

# ISOLATION THERMIQUE PAR L'INTERIEUR DES MURS EXISTANTS EN BRIQUES PLEINES



***Ce guide a été réalisé par la cellule de recherche Architecture et Climat, dans le cadre de la recherche ISOLIN, financée par le département Énergie et Bâtiment durable du Service Public de Wallonie.***

### ► **Service Public de Wallonie : DGO4 - Département de l'énergie et du bâtiment durable**

Le Service public de Wallonie se compose d'un Secrétariat général, de deux Directions générales transversales et de sept Directions générales opérationnelles. Chaque direction générale opérationnelle gère des matières et des compétences spécifiques, en lien direct avec les besoins et les attentes des citoyens, des entreprises, des associations et des pouvoirs locaux.

Le Département Énergie et Bâtiment durable poursuit trois grands objectifs :

- la diminution des consommations en vue de réduire l'émission de polluants et gaz à effet de serre
- la diminution de la facture énergétique wallonne
- l'application de la réglementation relative à la distribution d'énergie

<http://mrw.wallonie.be/dgatlp/dgatlp/Pages/Energie/Pages/Accueil/Presentation.asp>

#### Responsables du projet ISOLIN :

- Monique Glineur
- Michel Grégoire

### ► **UCL – Architecture et Climat**

Cette cellule de recherche de l'Université catholique de Louvain poursuit comme objectifs depuis 1980, la recherche, la conception, la modélisation et la construction en vue de la meilleure adéquation entre le bâtiment, le climat et l'occupant, dans le but d'élaborer et de développer, dans le cadre du développement durable, la théorie de l'architecture climatique et de l'architecture durable.

<http://www-climat.arch.ucl.ac.be/>

#### Responsables du projet ISOLIN :

- Arnaud Evrard
- Aline Branders
- André De Herde

Ce document a été réalisé par Aline Branders et Arnaud Evrard, sous la direction d'André De Herde. Il synthétise les trois phases du projet ISOLIN, les deux premières ayant été coordonnées par Brigitte Van Hemelryck de la cellule de recherche Architecture et Climat, en partenariat avec le Laboratorium Bouwfysica de la KUL (Katholieke Universiteit Leuven), le Service des Milieux Continus de l'ULB (Université Libre de Bruxelles) et le CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction).

#### **Version juillet 2010.**

Les illustrations non référencées de ce guide sont de José Flémal (Architecture et Climat).

Si, malgré les recherches entreprises en matière de copyright, il subsiste des personnes pouvant faire valoir des droits, celles-ci sont invitées à contacter l'éditeur.

*Photos couvertures : Sébastien Cruyt, architecte.*

# SOMMAIRE

## 1. CONTEXTE

<b>1.1. SITUATION ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTALE</b>	<b>7</b>
<b>1.2. LOGEMENTS EXISTANTS</b>	<b>9</b>
1.2.1 Types de logements	9
1.2.2 Isolation de l'enveloppe	9
1.2.3 Caractéristiques constructives des murs extérieurs existants	10
<b>1.3. PERFORMANCE DE L'ENVELOPPE</b>	<b>13</b>
1.3.1 Objectifs à atteindre	13
1.3.2 Procédés d'isolation thermique des murs extérieurs	14
1.3.3 Définitions : critères hygrothermiques principaux	16
<b>1.4. CADRE RÉGLEMENTAIRE ET SUBSIDES</b>	<b>21</b>
1.4.1 Directive sur la performance énergétique des bâtiments (PEB)	21
1.4.2 Subsidés et primes	22

## 2. RISQUES MAJEURS LIÉS À L'ISOLATION PAR L'INTÉRIEUR

<b>2.1. CONDENSATIONS SUPERFICIELLES ET MOISSURES</b>	<b>25</b>
<b>2.2. CONDENSATIONS INTERNES PAR DIFFUSION</b>	<b>27</b>
2.2.1 Risque principal	27
2.2.2 Risque secondaire	28
<b>2.3. CONDENSATIONS INTERNES PAR CONVECTION</b>	<b>29</b>
<b>2.4. GEL ET DILATATIONS DE MAÇONNERIE</b>	<b>31</b>
<b>2.5. EFFLORESCENCES DE SELS</b>	<b>33</b>
<b>2.6. DIMINUTION DE L'INERTIE THERMIQUE ET RISQUE DE SURCHAUFFE</b>	<b>35</b>

## 3. STRATÉGIES DE CONCEPTION ET DE RÉALISATION

<b>3.1. ANALYSE DE LA SITUATION EXISTANTE</b>	<b>39</b>
3.1.1 Contexte du projet	39
3.1.2 Caractéristiques du mur existant	40
3.1.3 Détection des ponts thermiques	42
<b>3.2. CONCEPTION DU SYSTÈME D'ISOLATION PAR L'INTÉRIEUR</b>	<b>43</b>
3.2.1 Préliminaires	43
3.2.2 Systèmes	44
3.2.3 Choix du modes constructifs	46
3.2.4 Choix des matériaux	49
3.2.5 Régulation de la vapeur	51

<b>3.3. PONTS THERMIQUES</b>	<b>55</b>
3.3.1 Généralités	55
3.3.2 Pistes de solutions	56
<b>3.4. VALIDATION DES PERFORMANCES</b>	<b>61</b>
3.4.1 Validation hygrothermique des parois	61
3.4.2 Validation hygrothermique des noeuds constructifs	65
<b>3.5. SUIVI DE LA MISE EN OEUVRE</b>	<b>67</b>
3.5.1 Principaux points sensibles en rénovation	67
3.5.2 Précautions sur chantier	68
<b>3.6. SYNTHÈSE</b>	<b>69</b>
<b>4. OUTIL ISOLIN</b>	
<b>4.1. PARAMÈTRES ÉTUDIÉS</b>	<b>73</b>
4.1.1 Situation existante	73
4.1.2 Climat intérieur	75
4.1.3 Type d'isolant	75
4.1.4 Performance thermique	77
4.1.5 Membrane	78
4.1.6 Revêtement extérieur	78
<b>4.2. RÉSULTATS DISPONIBLES</b>	<b>79</b>
4.2.1 Climats et matériaux	79
4.2.2 Flux de chaleur et d'humidité	80
4.2.3 Température et humidité relative	82
4.2.4 Teneur en eau	83
<b>4.3. CRITÈRES DE VALIDITÉ ET VALEURS PAR DÉFAUT</b>	<b>85</b>
4.3.1 Pertes de chaleur	85
4.3.2 Condensation	85
4.3.3 Accumulation d'humidité	86
4.3.4 Gel	87
4.3.5 Confort	87
4.3.6 Le cas est-il valide ?	88
<b>4.4. EXEMPLES D'ANALYSE</b>	<b>89</b>
4.4.1 Quantité et types de cas étudiés	89
4.4.2 Validité d'ensemble	89
4.4.3 Critères prédominants	89

## **BIBLIOGRAPHIE**

# 1

## CONTEXTE

Les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre sont très élevées en Belgique. Pour réduire celles-ci, différentes stratégies sont mises en place, dont plusieurs visent l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. On constate en effet que de nombreux logements ne sont pas encore isolés ou seulement en partie. Près de 65% des murs des logements wallons ne disposent d'aucune isolation. Une part importante de ces parois extérieures non isolées sont des murs massifs en briques pleines.

L'isolation des murs extérieurs est complexe et plusieurs procédés existent : l'isolation par remplissage de la coulisse, l'isolation par l'extérieur et l'isolation par l'intérieur. En rénovation, il arrive très souvent que le choix soit restreint pour des raisons techniques, économiques et/ou patrimoniales. Bien qu'elle puisse générer de nombreux risques au niveau du comportement hygrothermique et mécanique des parois, l'isolation par l'intérieur devient alors souvent la seule solution possible. Les paramètres hygrothermiques du mur existant et des matériaux rapportés doivent être bien connus pour concevoir des parois performantes et durables dans le temps.



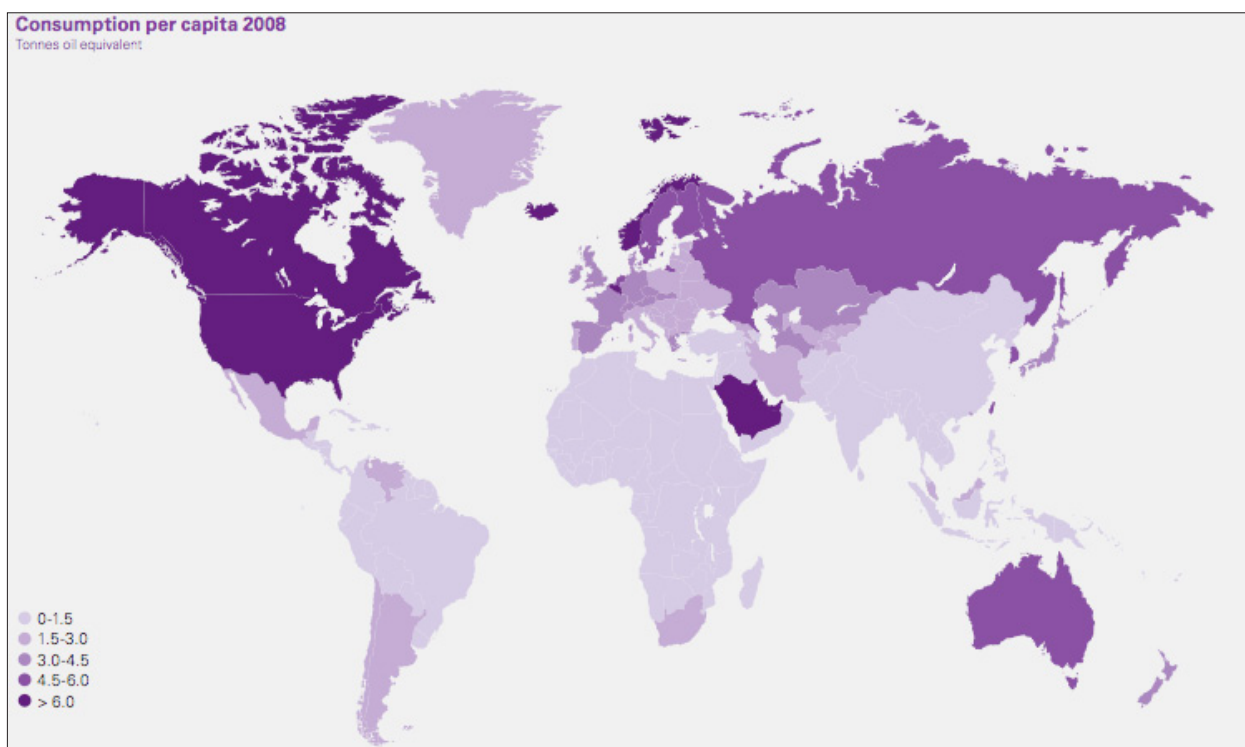
## 1.1. SITUATION ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

En Belgique, la consommation annuelle d'énergie est très importante (supérieure à la moyenne européenne) et en hausse. Les émissions de gaz à effet de serre sont fortement corrélées à celle-ci et sont donc également conséquentes. Les trois secteurs les plus énergivores sont l'industrie, le transport et le logement.

