

VERS UN CHOIX D'ISOLANT OPTIMAL POUR LA RÉHABILITATION DURABLE DU PARC DE LOGEMENTS ANCIENS PRIVÉS DE LA VILLE DE LILLE - TYPOLOGIE DE BÂTIMENTS ET COMPARATIF D'ISOLANTS

Emilio SASSINE*, **, Zohir YOUNSI*, **, Yassine CHERIF*, **, Emmanuel ANTCZAK**

*Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), HEI, F-59046 LILLE, France,

**Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE),
Univ d'Artois - Lille Nord de France, F-62400 BÉTHUNE, France

1. INTRODUCTION

L'énergie consommée pour le chauffage constitue une part importante des factures énergétiques en France et notamment à Lille, une ville dans le Nord de la France caractérisée par son climat relativement froid par rapport aux autres villes françaises. Afin de réduire la consommation énergétique, l'isolation thermique est particulièrement importante et offre un investissement important à la fois économique et écologique. Cependant, une isolation performante nécessite l'emploi de matériaux répondants à un certain nombre de critères de performances.

Dans notre cas on s'intéressera aux bâtis anciens individuels lillois datant d'avant 1948 car ceux-ci représentent près de 50% de l'habitat existant et plus de 80% des habitations classées mal isolée dans la ville de Lille. Afin de bien comprendre les différents types de bâtis appartenant à cette catégorie, l'élaboration d'une typologie permettant de

classer les différents types de maisons en ensembles homogènes est nécessaire. Cette méthode est particulièrement adaptée à la région du Nord où les maisons se distinguent par leur remarquable cohésion dans leur distribution et dans leur système constructif.

Après une analyse approfondie des typologies, un cahier des charges pour le matériau isolant a été défini comprenant les critères adaptés aux contraintes de ces différentes typologies.

2. LES TYPOLOGIES

Les trois grandes familles de typologies identifiées sont la maison de courée, la maison de ville et la maison bourgeoise. Ces typologies présentent des ressemblances caractéristiques des constructions de l'Europe du Nord, mais aussi des variantes qu'il faudra prendre en compte dans l'étude thermique.

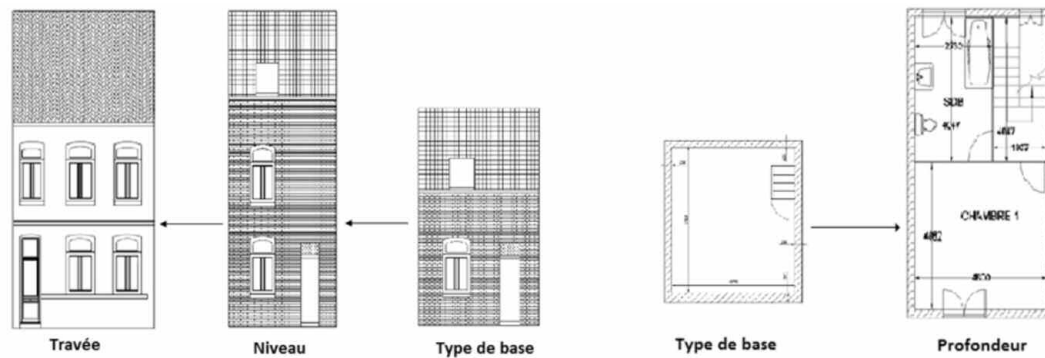


Figure 1 : Variantes morphologiques

2.1. Les constantes

Le système constructif identique pour tous les types se caractérise par des murs de refend porteurs, des façades en briques, et une portée transversale des planchers et de la charpente. La constitution de l'îlot par l'assemblage de maisons le long des rues délimite deux types d'espaces extérieurs différents : la façade extérieure du bâti donne sur l'espace public de la rue, de l'autre côté l'espace privé de la cour ou du jardin. La façade extérieure de la maison témoigne du statut social de ses occupants. Les fenêtres correspondent aux belles pièces de la maison (salon, grande chambre).

2.2. Les variantes

Les trois typologies déjà définies se différencient entre elles et se subdivisent en sous-typologies grâce aux variantes qu'on peut classer en quatre catégories :

- 1) Les variantes morphologiques : on passe d'un type à un autre en ajoutant une ou plusieurs fonctions supplémentaires (profondeur, niveau ou travée) (Figure 1).
- 2) L'aménagement ou pas des combles : cette variante influe sur les déperditions thermiques du bâti, et par la suite sur la façon par laquelle le bâti sera isolé.
- 3) La mitoyenneté (une, deux, voir trois dans le cas des maisons de courées dos à dos) : la mitoyenneté et la morphologie urbaine en général ont une grande influence sur les performances énergétiques des bâti-

ments ; en fait, la mitoyenneté permet de minimiser les surfaces en contact direct avec l'extérieur et par suite les déperditions thermiques des bâtiments.

- 4) L'existence ou pas d'une cave : la cave au sous-sol influe sur les déperditions du bâtiment à travers le sol ; en fait, la cave crée une zone tampon qui diminue les transferts thermiques entre le plancher bas et le sol.
- 5) L'existence d'une extension dans les maisons de ville et les maisons bourgeoises dans la plupart des cas.

2.3. Les trois typologies

2.3.1. La maison de courée (Figures 2, 3, 4, 5 et 6)

Spécifique d'une classe sociale qui se développe à partir du XIX^e siècle avec la première révolution industrielle, ce type d'habitat est le témoin d'une des périodes les plus importantes dans l'histoire régionale : celle où le rôle économique, social et culturel de l'industrie fut exceptionnel. Il répond à la nécessité d'implanter la main d'œuvre à proximité des lieux de production. Les maisons de courées présentent une série de petites maisons accolées (R+C ou R+1+C), répétitives et sans confort, situées à l'intérieur d'un îlot et orientées vers une cour collective qui sert aussi de passage et de localisation des installations sanitaires de base (point d'eau eau, latrines), ce qui induit une grande promiscuité entre les familles, favorisant les conflits de voisinage.

