation*. Louvain-la-Neuve : Architecture et Climat, 2011.
- Petit, Sébastien. 2014.** *Refuge fortifié à Omal (Trio Architecture)*. [interv.] Anne-Claire Olivier. Bruxelles, 13 Mars 2014.
- Physibel.** Exemples. *Glasta*. [En ligne] <http://www.physibel.be>.
- Piéreuse, Philippe. 2013.** Comment concilier respect du patrimoine et nouveaux enjeux environnementaux et énergétiques. [éd.] Association des Amis de l'Unesco. *Les nouvelles du patrimoine : Patrimoine, énergie et environnement*. Janvier-Février-Mars 2013, 138, pp. 17-19.
- pmp. 2014.** Les critères pour le logement et le tertiaire. *Plate-forme Maison Passive*. [En ligne] 2014. <http://www.maisonpassive.be>.
- **2013.** Qu'est ce que le "Blower Door Test" ? Est-il obligatoire ? *Plate-forme Maison Passive*. [En ligne] 2013. <http://www.maisonpassive.be>.
- R.E.D. 2013.** *Patrimoine et énergie - former, innover, dialoguer : les chemins durables*. Projet interrégional ERFIN: Eco-rénovation patrimoniale, formation & innovation, 2013.
- **2013.** Patrimoine et énergie - former, innover, dialoguer : les chemins durables » : Chantier de formation. *Projet interrégional ERFIN « Eco-rénovation patrimoniale: formation & innovation »*. [En ligne] 2013. <http://www.ruraleurope.org>.
- **2013.** Patrimoine et énergie - former, innover, dialoguer : les chemins durables » : Ancien moulin de l'abbaye de Grand-Pré à Gesves (B). *Projet interrégional ERFIN « Eco-rénovation patrimoniale: formation & innovation »*. [En ligne] 2013. <http://www.ruraleurope.org>.
- **2013.** Patrimoine et énergie - former, innover, dialoguer : les chemins durables » : Hydroélectricité. *Projet interrégional ERFIN « Eco-rénovation patrimoniale : formation & innovation »*. [En ligne] 2013. <http://www.ruraleurope.org>.
- **2013.** Patrimoine et énergie - former, innover, dialoguer : les chemins durables » : Immeuble social à Angleur (B). *Projet interrégional ERFIN « Eco-rénovation patrimoniale: formation & innovation »*. [En ligne] 2013. <http://www.ruraleurope.org>.
- **2013.** Patrimoine et énergie - former, innover, dialoguer : les chemins durables » : Manteau isolant en continu. *Projet interrégional ERFIN « Eco-rénovation patrimoniale: formation & innovation »*. [En ligne] 2013. <http://www.ruraleurope.org>.
- Saint-Gobain Glass.** L'Adaptable : Profilés et double vitrage pour rénovation. *Glassolutions Saint-Gobain*. [En ligne] <http://www.glassolutions.be>.
- Smet, Charlotte De. 2013.** *Séminaire "Bâtiment Durable". Rénovation des maisons bruxelloises au standard passif, TBE ou BE : Bâtiments exemplaires*. [prod.] Bruxelles Environnement. Bruxelles : 2013.
- SPF Finances. 2013.** Statistique cadastrale du parc de bâtiments. Belgique et régions. 2013. *Statistics Belgium*. [En ligne] 2013. <http://statbel.fgov.be>.
- SPF.** La contribution des principaux secteurs aux émissions totales et leur évolution. *Le site fédéral belge pour une information fiable sur les changements climatiques*. [En ligne] <http://www.climat.be>.
- SPW - DGO4. 2011.** *Code Wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, du Patrimoine et de l'Énergie (CWATUPE)*. 2011.
- SPW. 2013.** Appliquer la réglementation wallonne - PEB. *Portail de l'énergie en Wallonie*. [En ligne] 2013. <http://energie.wallonie.be>.
- **2013.** *Fiche 5 : Isoler la toiture plate*. 2013. Rénover pour consommer moins d'énergie.
- Steico.** SteicoFlex. *Steico: isoler mieux, naturellement*. [En ligne] <http://www.steico.com>.
- Technichem.** Dossier technique Hydrofuge. *Technichem*. [En ligne] <http://www.technichem.be>.
- TRIO Architecture. 2014.** Dossier de présentation du projet. 2014.

Van Ruysdael. 2014. Détails du châssis. *Van Ruysdael*. [En ligne] 2014. <http://www.vanruysdael.com>.

Wikipedia. 2014. Abbaye de GrandPré. *Wikipedia*. [En ligne] 2014. <http://fr.wikipedia.org>.

—. **2014.** Palais Curtius. *Wikipedia*. [En ligne] 2014. <http://fr.wikipedia.org>

Willem, Julie. 2013. *Rénovation: les bureaux du CPAS de Forest*. Bruxelles : Bruxelles Environnement, 2013. Formation Bâtiment Durable.

LA RENOVATION ENERGETIQUE DES BATIMENTS A INTERET PATRIMONIAL

Au vu du contexte énergétique actuel et des réglementations de plus en plus poussées, la rénovation énergétique des logements constitue actuellement un enjeu majeur. Cependant, le patrimoine est encore peu concerné par ces réglementations et pourtant il présente un potentiel d'économies relativement important et méconnu jusqu'à aujourd'hui. L'objectif de ce travail de fin d'études est de donner un aperçu des solutions et techniques visant la rénovation énergétique des bâtiments à intérêt patrimonial.

Ce travail se divise en trois parties. La première partie décrit les différentes techniques présentes dans la littérature qui concilient rénovation énergétique et conservation du patrimoine. Cette rénovation énergétique peut porter d'une part sur une amélioration de l'enveloppe au niveau de la toiture, des murs extérieurs, du sol et des châssis et d'autre part sur une amélioration des systèmes tels que le chauffage, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et l'électricité.

La deuxième partie de ce travail analyse des cas de rénovation énergétique de bâtiments présentant un intérêt patrimonial. Les techniques mises en œuvre dans ces rénovations sont étudiées selon la même structure : amélioration de l'enveloppe d'une part et amélioration des systèmes d'autre part. Cette analyse porte sur six cas de rénovations résidentielles et tertiaires répartis en Régions Wallonne et Bruxelles-Capitale.

La troisième partie de ce travail développe, sur base des techniques présentées dans la première partie et de l'étude de cas de la deuxième partie, un outil d'aide à la rénovation énergétique à l'attention de propriétaires ou d'architectes concernés par un bâtiment à intérêt patrimonial. Cet outil décisionnel se concentre sur l'amélioration de l'enveloppe et se présente sous la forme de quatre arborescences : toiture, sol, murs extérieurs et châssis. Ces outils décisionnels permettent de présenter les techniques de rénovation énergétique qui sont compatibles avec le respect du patrimoine.