La consommation énergétique moyenne des logements est élevée et est liée principalement au chauffage de ceux-ci. L'amélioration des performances énergétiques des logements existants représente donc un potentiel important d'économie d'énergie.

### ► À l'échelle mondiale

La Belgique est plus consommatrice d'énergie que la moyenne européenne. L'illustration ci-dessous montre que même à l'échelle mondiale, la Belgique est un pays très énergivore.<sup>1</sup>

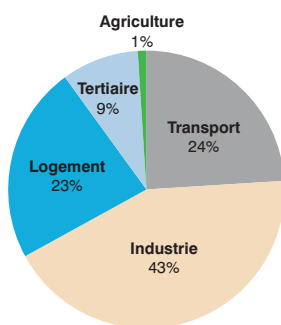


Consommation d'énergie primaire per capita en 2008 (en tonnes équivalent pétrole).

Source : BP Statistical Review of World Energy June 2009.

Cette consommation plus élevée que la moyenne s'explique principalement par l'importante présence de l'industrie chimique, par la densité du trafic routier et par la mauvaise performance thermique des logements. Le plan d'action mis en place pour diminuer les consommations d'énergie touche à tous les secteurs. De nombreuses démarches sont lancées au niveau du secteur du bâtiment dont la performance énergétique peut être nettement améliorée avec des investissements relativement réduits.

1. BP Statistical Review of World Energy June 2009, Energy Academy and Centre for Economic Reform and Transformation, Heriot-Watt University, London, 2009.



Consommation finale par secteur en Wallonie en 2005.  
Source : ICEDD Bilan énergétique wallon 2008.

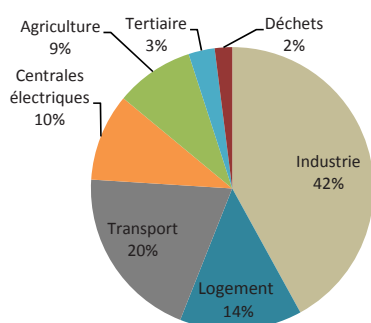
## ► En Wallonie<sup>2</sup>

En région wallonne, en 2005, la consommation finale d'énergie s'élevait à 153,1 TWh pour l'ensemble des secteurs (13,2 Mtep), ce qui équivaut à environ 45 MWh (l'équivalent de 4500 litres de mazout) par habitant par an (population d'environ 3 400 000 habitants en 2005).

Le secteur du bâtiment (logement et tertiaire) constitue une demande d'énergie importante. En 2005, il représentait 31,5% des consommations d'énergie finale de la Wallonie, sans compter l'énergie liée au transport que la situation du bâtiment implique.

Les émissions de gaz à effet de serre sont également importantes : d'après « L'état de l'environnement wallon » publié par la Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGRNE), les émissions globales s'élèvent en 2004 à 51,8 millions de tonnes éq. CO<sub>2</sub> ; ce qui correspond à une moyenne de 15 tonnes par habitant par an (contre une moyenne européenne de 10,8 tonnes).

17% de ces émissions sont attribuables au secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire), à nouveau sans compter les émissions liées au transport induit.



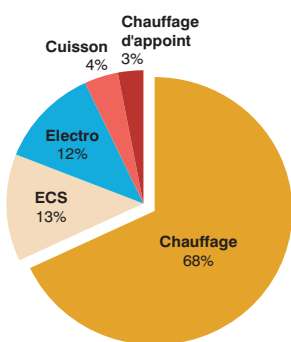
Gaz à effet de serre par secteur en Wallonie en 2004.  
Source : DGRNE Etat de l'environnement wallon, 2006.

## ► Au niveau du secteur résidentiel wallon

L'estimation du parc de logements wallon est basée sur l'Enquête socio-économique 2001<sup>3</sup>. En 2005, le nombre total de logements est estimé à 1 438 365, réparti en 1 192 170 maisons unifamiliales (83 %) et 246 195 appartements (17 %).

La consommation finale du logement en Wallonie en 2005 a été estimée à 36 497 GWh (3 138,7 ktep). Ceci représente une consommation moyenne de 26,8 MWh par logement par an (l'équivalent de 2 680 litres de mazout). Si l'on inclut la part du transport qui est lié au secteur résidentiel, la consommation monte à environ 3 tep/logement.an (l'équivalent de 3488 litres de mazout).

Dans les logements wallons, environ 75 % des consommations d'énergie concernent le chauffage. Cette part a tendance à diminuer au fil du temps.



Répartition de la consommation des logements.  
Source : ICEDD Bilan énergétique wallon 2008.

## ► Constat

Face aux consommations et aux émissions liées au secteur du bâtiment, et principalement au logement, il apparaît de façon évidente que la rénovation énergétique des logements est essentielle pour permettre à la Belgique de rattraper le niveau moyen européen, d'atteindre les objectifs de Kyoto, de réduire ses émissions de gaz polluants...

2. Les données concernant la Wallonie présentées dans les pages suivantes sont issues de l'étude : La rénovation énergétique et durable des logements wallons, Analyse du bâti existant et mise en évidence de typologies de logements prioritaires, Caroline KINTS, Architecture et Climat, UCL, Louvain-la-Neuve, 2008.

3. Enquête socio-économique générale 2001, Institut national de Statistiques (INS), Service public fédéral Economie, P.M.E, Classes moyennes et Energie, Direction générale Statistique et Information économique, Bruxelles, 2007.



## 1.2. LOGEMENTS EXISTANTS

Les trois quarts des logements belges sont des maisons unifamiliales et plus de 40 % de celles-ci sont des maisons quatre façades, offrant de grandes surfaces de déperdition et entraînant d'importantes consommations de chauffage.

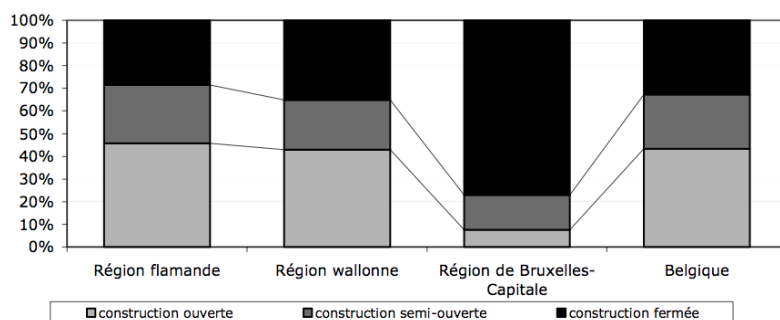
Dans les logements wallons, près de 65 % des murs extérieurs ne disposent d'aucune isolation. Les murs doubles sont un petit peu plus nombreux que les murs massifs et la brique est très présente, que ce soit au niveau des murs porteurs ou des parements.

En rénovation, les murs sont souvent isolés par l'intérieur pour préserver les briques ou, dans certains cas, les pierres, en façade.

### 1.2.1 TYPES DE LOGEMENTS

Le secteur du logement représente la plus grande part du patrimoine immobilier belge. En comparaison avec d'autres pays européens, la Belgique compte un très grand nombre de maisons unifamiliales. Il apparaît en effet que trois familles sur quatre (75,3 %)<sup>4</sup> habitent dans une maison unifamiliale. Cette tendance semble continuer à s'accroître au fil des années.

Il apparaît également que, parmi les maisons unifamiliales, les constructions 4 façades sont les plus courantes en Belgique. Celles-ci ayant une plus grande surface de déperditions, elles sont les plus consommatrices d'énergie.



Type de construction selon la région (en %). Construction ouverte ou 4 façades, construction semi-ouverte ou 3 façades, construction fermée ou 2 façades (mitoyenne).  
Source : Enquête socio-économique 2001, Institut national des Statistiques.

### 1.2.2 ISOLATION DE L'ENVELOPPE

De manière générale, on constate que l'isolation de l'enveloppe est loin d'être généralisée.

% parois isolées < Enquête-qualité 2007			
Isolation	totale	partielle	absente
Toitures	52,2%	10,7%	37,0%
Murs extérieurs	28,9%	7,0%	64,1%
Planchers	21,2%	6,5%	72,3%
Fenêtres	66,6%	14,3%	19,1%

Parois isolées (en %).  
Source : MRW, DGATLP

Ces chiffres sont principalement dus aux logements anciens dont la rénovation se fait lentement. On constate que l'isolation des toitures et le placement de fenêtres performantes sont des pratiques courantes alors que l'isolation des murs et des planchers restent rares.

4. Enquête socio-économique générale 2001, op. cit.

Pourtant, ce sont souvent les murs qui représentent la plus grande surface de déperdition, en tout cas dans les maisons quatre façades. Leur isolation constitue donc un potentiel d'amélioration énergétique important.