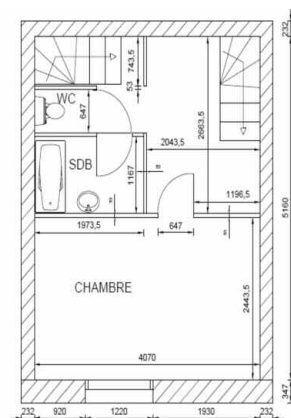


Figure 2 : RDC

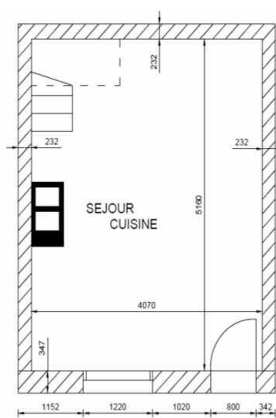


Figure 3 : R+1

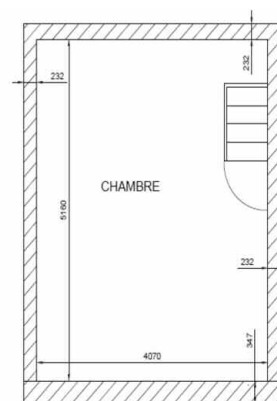


Figure 4 : Combles

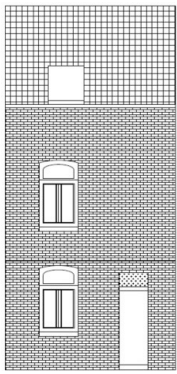


Figure 5 : Vue de face

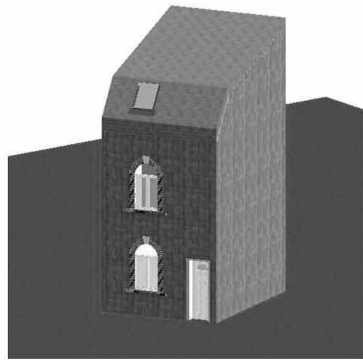


Figure 6 : Vue 3D

2.3.1. La maison de ville (Figures 7, 8, 9, 10, 11, 12 et 13)

Les maisons de ville en mitoyenneté sur rue forment l'essentiel du corps urbain des villes d'Europe du Nord-Ouest et tracent les axes de la ville, rues, avenues, boulevards, et délimitent ainsi les îlots urbains. Maison de tradition familiale R+1+C ou R+2+C, elle se situe en blocage entre deux maisons contiguës sur une trame parcellaire étroite (4 à 7 mètres) et allongée (10 à 20 mètres et plus). Sa répétitivité dans les ensembles des maisons crée les rangs et rangées caractéristiques de l'Europe du Nord-Ouest.

Les maisons de ville présentent souvent une distribution identique : une porte d'entrée et un couloir latéral, puis, en enfilade, la salle à manger, la cuisine et la véranda donnant

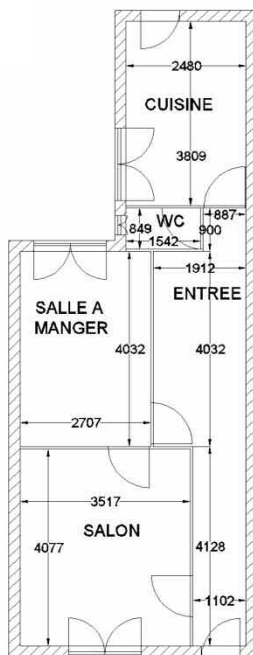


Figure 7 : RDC

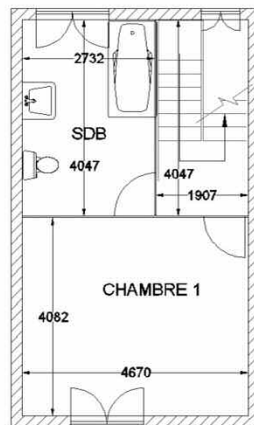


Figure 8 : R+1

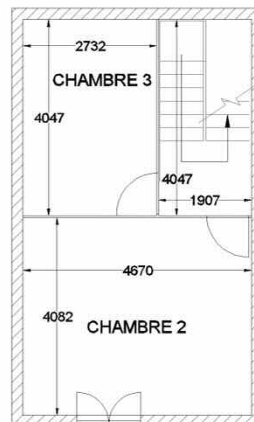


Figure 9 : R+2

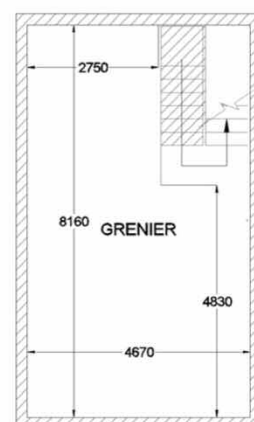


Figure 10 : Combles

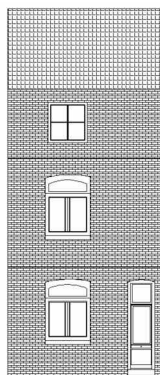


Figure 11 : Vue de face

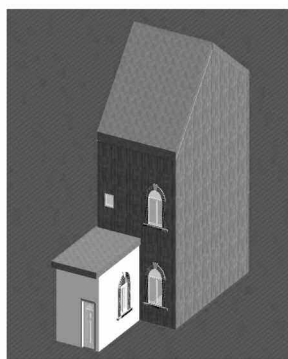


Figure 12 : Vue 3D-a

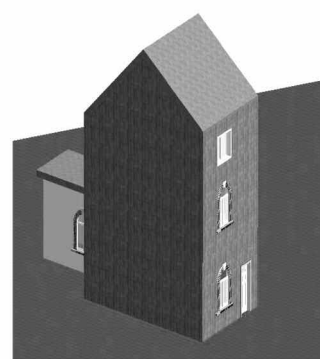


Figure 13 : Vue 3D-b

sur le jardin. A l'étage, une ou deux chambres et une salle de bain en appendice sur l'espace de la cuisine. Au deuxième étage, s'il existe, on trouve deux chambres, puis un grenier. La maison est souvent en partie excavée, l'emplacement de la cave variant selon la date de construction

et les moyens techniques mis en œuvre ; et ne possède pas de garage.