### ► Murs extérieurs

Les murs extérieurs sont probablement les parois les plus complexes à aborder quand il s'agit d'améliorer leur qualité thermique :

- Ils constituent de grandes surfaces en contact avec l'extérieur.
- Ils jouent généralement un rôle structurel important.
- Ils sont couramment percés de baies.
- La dynamique de leur comportement hygrothermique est complexe (capacité thermique, transfert et stockage d'humidité...) et doit être considérée pour assurer le confort et éviter les désordres.
- Les prescriptions urbanistiques et patrimoniales restreignent les possibilités d'intervention.

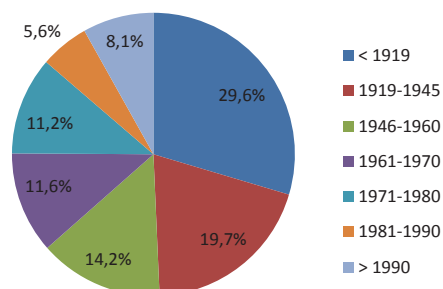
### 1.2.3 CARACTÉRISTIQUES CONSTRUCTIVES DES MURS EXTÉRIEURS EXISTANTS

Il est important de connaître la composition des murs extérieurs existants et les propriétés des matériaux qui les constituent afin de trouver les solutions adéquates pour les isoler.

#### ► Évolution des modes constructifs

La composition des murs extérieurs a évolué au cours du temps :

- Les murs anciens étaient souvent constitués de matériaux massifs, épais.
- Après 1945, les murs creux se généralisent ; ceux-ci dissocient le rôle structurel et la fonction de protection contre les intempéries.
- Suite aux premières crises énergétiques, l'isolation de la coulisse des murs creux se répand.



Répartition des logements en fonction de leur époque de construction.

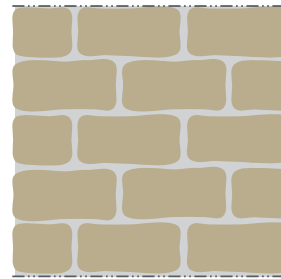
Source : Enquête socio-économique 2001 - DGSIE - SPF Economie.

Au vu de ces évolutions, une composition de mur peut souvent être associée à la période de construction d'un logement.

Un aperçu rapide des modes constructifs principaux utilisés dans les logements belges est repris ci-dessous.<sup>5</sup>

### 1. Murs massifs

Les constructions de type vernaculaire (18e, 19e et début 20e siècle) sont généralement constituées de murs massifs très épais composés de matériaux issus des ressources locales : pierre, terre cuite, bois et torchis...

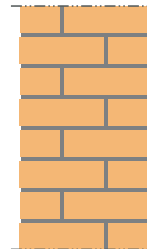


1.

### 2. Murs pleins en brique

À la fin du 19e et au début du 20e siècle, les matériaux industriels (fonte, acier, béton, terre cuite hourdée...) commencent à se mêler aux matériaux traditionnels (pierre, brique, bois).

Les murs pleins en briques se multiplient jusqu'à la fin des années 50. Les façades présentent des détails de qualité (balcons, encadrements des baies en pierre bleue...), surtout au niveau des maisons de ville.



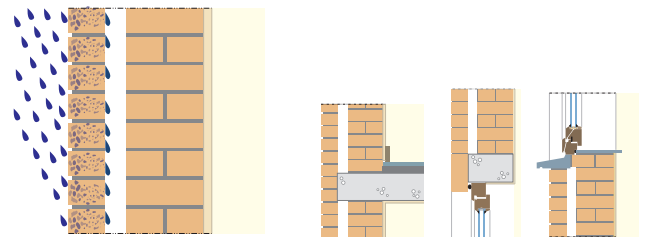
2.

30 à 40 cm

### 3. Murs creux « première génération »

À l'époque de l'entre-deux-guerres, les murs creux apparaissent. La fonction porteuse et la fonction de protection contre les intempéries sont dissociées.

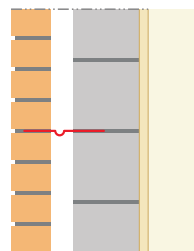
Une lame d'air sépare le mur porteur du mur de parement, mais des éléments en maçonnerie ou en béton les relient ponctuellement, créant des ponts thermiques et des risques d'infiltration.



3.

### 4. Murs creux « deuxième génération »

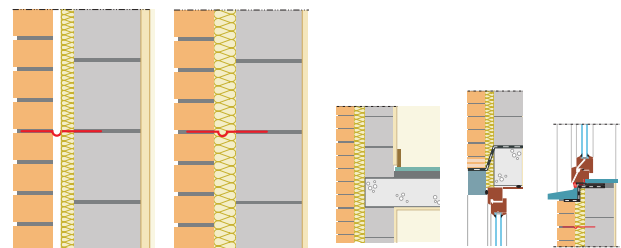
Au cours des années 70, le mur de parement est relié au mur porteur par des ancrages ponctuels en acier, ce qui réduit les ponts thermiques.



4.

### 5. Murs creux isolés

À partir des années 80, la coulisse de ces murs creux est de plus en plus souvent remplie d'isolation, soit de façon partielle, soit totalement.



5.

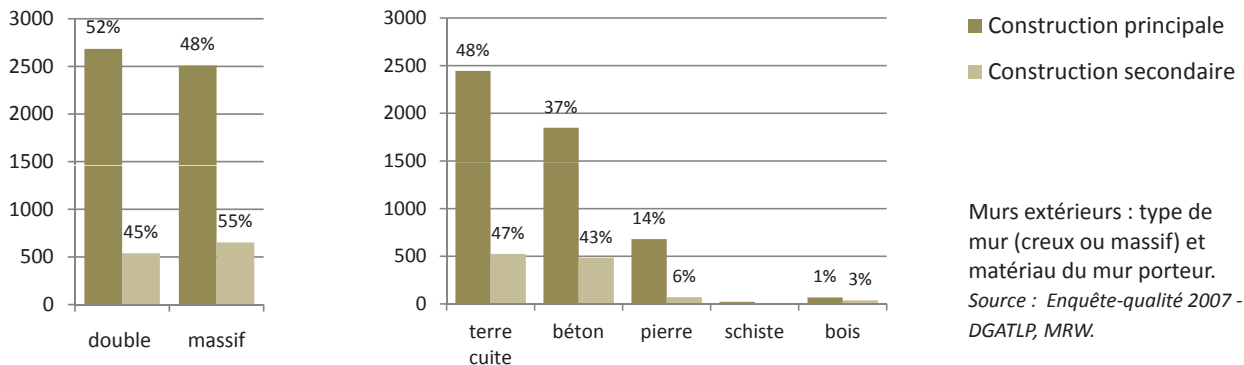
5. Cet aperçu est repris de l'étude : *La rénovation énergétique et durable des logements wallons, Analyse du bâti existant et mise en évidence de typologies de logements prioritaires*, op.cit.

## ► Modes constructifs et matériaux

Le mur creux (ou mur double) est très utilisé dans les régions où les précipitations accompagnées de vent sont fréquentes, soit les pays du nord de l'Europe occidentale (Belgique, Nord de la France, Pays-Bas, Nord de l'Allemagne, Angleterre, Écosse et les régions autour de la mer Baltique).

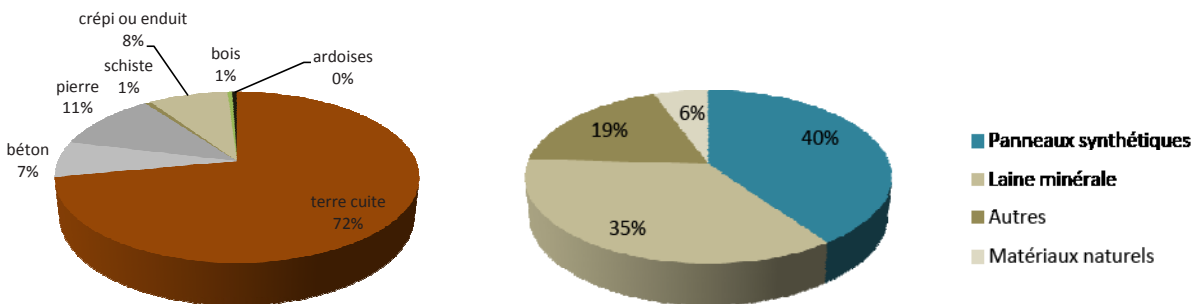
Ce mode constructif est très présent en Belgique. Outre l'étanchéité qu'il assure face à l'eau de pluie battante, le mur creux permet de réaliser des parements en briques, dans le respect d'une certaine tradition constructive belge.

En Wallonie, les murs creux (52 %) sont un peu plus nombreux que les murs massifs ou pleins (48 %).<sup>6</sup> La brique, le béton et enfin la pierre composent pratiquement tous les murs porteurs.



Au niveau des matériaux de finition, la terre cuite est clairement majoritaire (72%), suivie de la pierre (11%), des crépis ou enduits (8%) et du béton (7%). Même si cela se diversifie petit à petit, de nombreuses communes imposent encore la brique comme matériau de finition dans leur règlement d'urbanisme. Deux tiers des logements ne présentent pas de peinture de finition.

Les matériaux isolants les plus utilisés sont les panneaux synthétiques et la laine minérale.



Matériaux de finition à gauche et matériaux d'isolation des murs extérieurs à droite (en %).  
Source : Enquête-qualité 2007 - DGATLP, MRW.

En Belgique, dans les constructions neuves, l'isolant est pratiquement toujours placé du côté extérieur par rapport au mur porteur. Le choix du système du mur isolé par l'extérieur avec une finition légère plutôt que celui du mur creux isolé dans la coulisse se fait parfois pour des raisons esthétiques, mais généralement pour des raisons économiques. Les finitions légères sont moins chères que les parements en briques. Néanmoins, elles sont également plus fragiles et d'une moindre longévité.

En rénovation, les murs sont souvent isolés par l'intérieur pour préserver l'apparence du mur (briques ou pierre, ornements particuliers...) ou pour des raisons urbanistiques (alignement des façades...).

6. Enquête sur la qualité de l'habitat en Région Wallonne, 2006-2007, Ministère de la région wallonne (MRW), Direction générale opérationnelle - Aménagement du territoire, Logement, Patrimoine et Energie (DGATLP), Namur, 2007.

## 1.3. PERFORMANCE DE L'ENVELOPPE

Comme on a pu le voir, la qualité énergétique des logements wallons est globalement médiocre. La rénovation énergétique de ceux-ci représente donc un enjeu important, avec un potentiel assez facilement mobilisable de diminution des émissions de gaz à effet de serre pour la Région et d'amélioration de la qualité de vie pour les habitants (diminution de la facture énergétique et amélioration du confort).

L'isolation des murs extérieurs est complexe. Différents procédés sont possibles : isolation par remplissage de la coulisse, isolation par l'extérieur ou isolation par l'intérieur. En rénovation, pour des raisons techniques, économiques, urbanistiques et/ou patrimoniales, le choix est souvent plus restreint.

Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients. L'isolation par l'intérieur engendre de nombreux risques au niveau du comportement hygrothermique et mécanique de la paroi. Cependant, il s'agit souvent en rénovation de la seule solution possible.

Afin de créer des parois performantes, il est essentiel de connaître les caractéristiques hygrothermiques de tous les matériaux qui les composent : isolation thermique, inertie thermique, transfert et stockage d'humidité. Ces paramètres seront définis dans ce chapitre.

### 1.3.1 OBJECTIFS À ATTEINDRE

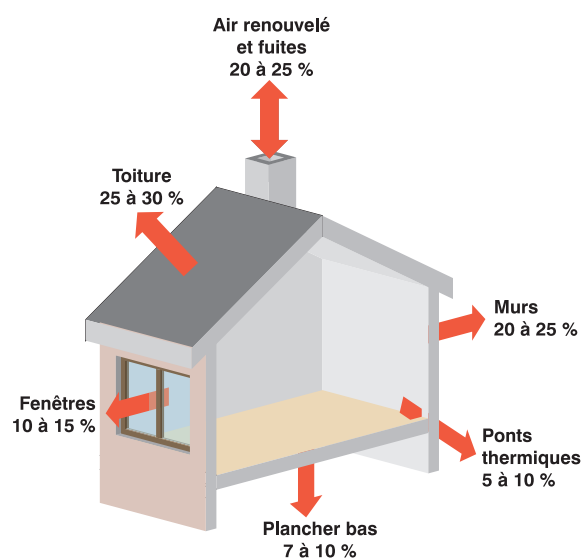
#### ► Diminution du besoin de chauffage

Le chauffage est responsable d'environ 75 % de la consommation énergétique du secteur résidentiel. Il s'agit donc de la cible à privilégier en matière d'économie d'énergie.

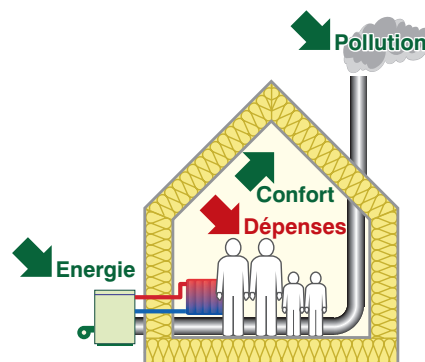
La consommation d'énergie pour le chauffage dépend des déperditions thermiques du bâtiment, de ses pertes par ventilation et par infiltrations, de ses gains solaires et internes, et des caractéristiques des systèmes de chauffage installés.

L'isolation de l'enveloppe du bâtiment permet de réduire les déperditions thermiques à travers les parois. Dans les maisons mitoyennes, la plus grande part de pertes de chaleur se fait généralement au niveau des toitures. Par contre, dans les maisons trois ou quatre façades, très répandues en Belgique, les murs extérieurs sont habituellement responsables de la majorité des déperditions.

Sachant qu'en Wallonie près de 65% des murs ne sont pas isolés, il apparaît de façon évidente que des actions doivent être entreprises pour réduire ce chiffre afin de sensibiliser et informer les propriétaires et pour développer davantage les connaissances et techniques au sujet de l'isolation thermique des murs existants.



Répartition des déperditions d'une maison familiale standard non isolée.

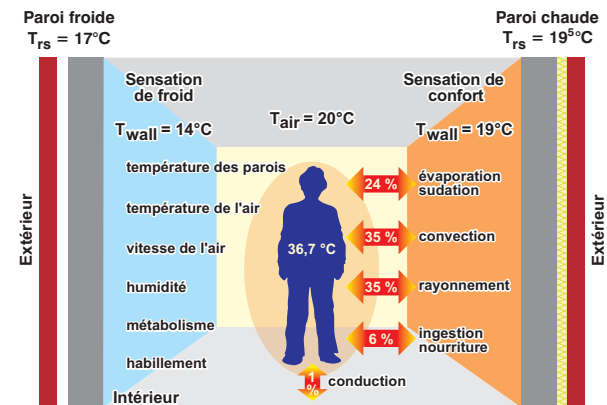


L'isolation thermique de l'enveloppe permet d'augmenter le confort des habitants tout en réduisant les consommations d'énergie et les émissions de polluants.

## ► Augmentation du niveau de confort

Le confort thermique dépend de plusieurs paramètres. De manière simplifiée, on considère que la température ressentie réellement par l'individu correspond à la moyenne entre la température de l'air et la température des parois.

Dans un bâtiment mal isolé, les parois de l'enveloppe seront froides tandis que dans un bâtiment bien isolé, elles se rapprocheront fortement de la température de l'air. Le confort de l'occupant s'en trouvera donc amélioré.



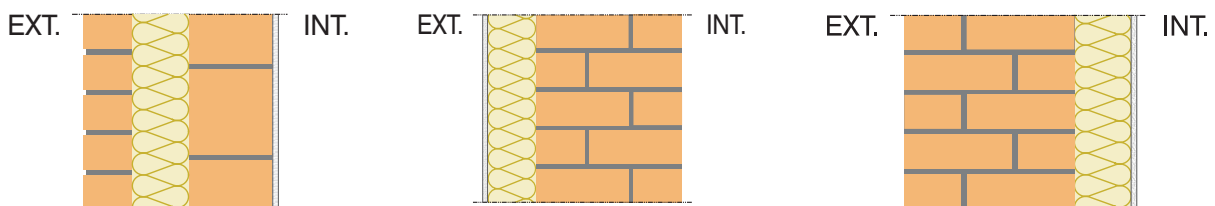
Paramètres influençant le confort des occupants.

### 1.3.2 PROCÉDÉS D'ISOLATION THERMIQUE DES MURS EXTÉRIEURS

L'isolation des murs extérieurs est complexe, surtout lorsqu'il s'agit d'une rénovation, car le choix est souvent restreint par des aspects techniques, urbanistiques, patrimoniaux ou économiques.

Un mur extérieur existant peut être isolé principalement selon trois procédés différents :

- par remplissage de la lame d'air dans le cas d'un mur creux,
- par l'extérieur,
- par l'intérieur.





Selon le contexte, le choix s'orientera vers l'une ou l'autre technique. Il semble fort probable qu'à l'avenir, face à l'augmentation des exigences en matière de performance énergétique des bâtiments, les différents systèmes soient combinés lorsque la situation le permet.

En clair, on ne se demandera plus s'il faut isoler d'une façon ou d'une autre ; on aura de plus en plus tendance à remplir la coulisse s'il y en a une, tout en complétant par une isolation par l'extérieur et/ou une isolation par l'intérieur selon les possibilités. Dans tous les cas, il est essentiel, avant de réaliser les travaux, de bien connaître les caractéristiques hygrothermiques et mécaniques des parois existantes et des matériaux rapportés et, ensuite, de s'assurer que la mise en oeuvre soit de qualité.



Un aperçu rapide des avantages et des inconvénients des différentes techniques est présenté à la page suivante.

Bien que l'isolation par l'intérieur apparaisse comme la « moins bonne solution » à cause de ses inconvénients et des risques hygrothermiques et mécaniques qu'elle engendre, elle représente souvent la seule solution possible en rénovation. En effet, en Belgique, l'isolation par l'intérieur est souvent choisie en rénovation, d'une part parce que le matériau de finition est parfois imposé et que de nombreuses façades sont protégées et, d'autre part, parce que l'isolant placé par l'extérieur constitue une emprise sur l'espace public qui n'est pas toujours autorisée.



### ► Isolation par remplissage de la coulisse

 <b>Avantages</b>	 <b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Finitions intérieures et extérieures conservées</li> <li>- Pas d'encombrement</li> <li>- Technique simple</li> <li>- Coût moindre</li> <li>- Pas de permis d'urbanisme à introduire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possible que si coulisse suffisamment large (min. 4 cm) et régulière : examen préalable de la coulisse indispensable (endoscopie)</li> <li>- Pas applicable si parement peint ou émaillé : couche étanche empêche évacuation de la vapeur d'eau</li> <li>- Épaisseur d'isolation limitée</li> <li>- Risque d'accentuation des ponts thermiques aux interruptions de la coulisse</li> <li>- Refroidissement du mur de parement : potentiel de séchage réduit, risque de gel</li> </ul>

### ► Isolation par l'extérieur

 <b>Avantages</b>	 <b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Continuité de l'isolant : supprime les risques de ponts thermiques locaux</li> <li>- Amélioration de l'étanchéité de la façade</li> <li>- Protège le mur du gel et de la fissuration.</li> <li>- Améliore l'aspect extérieur en cas de revêtement abîmé ou pas assez homogène</li> <li>- Masse thermique et finitions intérieures préservées</li> <li>- Pas de perte de surface habitable à l'intérieur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modification de l'aspect extérieur et, si maisons mitoyennes, modification de l'alignement des façades : nécessité d'introduire un permis d'urbanisme dans la plupart des cas</li> <li>- Retours de baies doivent être isolés, seuils remplacés, etc. (diminution de la surface vitrée)</li> <li>- Déplacement/remplacement/adaptation des descentes d'eau, gouttières, cheneaux, etc.</li> <li>- Nécessité de faire appel à une entreprise spécialisée ; Coût élevé</li> </ul>

### ► Isolation par l'intérieur

 <b>Avantages</b>	 <b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aspect extérieur maintenu</li> <li>- Réalisation sans échafaudages</li> <li>- Grande diversité de choix au niveau des isolants</li> <li>- Chantier à l'abri des intempéries</li> <li>- Réalisation possible pièce par pièce : phasage du chantier et des dépenses</li> <li>- Coût moindre</li> <li>- Pas de permis d'urbanisme à introduire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution de la surface habitable</li> <li>- Finitions intérieures (et éventuellement installations électriques ou de chauffage) à déplacer ou remplacer</li> <li>- Augmentation des sollicitations hygrothermiques dans le mur : risque de condensation interne, de gel, de dilatations de la maçonnerie et d'efflorescences de sels</li> <li>- Ponts thermiques difficiles à résoudre : risque de condensation superficielle et de formation de moisissures</li> <li>- Diminution de l'inertie thermique : risque de surchauffe</li> </ul>

### 1.3.3 DÉFINITIONS : CRITÈRES HYGROTHERMIQUES PRINCIPAUX

Pour offrir une réponse adaptée en termes de transfert de chaleur, d'humidité et d'air à travers les parois, la conception de l'enveloppe doit être étudiée en détail. Les principaux paramètres hygrothermiques des matériaux de l'enveloppe sont définis ci-dessous pour faciliter la lecture des chapitres suivants. Il faudra bien sûr aussi considérer les performances d'ensemble du bâtiment (orientation, situation, contextes...), les performances propres aux parois translucides (transmission de la lumière, facteur solaire...) et le comportement des occupants.