L'espace est toujours suffisant pour adapter ces maisons, même les plus anciennes, aux normes du confort actuel (sanitaire, chauffage, isolation...)

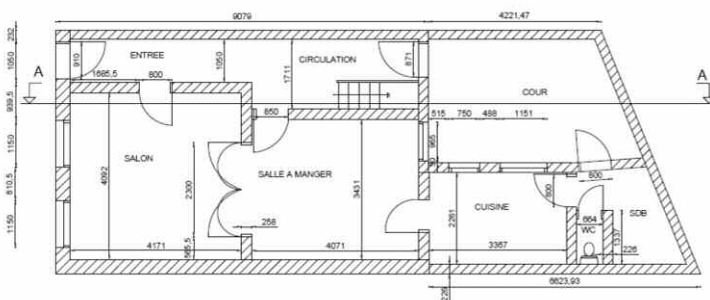


Figure 14 : RDC



Figure 15 : R+1



Figure 16 : Combles

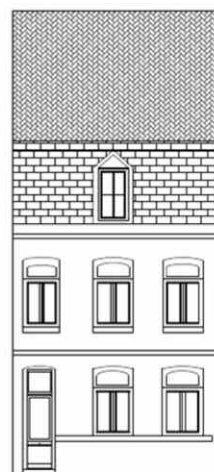


Figure 17 : Vue de face

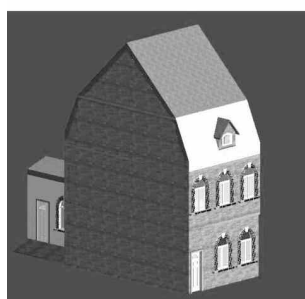


Figure 18 : Vue 3D-a

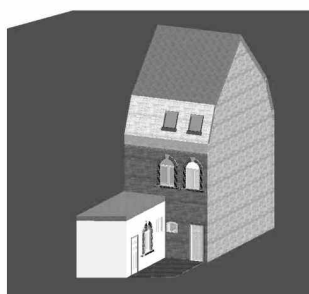


Figure 19 : Vue 3D-b

2.3.1. La maison bourgeoise (Figures 14, 15, 16, 17, 18 et 19)

La maison bourgeoise borde boulevards et avenues. A la différence des autres, elle intègre souvent une porte cochère et un passage carrossable intérieur sur lequel se greffait l'entrée du corps du logis. Elle offre de plus grandes surfaces (que la maison de courée et la maison de ville).

Sur un plan architectural elle se distingue par un travail esthétique très élaboré des façades et la présence de balcons et d'ornements intérieurs et extérieurs ce qui rend délicat la mise en œuvre d'une isolation efficace.

3. ANALYSE MULTICRITÈRE DES MATÉRIAUX ISOLANTS

Les bâtiments étudiés étant anciens et appartenant au patrimoine architectural de la région, il est déconseillé, voir interdit de modifier l'aspect extérieur des façades, d'où l'obligation d'isoler par l'intérieur.

Afin de comparer les différents matériaux isolants et faire un choix convenable de l'isolant selon plusieurs critères, nous avons élaboré une grille d'analyse multicritères dans laquelle nous avons dressé en lignes la liste des solutions possibles (les matériaux isolants), et en colonnes la liste des critères à prendre en considération (conductivité thermique, densité, capacité thermique massique, Coefficient de résistance à la vapeur d'eau, classement au feu, déphasage, prix, matériau recyclable ou pas, renouvelable ou pas...). L'évaluation des différents critères pour les différents matériaux isolants s'est faite à trois échelles :

- L'élaboration de notre propre base de données à partir de multiples références (guides techniques, sites internet, base de données INIES...)
- La récupération d'une base de données élaborée par le Cd2e (A. Lucas)
- La base de données matériaux de la RT 2005.

Une fois la grille remplie, nous sommes passés au choix adéquat des matériaux qui seront étudiés. Dans cet article

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (Kg/m ³)	Capacité thermique (J/kg.K)	Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur	Matériau renouvelable	Matériau recyclable
Polystyrène	0,037	23	1450	60	NON	NON
Laine de verre	0,039	23	1030	1	NON	DIFFICILE
Laine de chanvre	0,04	28	1600	1	OUI	OUI
Métisse	0,039	25	1400	2	OUI	OUI
Lin	0,042	30	1800	1	OUI	OUI
Laine de bois (dur)	0,05	155	2100	5	OUI	OUI
Laine de bois (léger)	0,04	50	2100	2	OUI	OUI

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux isolants étudiés

nous développerons les critères suivants pour la comparaison de nos matériaux :

- *Épaisseur minimale*
- *Risque de condensation dans les parois*
- *Inertie de l'enveloppe*
- *Energie grise*
- *Prix*

Dans une première partie, et afin de choisir une famille d'isolants convenables, on développera les critères précités, cependant, on ne peut négliger d'autres critères comme l'adaptabilité aux bâtiments anciens existants, la résistance au feu, les performances d'isolation acoustique de l'isolant... Ces derniers seront développés dans de prochaines études.

Cependant, il n'existe pas un seul matériau idéal pour l'isolation, pour ceci on sera amené à définir sept matériaux (les plus favorables pour nos typologies), cinq écologiques (laine de chanvre, métisse, lin, laine de bois dur et laine de bois léger) et deux non-écologiques (polystyrène et laine de verre), pour ensuite faire une étude approfondie de ces isolants (Tableau 1).

REMARQUE. — La plupart des murs extérieurs des typologies définies étant des murs en brique pleine d'épaisseur 33

cm, on choisira ce type de parois pour la comparaison entre les différents isolants.