#### ► Transfert de chaleur

L'enveloppe doit limiter les pertes de chaleur en hiver et permettre de maîtriser les gains solaires en été. Les matériaux isolants permettent de freiner la chaleur qui traverse les parois extérieures par conduction. Il ne faut pas confondre les performances relatives aux matériaux, aux couches d'une paroi ou à la paroi dans son ensemble. La rencontre entre deux parois ou un percement au sein d'une paroi engendre des détails de construction qu'il faut analyser distinctement du reste de la paroi pour évaluer la performance d'ensemble d'un local ou d'un bâtiment.

##### Résistance thermique d'une couche et conductivité thermique d'un matériau

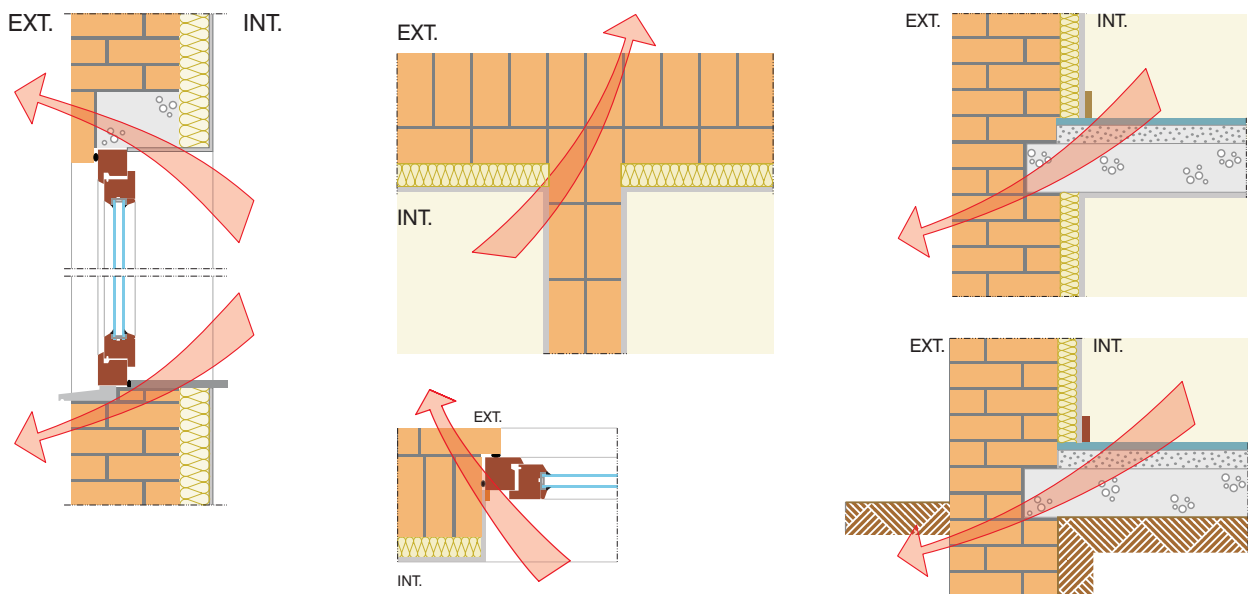
La résistance thermique (notée  $R$  et exprimée en  $m.K/W$ ) de chaque couche d'un élément de paroi dépend de son épaisseur et de la conductivité thermique du matériau qui la compose. Plus la conductivité thermique d'un matériau (notée  $\lambda$  et exprimée en  $W/m.K$ ) est faible, plus le matériau est isolant thermiquement. Pour qualifier la performance thermique d'une paroi, on utilise en général le coefficient de transfert thermique (noté  $U$  et exprimé en  $W/m.K$ ). Plus le  $U$  est faible, plus la paroi est isolante thermiquement. Ce coefficient ne suffit pourtant pas pour exprimer le comportement hygrothermique dynamique de la paroi.

##### Nœuds constructifs et ponts thermiques

Les nœuds constructifs se situent à la rencontre entre deux parois ou au niveau d'un percement ou d'une irrégularité de la paroi. Ils sont le siège de transferts thermiques spécifiques qui doivent être additionnés ou soustraits des transferts propres aux parties homogènes des parois lorsqu'on établit la performance d'ensemble d'un local, ou d'un bâtiment. Certains nœuds constructifs sont appelés « ponts thermiques » quand ils occasionnent des déperditions thermiques plus importantes. Les ponts thermiques sont des défauts de conception ou de réalisation de l'enveloppe du bâtiment. L'influence relative d'un pont thermique est d'autant plus importante que la performance thermique des parois avoisinantes est élevée.

Si l'isolation par l'extérieur permet de limiter les ponts thermiques, le fait d'isoler par l'intérieur peut, au contraire, en créer ou les renforcer. Les endroits sensibles tels que les jonctions entre les murs extérieurs et les murs de refend ou les planchers, ainsi que les encadrements de baies, devront faire l'objet d'une attention particulière du point de vue des flux de chaleur, d'humidité et d'air.



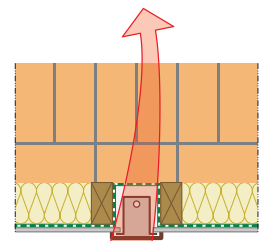


Exemples de ponts thermiques liés à la réalisation d'une isolation par l'intérieur.

Les ponts thermiques présentés ci-dessus sont la conséquence d'une conception inadéquate entraînant des discontinuités de l'isolation. Des ponts thermiques peuvent aussi être causés par des erreurs d'exécution telles que le percement partiel ou total de l'isolation thermique ou le non-respect de l'épaisseur d'isolant requise. Ils sont souvent le siège d'infiltrations d'air non désirées.

Les ponts thermiques peuvent être de deux types :

- Linéaires : lorsqu'ils se produisent à la jonction de deux éléments du bâtiment (par exemple, au droit d'un mur de refend).
- Ponctuels : lorsqu'une paroi isolée est perforée par un élément ayant une conductivité thermique élevée (par exemple, un ancrage traversant une paroi isolée).



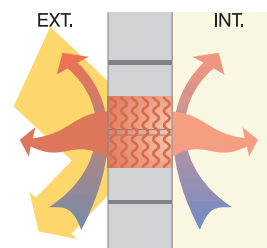
Vue en plan de l'encastrement d'une prise électrique.

Outre les déperditions thermiques, les ponts thermiques peuvent entraîner des problèmes de condensations superficielles causant la formation de moisissures (voir chapitre 2.1 p.25). Les détails de mise en oeuvre qui permettent d'éviter les ponts thermiques sont parfois complexes et engendrent des coûts supplémentaires. Des solutions pour résoudre les ponts thermiques les plus courants seront présentées dans la 3<sup>ème</sup> partie du guide.

### ► Stockage de chaleur

L'inertie thermique d'un bâtiment est sa capacité à stocker et à restituer de la chaleur. L'inertie thermique d'un espace dépend des caractéristiques des matériaux qui le composent. Selon leur capacité thermique, leur diffusivité et leur effusivité, les parois auront des comportements différents face au rayonnement solaire et à la chaleur. Les matériaux en contact avec l'espace intérieur sont ceux qui auront le plus d'impact (plus accessible aux échanges de chaleur).

Combinée à une ventilation permettant la décharge thermique de la chaleur accumulée dans le bâtiment, une inertie élevée permet d'éviter les surchauffes en été et d'atténuer les chutes brusques de température en hiver. Les paramètres utiles pour quantifier l'inertie des matériaux sont définis ci-après.



Principe de l'inertie : capacité thermique, diffusivité, effusivité.

### Capacité thermique

La capacité thermique (volumique) d'un matériau représente la quantité totale de chaleur que 1 m de matériau est capable de stocker pour une augmentation de température de 1 °C. Elle est exprimée par le produit de la densité du matériau ( $\rho$  en  $\text{kg/m}^3$ ) et de sa chaleur spécifique ( $c$  en  $\text{J/kg.K}$ ). Elle est donc notée  $\rho c$ , et exprimée en  $\text{KJ/m.K}$ . Plus la capacité thermique d'un matériau est grande, plus il est capable de stocker de la chaleur.

### Diffusivité thermique

La diffusivité thermique d'un matériau est associée à la vitesse à laquelle celui-ci monte en température lorsqu'il est soumis à une source de chaleur. Elle se calcule par le rapport  $\lambda/\rho c$  et s'exprime en  $\text{m}^2/\text{s}$ . Plus la diffusivité thermique est élevée, plus la température du matériau évoluera rapidement.

### Effusivité thermique

L'effusivité thermique d'un matériau est associée à la quantité de chaleur que le matériau est capable d'absorber lorsqu'il est soumis à une source de chaleur pendant un certain temps. Elle est calculée par la relation  $(\lambda.\rho c)^{1/2}$  et s'exprime en  $\text{J/m}^2.\text{K.s}^{-1/2}$ . Plus l'effusivité thermique est élevée, plus la quantité d'énergie absorbée par le matériau en un certain temps est grande. L'effusivité thermique est aussi liée à la température de contact, et un matériau ayant une effusivité faible sera « chaud » au toucher.

Ainsi, l'inertie thermique d'une paroi sera principalement déterminée par les propriétés des couches superficielles. Celles-ci offriront une forte inertie si les matériaux qui la composent ont une effusivité élevée et une diffusivité basse. En effet, pouvoir échanger de grandes quantités de chaleur n'a pas un grand intérêt si ces échanges sont trop rapides. La notion de temps est ici fondamentale, c'est ainsi que l'on parle de comportement dynamique.

Pour caractériser l'inertie d'une paroi complète, il faut étudier le comportement de celle-ci face à des sollicitations dynamiques. Plus l'inertie d'une paroi sera élevée, moins une variation brusque de température influencera la température des couches superficielles au cours d'une période donnée. De même, plus l'inertie d'une paroi sera élevée, plus elle aura la faculté d'atténuer l'amplitude des variations de température (amortissement) et de retarder les pics de chaleur ou de froid (déphasage).

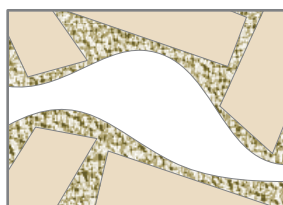
Quantifier l'effet de l'inertie est donc relativement complexe, mais il est indéniable que l'inertie a une influence non négligeable sur le sentiment de confort. Selon l'activité et le profil d'occupation, on sera donc amené soit à renforcer, soit à diminuer l'inertie de certains locaux. La stratégie de ventilation doit être définie en considérant ces aspects.

## ► Transfert et stockage d'humidité

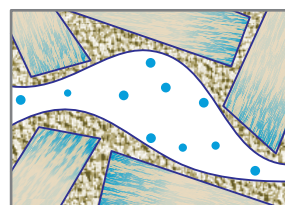
La majorité des matériaux poreux sont capables de contenir de l'humidité (stockage) selon les conditions ambiantes dans lesquelles ils sont plongés. L'eau peut être présente sous différente forme au sein des pores du matériau. On parle d'eau de constitution quand les molécules d'eau sont chimiquement intégrées à la structure poreuse, d'eau adsorbée quand une pellicule d'eau se dépose sur la surface des pores, d'eau capillaire quand certains pores se remplissent d'eau, et d'eau libre, quand elle est présente dans les mais circule librement à travers ceux-ci (sous forme liquide ou de vapeur).

### Teneur en eau et courbe de rétention d'humidité

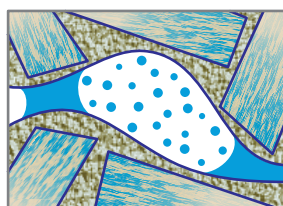
La teneur en eau d'un matériau évolue principalement en fonction de l'humidité relative de l'ambiance dans laquelle il est plongé. Elle est notée  $w$  et s'exprime en  $\text{kg}/\text{m}^3$  (ou en % de masse). La teneur en eau des matériaux est toujours égale à  $0 \text{ kg}/\text{m}^3$  à  $0 \%$  d'humidité relative. Elle évolue doucement jusqu'à  $80 \%$  ou  $90 \%$ , voire plus selon les matériaux (leur composition, leur porosité...). C'est la zone hygroscopique, où l'eau est principalement adsorbée. La teneur en eau dans cette zone reste modérée : très basse pour certains matériaux (brique, béton cellulaire...) et plus élevée pour d'autres (bois, cellulose...). Au-delà de cette humidité relative, et jusqu'à la saturation ( $100 \%$ ), on entre dans la zone capillaire. La teneur en eau augmente alors beaucoup plus vite et peut atteindre des valeurs élevées. À  $100 \%$  d'humidité relative, on atteint la « saturation libre » ( $w_f$ ), où les pores du matériau ne sont pas encore forcément complètement remplis d'eau. La teneur en eau peut encore augmenter si le matériau est plongé dans l'eau : longtemps, sous vide ou sous pression. C'est la « sursaturation ». En pratique, il est assez rare d'atteindre la teneur en eau maximale ( $w_{\text{max}}$ ) où tous les pores sont remplis d'eau. Les illustrations ci-dessous expriment ces notions.



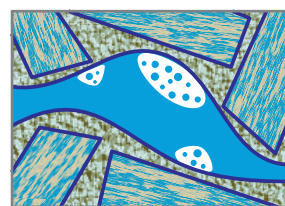
Etat sec



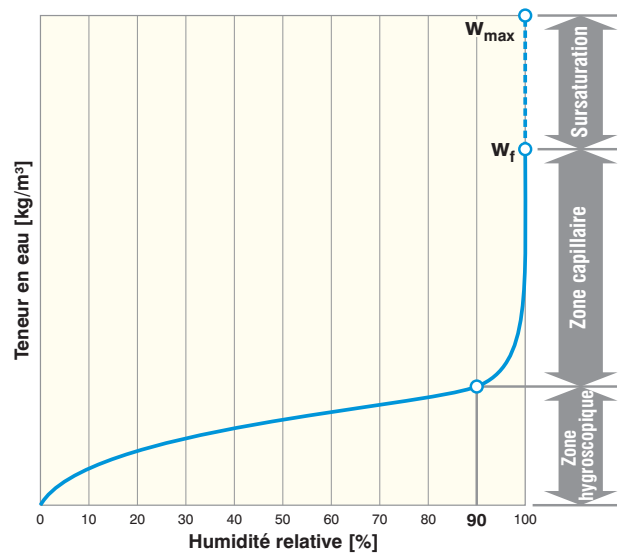
Zone hygroscopique



Zone capillaire



Sursaturation



Courbe de rétention d'humidité.

La teneur en eau des matériaux influence l'ensemble des paramètres hygrothermiques du matériau. En effet, la masse volumique évolue selon la teneur en eau, mais c'est aussi le cas de la capacité thermique, de la conductivité thermique... Les phénomènes en jeu sont complexes et dépassent le cadre de ce document, mais il apparaît donc que la teneur en eau des matériaux ne doit pas être négligée.

Du point de vue des transferts d'humidité, il est important de distinguer plusieurs phénomènes : d'une part, le transfert de vapeur, et de l'autre, le transfert d'eau liquide, soit par absorption, soit par redistribution. La force motrice de ces phénomènes est différente, et, bien qu'ils soient interdépendants, ces transferts peuvent donc parfois avoir des directions opposées.

#### Transfert de vapeur et coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau

Le transfert de vapeur est provoqué par une différence de pression partielle de vapeur d'eau entre les deux faces d'un matériau ou d'une paroi. Comme l'air chaud est capable de contenir plus de vapeur d'eau, le flux de vapeur va souvent du chaud vers le froid. Le paramètre le plus utilisé pour refléter comment le matériau se laisse traverser par la vapeur est le coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur, noté  $\mu$  (sans unité). Plus cette valeur  $\mu$  est petite, plus le matériau est ouvert au passage de la vapeur. Pour évaluer la résistance à la diffusion de vapeur d'une couche, il faut multiplier son épaisseur, noté  $d$  et exprimé en mètre, par le coefficient  $\mu$  du matériau qui le constitue. La valeur obtenue est notée  $S_d$  (ou  $\mu d$ ) et s'exprime en mètres. Elle correspond à l'épaisseur (en m) qu'aurait une couche d'air stationnaire ayant la même résistance à la diffusion de la vapeur. Une couche de 20 cm d'épaisseur ayant un coefficient  $\mu$  de 5, exerce donc la même résistance à la diffusion de la vapeur qu'une lame d'air stationnaire de 1m d'épaisseur. Le  $S_d$  d'une paroi est égal à la somme des  $S_d$  des couches qui la composent et des résistances à la diffusion de vapeur des deux faces de la paroi.

#### Transfert d'eau liquide et coefficient d'absorption

Le transfert d'eau liquide peut se faire par absorption d'eau qui entrerait en contact avec le matériau (comme la pluie à la surface extérieure), ou par redistribution de l'humidité présente dans les pores du matériau. Par facilité, on considère que ces deux phénomènes sont provoqués par une différence d'humidité relative au sein du matériau. Les transferts d'eau liquide vont alors des parties les plus humides vers les parties les plus sèches. Le transfert d'eau liquide au travers d'un matériau se calcule sur base de deux coefficients distincts : le coefficient de transfert d'eau par absorption et le coefficient de transfert d'eau par redistribution. Déterminer ces deux paramètres de façon précise doit se faire en laboratoire, et les procédures sont longues et coûteuses. Il est donc actuellement excessivement rare, hélas, de disposer de ces paramètres. Une méthode simplifiée permet néanmoins de leur donner une valeur approximative. Elle se base sur la détermination (moins longue et moins coûteuse) du coefficient d'absorption, noté  $A$  et exprimé en  $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}^{1/2}$ .

## 1.4. CADRE RÉGLEMENTAIRE ET SUBSIDES

Différentes initiatives sont mises en place en Belgique, comme dans les autres pays, afin de promouvoir l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments :

- Des niveaux d'isolation thermique sont imposés en construction neuve et en rénovation.
- Des subsides sont accordés afin de motiver financièrement les maîtres d'ouvrage souhaitant améliorer la performance énergétique de leur logement.

Ces différents points sont abordés ici en ciblant l'isolation des murs extérieurs.

### 1.4.1 DIRECTIVE SUR LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS (PEB)

#### ► Cadre général

La Directive sur la performance énergétique des bâtiments (PEB) a été publiée le 16 décembre 2002 par le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne. La consommation de l'énergie pour les services associés aux bâtiments constituant près d'un tiers de la consommation énergétique de l'Union européenne, la Commission estime que des initiatives dans ce domaine pourraient contribuer à diminuer les émissions de gaz à effet de serre et à réduire la dépendance européenne aux sources d'énergie externes.