3.1. L'épaisseur de l'isolant

Dans les maisons à Lille où le prix du mètre carré vaut plus de 2700 Euros, l'épaisseur devient un indicateur primordial dans le choix de l'isolant. De plus, les contraintes spatiales dans certains cas exigent une faible épaisseur d'isolant surtout dans le cas de faibles surfaces habitables (maisons de courées) d'où l'intérêt de ce critère.

A titre d'exemple, l'isolation par l'intérieur d'une maison de 100 m² (10 x 10) par 10 cm d'isolant aboutie à une perte de 4 m² (l'équivalent de 10800 Euros).

Selon la réglementation thermique appliquée aux bâtiments existants (RT 2005 Élément par Élément), la résistance des murs en façade doit être supérieure ou égale à 2,3 m².K/W.

L'épaisseur minimale de l'isolant est donnée par la formule suivante :

$$e_{(cm)} = (R_{r\acute{e}gl} - R_{mur}) \times \lambda_{isol} \times 100 \quad [1]$$

On obtient les valeurs suivantes pour les différents isolants : tableau 2.

Matériau	Polystyrène	Laine de verre	Laine de chanvre	Métisse	Lin	Laine de bois (dur)	Laine de bois (léger)
Conductivité thermique (W/m.K)	0,037	0,039	0,04	0,039	0,042	0,05	0,04
Épaisseur minimale requise (cm)	6,8	7,2	7,4	7,2	7,8	9,3	7,4

Tableau 2 : Épaisseur minimale d'isolant permettant d'obtenir une résistance globale de la paroi de 2,3 m².K/W

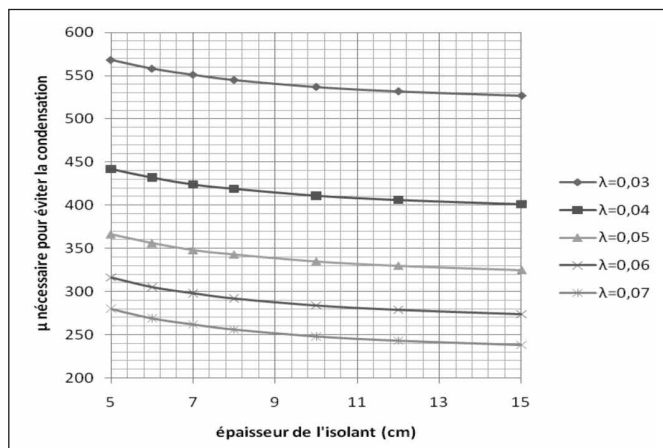


Figure 20 : μ_{isolant} nécessaire pour éviter la condensation dans la paroi

Les valeurs étant comprises entre 6,8cm et 9,3cm, le critère épaisseur ne paraît pas une priorité pour le choix de notre isolant puisque l'écart de 2,5cm n'implique qu'une perte supplémentaire de 0,97% de surface dans le cas de la maison de courée, 0,61% dans le cas de la maison de ville et 0,59% dans le cas de la maison bourgeoise ; mais cela pourrait rester un critère de choix si les critères sont similaires. A titre d'exemple, la pose de 7,5 cm d'isolant engendre une réduction de surface de 2,91% dans la maison de courée (1,84m²), 1,84% dans la maison de ville (2,10m²), et 1,76% de la maison bourgeoise (2,42 m²).

A noter que l'épaisseur minimale est différente de l'épaisseur optimale, cette dernière est calculée en fonction de plusieurs critères (durée de vie de l'isolant, prix des sources énergétiques, coût de l'isolant, nombre de degrés jour de chauffage...).

3.2. L'hygrométrie

La vapeur d'eau se diffuse toujours des zones à forte concentration en vapeur vers les zones à faible concentration. En raison de l'occupation des pièces, et de par une pression légèrement supérieure, le flux de vapeur est en général dirigé de l'intérieur vers l'extérieur (seule exception: la maison inoccupée et non chauffée en hiver). Pour remédier au problème de condensation dans les parois, il est nécessaire d'empêcher la vapeur d'eau d'y pénétrer; cependant, un pare-vapeur classique pourra être une source d'accumulation de vapeur d'eau dans les points critiques (points de discontinuité), d'où l'intérêt d'utiliser un freine-vapeur.

La perméabilité à la vapeur d'eau est exprimée par le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur, μ (sans unité), qui indique dans quelle mesure un matériau s'oppose par rapport à l'air, à la progression de vapeur d'eau.

Avec la pose d'un isolant traditionnel (0,03W/m.K $< \lambda < 0,07$ W/m.K et $1 < \mu < 10$) et dans les conditions extrêmes de température et d'humidité ($T_{\text{int}} = 20^\circ\text{C}$, $HR_{\text{int}} = 70\%$, $T_{\text{ext}} = -10^\circ\text{C}$, $HR_{\text{ext}} = 100\%$), il y a une condensation inévitable dans les parois.

Pour remédier à ce problème, deux cas sont envisageables :

- Choisir un isolant ayant une résistance à la diffusion de vapeur élevée.
- Utiliser un freine-vapeur.

Notre étude hygrométrique sera basée sur la méthode Glaser qui est une méthode relativement simple permettant la modélisation du phénomène de diffusion de vapeur d'eau à travers les parois.

3.2.1. Choisir un isolant ayant une résistance à la diffusion de vapeur élevée (Figure 20)

La figure ci-dessus montre que le coefficient de résistance à la diffusion nécessaire pour l'isolant afin d'éviter la condensation dans les parois varie entre 200 et 600 selon l'épaisseur et la conductivité de l'isolant.

Cependant, la quasi-totalité des isolants existants ne se trouve pas dans cet intervalle¹, d'où la nécessité de passer à la deuxième solution.

3.2.2. Utiliser un freine-vapeur (Figure 21)

La figure ci-après montre l'influence de la conductivité thermique de l'isolant sur l'épaisseur du freine-vapeur nécessaire en supposant le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur de l'isolant égal à 1 (cas le plus courant pour la plupart des isolants) et l'épaisseur de l'isolant égale à 10 cm.