#### ► Application en Belgique

Les exigences reprises dans la Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (2002-91-EC) ont dû être transposées par chaque État Membre. En Belgique, les compétences relatives à l'utilisation rationnelle de l'énergie reviennent aux régions. Chacune des trois régions a adopté de nouveaux textes légaux et des plans d'action en vue de promouvoir la Performance Énergétique des Bâtiments et de répondre aux exigences fixées par la Directive européenne. Différentes exigences ont été fixées pour les bâtiments neufs, mais aussi pour les rénovations et les changements d'affectation.

En rénovation, aucune exigence n'a été fixée au niveau de la performance globale du bâtiment (niveau E). Cependant, en matière d'isolation thermique, les éléments rénovés doivent satisfaire à des coefficients de transmission thermique maximum (valeurs  $U_{max}$ ) ou à des résistances thermiques minimales (valeurs  $R_{min}$ ).

Le tableau ci-dessous résume les valeurs  $U$  maximales admissibles ( $W/m^2K$ ) ou valeurs  $R$  minimales ( $m^2K/W$ ) dans les trois Régions pour les murs délimitant un volume protégé.

Murs non en contact avec le sol, à l'exception des parois verticales et en pente en contact avec un vide sanitaire ou avec une cave en dehors du volume protégé	$U_{max} = 0,4$ (0,6 en Région flamande)
Murs en contact avec le sol	$R_{min} = 1,0$
Parois verticales et en pente en contact avec un vide sanitaire ou avec une cave en dehors du volume protégé	$R_{min} = 1,0$
Parois entre 2 volumes protégés	$U_{max} = 1,0$

## 1.4.2 SUBSIDES ET PRIMES

En plus du cadre réglementaire dont l'application est obligatoire, différentes actions sont mises en place pour promouvoir l'efficacité énergétique des bâtiments. Différentes primes ont été créées dans les trois régions. Les détails et les conditions d'octroi varient d'une région à l'autre et d'une année à l'autre.

Lorsque le standard passif est atteint suite à la rénovation d'un logement, une prime globale pour l'ensemble du bâtiment peut être obtenue en Région Wallonne (non cumulable avec les primes énergie accordées par type d'interventions).

Certaines communes octroient également des subsides pour les travaux permettant d'économiser l'énergie. Les conditions requises varient d'une commune à l'autre. Au niveau fédéral, les particuliers peuvent également déduire fiscalement une partie des coûts relatifs à un certain nombre d'interventions permettant des économies d'énergie.

Pour plus d'information sur la réglementation en Région wallonne, vous pouvez consulter le site <http://energie.wallonie.be>.

# 2

## RISQUES MAJEURS LIÉS À L'ISOLATION PAR L'INTÉRIEUR

L'isolation par l'intérieur peut provoquer divers phénomènes hygrothermiques et mécaniques qui nuisent à la durabilité des murs existants.

Six risques majeurs ont été identifiés :

- Les condensations superficielles et le risque de moisissure,
- Les condensations internes par diffusion,
- Les condensations internes par convection,
- Les dégradations dues au gel ou aux dilatations de maçonnerie,
- Les efflorescences de sels,
- La diminution de l'inertie thermique et le risque de surchauffe.

Ces risques vont être expliqués en détail dans ce chapitre. Les éléments à prendre en compte et les stratégies de conception pour les éviter seront repris dans la troisième partie du guide.





## 2.1. CONDENSATIONS SUPERFICIELLES ET MOISSURES

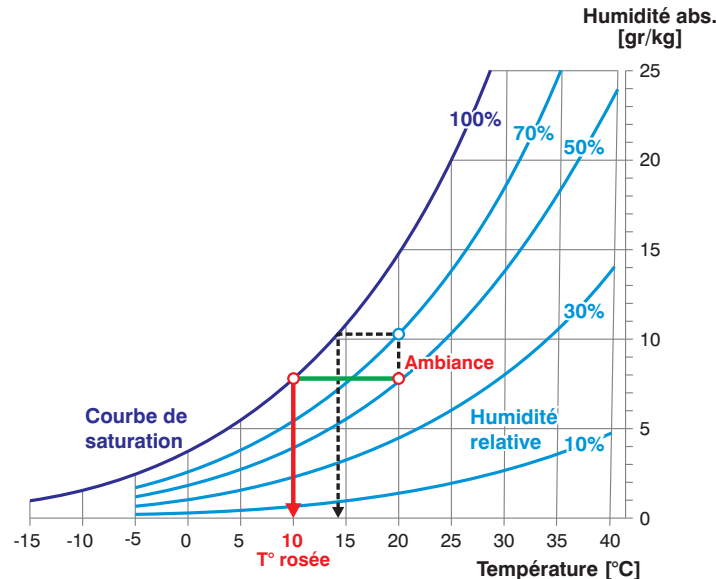
Outre les déperditions thermiques, les ponts thermiques peuvent entraîner des problèmes de condensations superficielles causant la formation de moisissures. En effet, les déperditions de chaleur plus importantes entraînent une diminution de la température de surface intérieure au droit des ponts thermiques. Si cette température descend sous la température de rosée, de la condensation superficielle va apparaître dans cette zone. L'accumulation d'humidité combinée à d'autres conditions risque d'entraîner la formation de moisissures.

### ► Déperditions de chaleur et diminution de la température de surface intérieure

La densité du flux de chaleur est sensiblement plus élevée au niveau de la partie de l'élément de construction constituant le pont thermique. En conséquence, les déperditions thermiques y sont plus élevées et la température de la surface intérieure y est beaucoup plus basse que celle des éléments environnants.

### ► Point de rosée et condensation superficielle

L'air intérieur ayant une température, une humidité relative et une pression donnée, peut arriver en contact avec l'un de ces ponts thermiques où la température de surface est plus faible. L'air arrivé à cet endroit se refroidit et la température qu'il atteint dans le voisinage de la surface peut se retrouver en dessous du point de rosée, ce qui provoque de la condensation sur cette surface (la pression de vapeur dans l'air atteint la pression de saturation). La figure ci-dessous montre l'évolution de l'état de cet air sur le diagramme de Molier : pour un air à 20 °C, 50 % d'HR et 101,3 hPa, la condensation apparaît lorsque la température est réduite à 10 °C ou moins (à pression constante).



Exemple de représentation sur le diagramme de Mollier.

### ► Développement de moisissures

L'accumulation d'humidité à la surface des ponts thermiques peut, selon le substrat, son humidité et la température, être le terrain propice pour le développement de moisissures.

La formation de moisissures sur une surface ne se produit que si différentes conditions sont réunies :

- Une quantité d'oxygène suffisante,
- Une humidité suffisante,
- Un fond nourrissant approprié,
- Des conditions de température adéquates. Les moisissures peuvent se développer à des températures comprises entre 0 et 60 °C, mais la température optimale pour un développement rapide se situe entre 5 et 25 °C. Il est également important que les variations de température ne soient pas trop grandes.

Les conditions de température et de présence d'oxygène étant pratiquement toujours remplies dans les bâtiments, c'est au niveau de l'humidité et du fond nourrissant qu'il va falloir être attentif et agir.

### Fond nourrissant

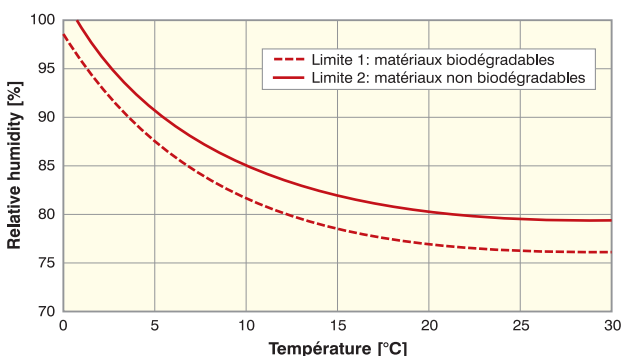
Pour leur développement, les moisissures ont besoin de faibles quantités de matières organiques décomposables comme les sucres, les graisses et surtout la cellulose. Les endroits présentant une accumulation de salissures ou de poussières constituent des emplacements de prédilection pour le développement de moisissures. Certaines sortes de papiers peints, la colle cellulosique avec laquelle ils sont posés, ainsi que certains types de peintures semblent être à des degrés différents de bons fonds nourrissants pour les moisissures. Dans ce cadre, la chaux est considérée comme un support ne facilitant pas le développement des moisissures.

### Présence d'humidité

L'eau est une condition essentielle au développement des moisissures. Celles-ci puisent l'humidité nécessaire principalement dans le support sur lequel elles se développent. La condensation superficielle apparaît lorsque l'humidité relative, à la surface d'une paroi, atteint 100 % (cf. diagramme de Molier). Des moisissures peuvent déjà se former à partir d'une humidité relative de 80 % (voir graphique ci-dessous).

Pour analyser précisément la teneur en eau en surface et dans les matériaux ainsi que les conditions de développement des moisissures, il est important de disposer des valeurs d'absorption, de rétention et de redistribution de l'humidité des matériaux. Celles-ci sont malheureusement rarement disponibles de façon complète. Pour une même température, on considère généralement que les matériaux biodégradables nécessitent une humidité relative moins importante pour atteindre les conditions propices à la formation de moisissures.

De nombreux types de moisissure existent, et leurs conditions de développement peuvent être très différentes (temps de survie dans des conditions non propices, vitesse de croissance des spores, etc.). La notion de temps est ici fondamentale, et, contrairement à ce qui s'est fait dans le passé, une analyse spécifique devra utiliser les modèles dynamiques de transfert d'humidité et de chaleur. Des logiciels dynamiques, comme ceux de la famille WUFI®, permettent de voir si les conditions de formation des moisissures sont atteintes pendant un temps suffisant. WUFI bio® donne des informations détaillées sur le risque de formation des moisissures, leur type, etc.



Conditions d'apparition de moisissures suivant le type de matériaux. Source : Fraunhofer-Institut für Bauphysik.