En fixant l'épaisseur de l'isolant à 10 cm et le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur du freine-vapeur $\mu = 4000$, l'épaisseur minimale du freine vapeur pour éviter la condensation pour les différents isolants est donnée dans le tableau 3.

La laine de bois dur est plus performante que les autres matériaux au niveau de la résistance à la diffusion de vapeur puisqu'elle nécessite une épaisseur plus faible de freine-vapeur et par suite un prix de freine-vapeur moins élevé ; quant à la surface totale (isolant+pare-vapeur), le polystyrène reste le meilleur choix avec une épaisseur totale de 7,8 cm.

Matériau	Polystyrène	Laine de verre	Laine de chanvre	Métisse	Lin	Laine de bois (dur)	Laine de bois (léger)
Epaisseur de freine-vapeur minimale requise (cm)	1	1,1	1,1	1,1	1	0,9	1,1

Tableau 3 : Epaisseur de freine-vapeur minimale requise pour les différents matériaux isolants étudiés

1. Le verre cellulaire a un coefficient de résistance à la vapeur d'eau très élevé (1500000), cependant son prix élevé (400 €/m³), son énorme énergie grise (1600 kWh/m³) et sa difficulté de mise en place limitent son usage.

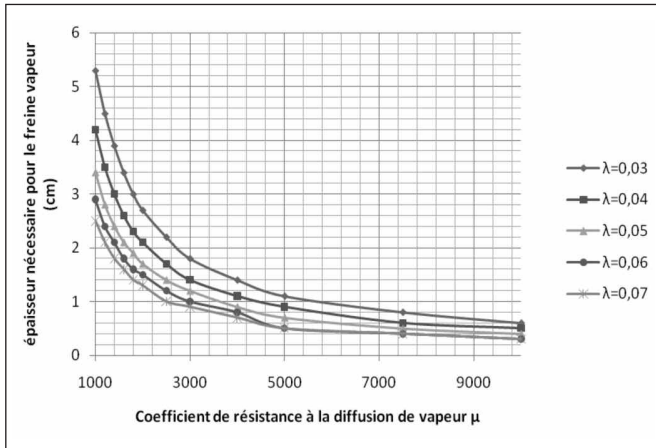


Figure 21 : Epaisseur de freine vapeur nécessaire pour éviter la condensation en fonction de l'épaisseur de l'isolant et du coefficient de résistance à la diffusion de vapeur du pare-vapeur.

3.3. L'inertie

3.3.1. Etude théorique

Par définition l'inertie thermique est le potentiel de stockage thermique d'un matériau ou d'un local. La propriété des constructions à forte inertie est de conserver une température stable et de se réchauffer ou se refroidir très lentement, alors que les constructions à faible inertie suivent sans amortissement ni retard les fluctuations de la température.

La diffusivité thermique est la vitesse de pénétration et atténuation d'une onde thermique dans un milieu ; elle est donnée par :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad [2]$$

λ est la conductivité thermique du matériau (en [W/m.K])

ρ est la masse volumique du matériau (en [kg/m³])

c est la chaleur spécifique du matériau (en [J/kg.K])

La diffusivité des matériaux isolants varie en général entre $1,25 \cdot 10^{-6}$ et $2,5 \cdot 10^{-7}$ m²/s.

3.3.1.1. Cas du mur semi-infini

D'après le modèle de Maréchal et Devisme (modèle du mur semi-infini), dans le cas d'un signal sinusoïdal, de pulsation ω , l'équation à résoudre s'écrit :

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad [3]$$

Munie des conditions aux limites :

$$T(0,t) = T_0 \sin(\omega t)$$

$$T(\infty,t) = 0$$

La solution de l'équation est :

$$T(x,t) = T_0 e^{-x\sqrt{\omega/2\alpha}} \sin(\omega t - x\sqrt{\omega/2\alpha}) \quad [4]$$

Par définition, sur une extrémité parfaitement isolée le flux thermique est nul. Il en serait de même si cette extrémité était en contact thermique parfait avec un objet symétrique soumis au même régime thermique : pour simuler la présence de cet objet virtuel, il suffira de constituer une cellule supplémentaire, extérieure à l'objet, à laquelle on attribuera systématiquement la température de l'avant-dernière cellule (son symétrique par rapport à la limite). Ceci permet de doubler l'amplitude de la température interne. L'équation de la température sur la face isolée sera alors :

$$T(x,t) = 2T_0 e^{-x\sqrt{\omega/2\alpha}} \sin(\omega t - x\sqrt{\omega/2\alpha}) \quad [5]$$

Le déphasage ψ est donné par :

$$\psi = \frac{24}{2\pi} x \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \quad [6]$$

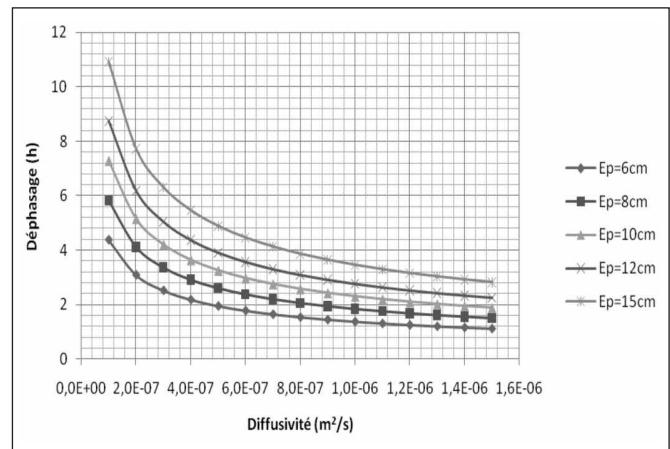


Figure 22 : Déphasage en fonction de la diffusivité et de l'épaisseur pour une couche d'isolant homogène

Et l'amortissement δ est donné par :

$$\delta = 2e^{-x\sqrt{\omega/2\alpha}} \quad [7]$$

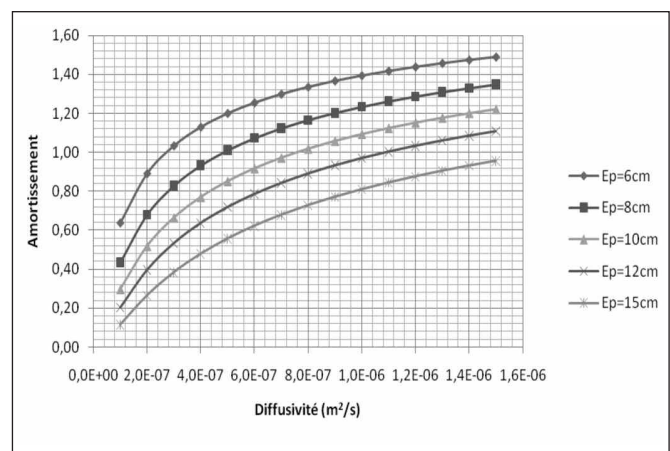


Figure 23 : Amortissement en fonction de la diffusivité et de l'épaisseur pour une couche d'isolant homogène

Notons que l'amortissement ne dépasse jamais la valeur 1, dans le cas contraire ceci est lié à l'approximation pour les faibles épaisseurs.

Cependant, les conditions thermiques optimales sont assurées lorsque le minimum à l'intérieur coïncide avec le maximum à l'extérieur et vice-versa. Donc il serait intéressant de calculer la température intérieure T_{int} lorsque la température extérieure T_{ext} est à sa valeur maximale.

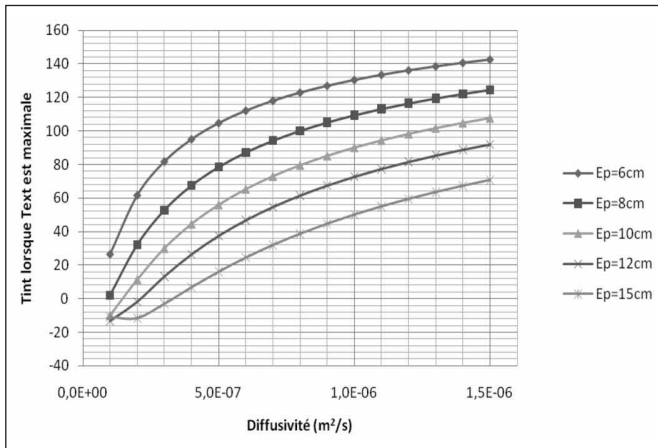


Figure 24 : Valeur de la température intérieure lorsque la température extérieure est maximale en fonction de la diffusivité et de l'épaisseur pour une couche d'isolant homogène

Ces courbes représentent le cas d'une couche homogène avec une température extérieure parfaitement sinusoïdale d'amplitude 100 ; elles ne représentent pas le comportement réel des matériaux mais permettent de comprendre la relation entre diffusivité et confort thermique.

On remarque que la température intérieure commence à avoir un minimum (concavité de la courbe) à partir d'une épaisseur de 15 cm.

3.3.1.2. Cas du mur d'épaisseur finie

Dans ce cas, la solution de notre problème est la somme de deux contributions identiques dont les solutions analytiques sont obtenues par la méthode des sources virtuelles :

$$T(x, t) = 2T_0 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \exp \left(- \left(L(2n+1) \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \right) \right) \sin \left(\omega t - \left(L(2n+1) \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \right) \right) \quad [8]$$

Il suffit de calculer les dix premiers termes de la série (voir moins) pour converger.

3.3.1.3. Comparaison des modèles

Pour vérifier la précision des deux modèles (mur d'épaisseur infinie et mur d'épaisseur finie), nous les avons comparés aux résultats fournis par le logiciel HEAT2 pour le cas d'un isolant de type métisse d'épaisseur 10 cm (Figure 25).

On remarque que la réponse du mur d'épaisseur finie est sensiblement identique à celle fournie par le logiciel HEAT2. Ceci nous amène à déduire les conclusions suivantes :

- Le modèle du mur fini est un bon choix pour modéliser analytiquement la diffusion de chaleur en régime harmonique.
- Le modèle simplifié du mur semi-infini n'est pas fiable et par suite la formule du déphasage d'après ce modèle, fréquemment utilisée, n'est pas judicieuse. Cependant, étant simple à utiliser, ce modèle pourrait servir pour décrire qualitativement le comportement des parois.
- Le logiciel HEAT2 fournit un modèle fiable et vérifié analytiquement.

Une fois le modèle fourni par HEAT2 validé, on peut passer à l'étude de l'inertie sur le mur isolé.

3.3.2. Simulations numériques

Afin de comparer l'inertie de nos isolants, des simulations ont été faites à l'aide du logiciel HEAT2 en régime transitoire avec la configuration suivante (figure 26).

L'inertie des sept isolants est testée en considérant un mur en brique pleine isolé de l'intérieur par 10cm d'isolant. La température extérieure et supposée sinusoïdale sur une période de un jour et a pour équation :

$$T = 10 + 10 \sin \left(\frac{t - 21600}{86400} \right) \quad [9]$$

T étant la température en °C et t le temps en secondes.

La température a été mesurée en trois points différents de la paroi : la face extérieure, la face intérieure et l'interface mur-isolant. On remarque que le profil de température à l'interface mur-isolant ne change quasiment pas quelque soit l'isolant utilisé (déphasage de 8,4 heures et amortissement égal à 0,22 ; par la suite, on mesurera le déphasage et l'amortissement de l'isolant par rapport à cette dernière.

NOTE. — Le cas étudié ici ne correspond pas au cas théorique de Maréchal et Devisme qui suppose la paroi homogène et semi-infinie (Figure 27).

Les résultats sont regroupés dans le tableau 4.

On remarque que, bien que le déphasage de la laine de bois dur est nettement le plus grand (la plus grande inertie), les autres matériaux présentent de meilleures performances thermiques à l'échelle du mur pour un profil de température sinusoïdal (T_{int} est plus faible pour T_{ext} maximale). De plus, le déphasage calculé d'après la formule [6] est bien différent du déphasage réel obtenu par simulation, ce qui vérifie l'imprécision du modèle de mur semi-infini.

3.4. L'empreinte environnementale

L'intérêt de l'aspect environnemental est un critère de plus en plus déterminant dans le choix du matériau. Cet aspect peut être mesuré par plusieurs indicateurs (énergie grise, émissions de polluants, consommation de matières premières, déchets produits...). Dans cette étude on se limitera à la comparaison de l'énergie grise qui reste un bon indicateur environnemental des matériaux (Tableau 5).

On remarque que l'énergie grise des isolants écologiques est nettement inférieure à celle des matériaux non-écologiques, cependant ces valeurs peuvent augmenter si les

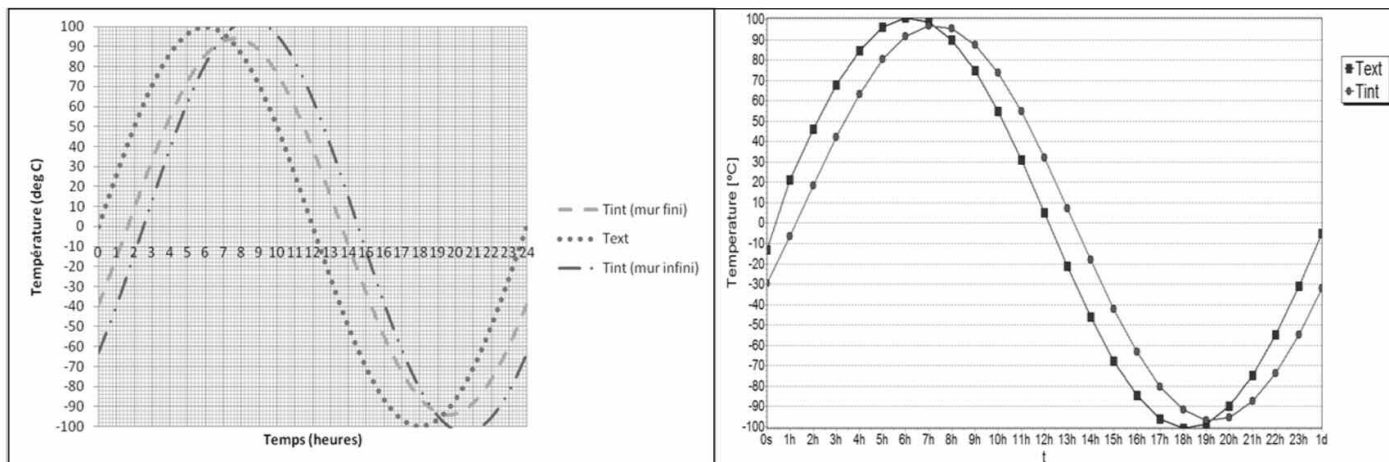


Figure 25 : Comparaison des modèles de mur infini, mur fini et HEAT2

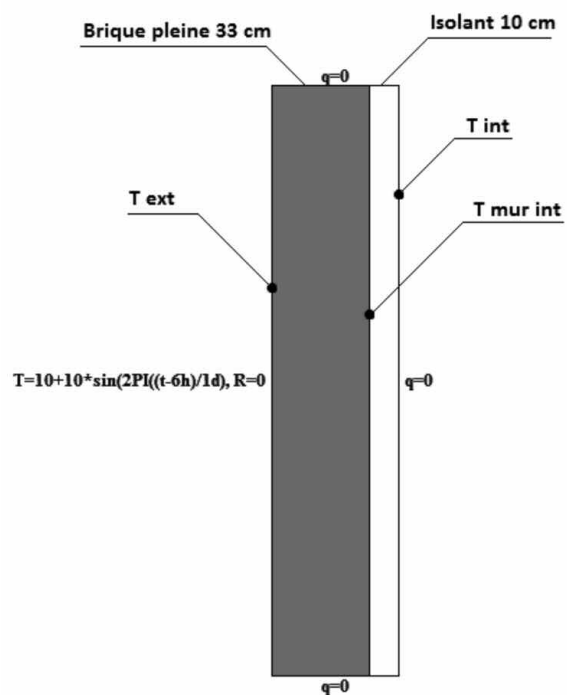


Figure 26 : Configuration de la paroi étudiée en régime périodique

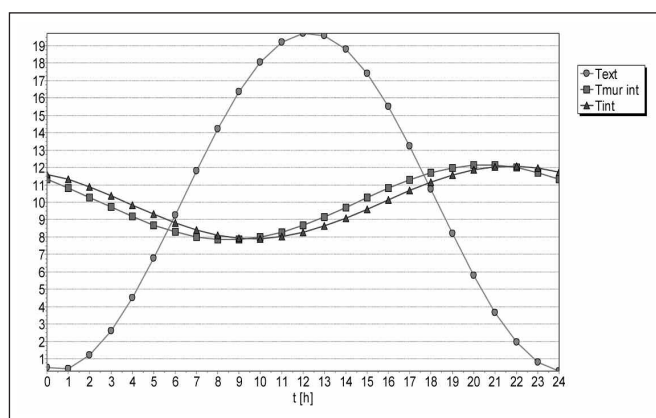


Figure 27 : Profils de températures intérieure, extérieure et à l'interface mur-isolant dans le cas du métisse

Matériau	Polystyrène	Laine de verre	Laine de chanvre	Métisse	Lin	Laine de bois (dur)	Laine de bois (léger)
Diffusivité ($10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)	1,11	1,65	0,893	1,11	0,778	0,154	0,381
Déphasage calculé (h)	2,18	1,79	2,43	2,18	2,61	5,87	3,73
Déphasage (h)	1,2	0,8	1,5	1,2	1,7	6,5	3,3
Amortissement	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	0,37	0,71
T_{int} lorsque T_{ext} est max	8,2	8,3	8,1	8,2	8,2	9,5	8,5

Tableau 4 : Diffusivité, déphasage et amortissement des différents matériaux étudiés

2. Le déphasage est calculé selon la formule [6].

Matériau	Polystyrène	Laine de verre	Laine de chanvre	Métisse	Lin	Laine de bois (dur)	Laine de bois (léger)
Energie grise (kWh/m ³ produit)	500	300	40	20	30	160	60

Tableau 5 : Énergie grise nécessaire à la production des matériaux isolants

Matériau	Polystyrène	Laine de verre	Laine de chanvre	Métisse	Lin	Laine de bois (dur)	Laine de bois (léger)
Prix (€/m ³ produit)	100	70	140	120	200	260	140

Tableau 6 : Prix des différents matériaux isolants

Matériau	Polystyrène	Laine de verre	Laine de chanvre	Métisse	Lin	Laine de bois (dur)	Laine de bois (léger)
Epaisseur	+	0	0	0	0	-	0
Hygrométrie	0	0	0	0	0	+	0
Inertie	0	-	0	0	0	+	+
Energie grise	-	-	+	+	+	0	+
Prix	+	+	0	+	-	-	0

Tableau 7 : Comparatif des résultats

matériaux ne sont pas produits localement à cause du transport ; d'où la nécessité de favoriser l'emploi de matériaux fabriqués localement.

3.5. Le prix

L'isolation thermique est un investissement en terme d'économie d'énergie, et, comme tout type d'investissement, la prise en compte du prix dans le choix est très importante. Cependant le coût d'investissement à lui seul n'est pas un indicateur suffisant, les économies réalisées sur la durée de vie de l'isolant seraient un indicateur plus adéquat.

On se limitera dans cet article à la comparaison des prix étant donné que la durée de vie des isolants n'est pas suffisamment connue. Ces prix sont déterminés à partir de plusieurs références pour parvenir à trouver des prix arrondis les plus représentatifs estimés possible (Tableau 6).

Les matériaux isolants non écologiques restent encore moins chers que les isolants écologiques. Cependant, étant donné que les isolants écologiques sont renouvelables et que leurs énergies grises sont inférieures à celles des isolants non écologiques, le prix des matériaux écologiques pourrait dans l'avenir baisser et devenir plus favorable, surtout si la demande de ces produits augmente.

4. CONCLUSION

Dans cet article nous avons présenté les différentes typologies du bâti ancien individuel Lillois : la maison de courée,

la maison de ville et la maison bourgeoise. Cette étape constitue le point de départ dans la recherche du matériau isolant. Ensuite sept matériaux isolants ont été comparés selon plusieurs critères dans le but d'identifier les avantages et les inconvénients de chacun.

Les résultats montrent qu'il n'existe pas un seul matériau idéal pour l'isolation ; selon le critère étudié un matériau peut être plus ou moins bon. Le tableau 7 regroupe les performances des isolants étudiés selon les différents critères. Les signes utilisés correspondent au niveau bon (+), moyen (0) ou mauvais (-).

Les études ultérieures porteront sur l'étude énergétique des typologies à l'état initial (sans isolation) puis avec isolation afin de voir l'impact des différents matériaux et en tirer les conclusions.

4. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Davies M., *Building heat transfer*, Université de Liverpool, UK, 2004
- [2] Vanneufville E., *Histoire de Lille des origines au XX^e siècle*, France, 1997
- [3] Ulgen K., « Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor », *Energy and Buildings*, vol. 34, 2002, p. 273-278.
- [4] Ozel M., Pihtili K. « Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orienta-

- tions », *Building and Environment*, vol. 42, 2006, p. 3051-3059.
- [5] Rapport de présentation du Plan Local d'Urbanisme de Lille, 2004, (<http://www.lillemetropole.fr/urba/PLU/_liens_docs/rapport_de_presentation/_sommaire_rp_1.htm>).
- [6] Dombaycı A., Gölcü M., Pancar Y., « Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources », *Applied Energy*, vol. 83, 2006, p. 921-928.
- [7] Kaynaklı O., « A study on residential heating energy requirement and optimum insulation thickness », *Renewable Energy*, vol. 33, 2008, p. 1164-1172.
- [8] Yu J., Yang C., Tian L., Liao D., « A study on optimum insulation thickness of external walls in hot summer and cold winter zone of China », *Applied Energy*, vol. 86, 2009, p.2520-2529.
- [9] Ardente F., Beccali M., Cellura M., Mistretta M., « Building energy performance : A LCA case study of kenaf fibres insulation board », *Energy and Buildings*, vol. 40, 2008, p. 1-10.
- [10] Mons D., *Mémoire de l'habitat du Nord Pas De Calais*, Urbanismes et Architecture, 1989
- [11] Vanderheeren A., *Patrimoine urbain remarquable du Nord-Typologies*, CAUE du Nord, 2006.
- [12] EDF-CREPAH HLM, *Le bâti ancien en Flandre-Artois*, 1982.
- [13] Agence de développement et d'urbanisme lilloise, *Morphologie, structure urbaine et typologie de l'habitat*, 1993.
- [14] Mairie de Lille, *Bien rénover son logement*, guide technique intégral, 2011.
- [15] Fernandez L., Transposition en architecture des connaissances d'ingénierie environnementale et des savoirs relatifs au choix des matériaux, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2010.
- [16] ATHEBA, *Comprendre son comportement thermique*, fiche technique, Maison Paysannes de France, 2010.
- [17] ATHEBA, *Comprendre son comportement hygrométrique*, fiche technique, Maison Paysannes de France, 2010.
- [18] CSTB, *Base de données INIES*, Logiciel ELODIE, (<<http://www.elodie-cstb.fr>>).
- [19] Ben Bellabah A., Caractérisation de matériaux par phénomènes thermiques transitoires, Thèse de doctorat, Université Cheikhanta Diop - Dakar, 1996.