Exemple de moisissures liées à un pont thermique.

## 2.2. CONDENSATIONS INTERNES PAR DIFFUSION

Les différences de climat entre l'intérieur et l'extérieur entraînent des transferts de vapeur à travers l'enveloppe des bâtiments. En hiver, ces transferts se font globalement de l'intérieur (plus chaud et plus humide) vers l'extérieur. L'air chargé de vapeur d'eau se déplace dans les parois par diffusion au sein des matériaux. Si en un point de la paroi, la température de rosée est atteinte, l'air va se condenser et charger le mur en humidité. Le placement d'une barrière étanche à la vapeur d'eau du côté intérieur peut être une solution intéressante pour empêcher les transferts de vapeur de l'intérieur vers l'extérieur. Cependant, cette membrane empêche aussi le séchage du mur vers l'intérieur en été et au printemps, ce qui peut causer une accumulation d'humidité dans les matériaux.

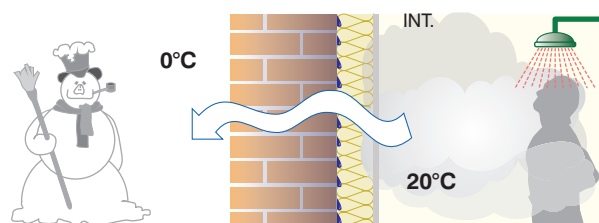
### 2.2.1 RISQUE PRINCIPAL

Dans nos climats tempérés ou froids, les différences de température entre l'intérieur et l'extérieur peuvent être importantes. L'air chaud à une plus grande capacité à contenir de la vapeur d'eau et la pression de vapeur est souvent supérieure à l'intérieur qu'à l'extérieur. Ce différentiel de pression de vapeur engendre une migration de vapeur par diffusion vers l'extérieur.

Au fur et à mesure qu'elle traverse les différents matériaux constituant l'enveloppe, la vapeur se rapproche de l'extérieur et se refroidit progressivement. Si la température du point de rosée est atteinte, la vapeur se condense (cf. diagramme de Molier présenté au chapitre précédent). On parle alors de condensation d'hiver.

L'humidité peut dégrader les matériaux et avoir des conséquences sur la durabilité de la paroi et de ses performances ainsi que sur le confort et la santé des habitants. Les problèmes de condensation interne apparaissent souvent derrière, ou dans, l'isolant, dans le voisinage de la paroi en maçonnerie plus froide.

Les outils de validation classiques (statiques) conduisent presque systématiquement à placer une membrane étanche à la vapeur (et à l'air) du côté chaud de la paroi. Cependant, cette solution n'est pas toujours la meilleure comme le montre le paragraphe suivant.



Risque de condensations internes en hiver s'il n'y a pas de membrane pour réguler la vapeur.



Exemple de moisissures dues à la condensation.

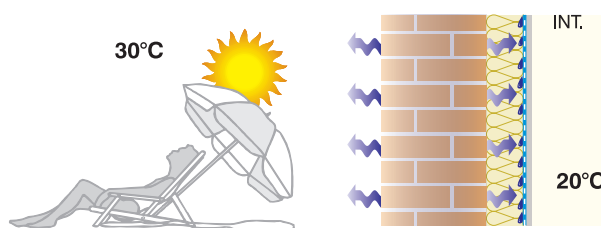
## 2.2.2 RISQUE SECONDAIRE

L'humidité présente dans les matériaux de la paroi a tendance à migrer vers les surfaces, et notamment vers l'intérieur plus chaud, où elle s'évapore à nouveau. L'utilisation d'une membrane étanche à la vapeur empêche cette évaporation du mur du côté intérieur. Le potentiel de séchage du mur étant affaibli, l'humidité risque alors de s'y accumuler.

En été et au printemps, la température et l'humidité relative de l'air extérieur sont parfois plus élevées qu'à l'intérieur, la pression de vapeur peut être plus élevée à l'extérieur qu'à l'intérieur (flux d'humidité vers l'intérieur). Bloquée par une éventuelle membrane, la vapeur qui migre vers l'intérieur peut condenser en arrivant contre celle-ci.

On parle alors de « condensations d'été ». Elles apparaissent entre cette membrane et l'isolant provoquant alors une perte de performance de l'isolant humidifié et des risques de moisissures s'il y a du bois ou des matériaux organiques dans cette couche du mur.

La troisième partie du guide présentera les membranes dites « intelligentes » qui permettent de réduire ce type de risque.



Risque de condensations internes en été si une membrane pour réguler la vapeur empêche la migration de vapeur vers l'intérieur..



Exemple de moisissures à l'arrière de la membrane pour réguler la vapeur.

## 2.3. CONDENSATIONS INTERNES PAR CONVECTION

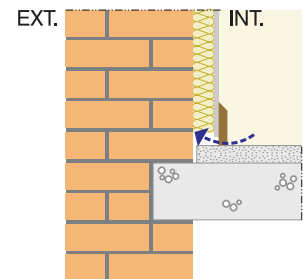
Des défauts d'étanchéité à l'air de la face intérieure de l'enveloppe peuvent engendrer des transferts de vapeur d'eau par convection. L'air qui transite emporte avec lui une grande quantité de vapeur. À nouveau, des condensations internes sont possibles si, en un point de la paroi, cet air atteint la température de rosée. Les dégâts probables sont d'autant plus importants que la quantité de vapeur d'eau est concentrée en des points particuliers.

L'air étant un fluide, une surpression à l'intérieur le pousse à chercher tous les points faibles pour rejoindre l'extérieur. Une mauvaise étanchéité à l'air de la face intérieure du système d'isolation mis en place est suffisante pour permettre à l'air chaud et humide de l'intérieur d'entrer en contact avec des surfaces froides normalement inaccessibles, ou de migrer à travers le composant, vers l'ambiance extérieure.

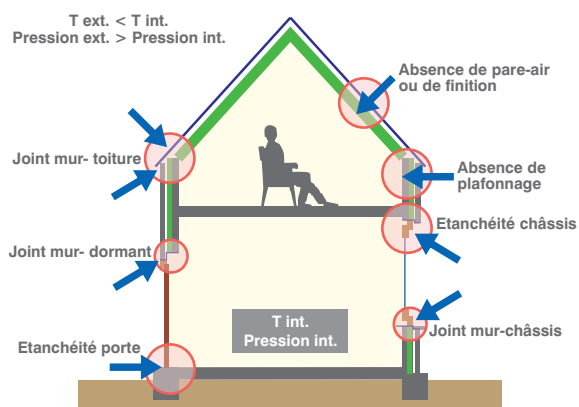
Ces défauts d'étanchéité ont des effets équivalents, et souvent plus graves, du point de vue des déperditions énergétiques, des condensations ou des éventuelles moisissures que les ponts thermiques. En effet, les condensations risquent d'être concentrées en des points particuliers de la paroi (ponts thermiques, jonctions entre lés du pare-vapeur, raccords entre différents éléments, passages de canalisations, etc.) et les dégâts sont alors amplifiés.

Ces convections peuvent apparaître dans l'épaisseur d'isolant (si le matériau est fortement perméable à l'air), ou derrière l'isolant (dans le cas où une lame d'air persiste derrière un isolant en panneau). Les effets de convection peuvent être dus à une mauvaise conception, à une mauvaise mise en oeuvre ou à un percement ultérieur (placement d'une prise ou d'un interrupteur, suspension d'un objet...). On peut dès lors les éviter dans la majorité des cas.

Le problème des infiltrations d'air est donc fondamental du point de vue de la performance énergétique des bâtiments et des risques de désordres. La figure ci-dessous repère les endroits où l'on rencontre fréquemment des infiltrations, et les photos montrent un exemple de test « Blower Door » qui permet de quantifier les infiltrations effectives d'un bâtiment. Une différence de 50 Pa est instaurée entre le bâtiment (ou la zone) et l'extérieur avant de mesurer le renouvellement d'air que cela génère, et de déduire si l'étanchéité à l'air est suffisante.



Effet de convection entre l'ambiance intérieure et l'arrière du complexe isolant.



A gauche : Infiltrations d'air fréquentes dans les bâtiments. A droite : Test blower door - côté extérieur et intérieur.



## 2.4. GEL ET DILATATIONS DE MAÇONNERIE

L'isolation par l'intérieur entraîne le refroidissement et l'humidification du mur existant en brique ce qui réduit son potentiel de séchage. Si l'eau présente dans le mur ne parvient plus à s'évaporer en suffisance, par temps froid, elle risque de geler, ce qui peut causer des dégradations mécaniques importantes. D'autre part, le mur isolé par l'intérieur subira davantage les variations de température et d'humidité du climat extérieur. Celles-ci risquent d'engendrer des déformations mécaniques au sein du mur et, dans certains cas, porter atteinte à sa stabilité.

### ► Réduction du potentiel de séchage

Une notion importante se dégage de l'analyse du comportement hygrothermique dynamique du mur isolé par l'intérieur, elle est liée à ce que l'on peut appeler son « potentiel de séchage ».

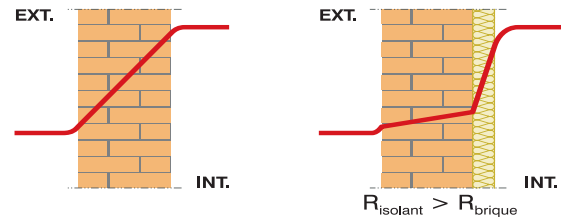
Le potentiel de séchage d'un mur est généralement réduit lors de l'application d'un système d'isolation par l'intérieur. Les figures ci-contre illustrent cette notion : l'exposition du mur aux intempéries reste inchangée, mais d'une part la maçonnerie après isolation est globalement plus froide (évaporation en surface réduite) et d'autre part, son séchage vers l'intérieur est parfois empêché par l'utilisation d'une membrane pour réguler la vapeur.

Le fait que le mur soit globalement plus froid et plus humide (le « front d'humidité » pénètre plus profondément dans le mur) peut provoquer des désordres liés au gel sur la face extérieure. En effet, la formation de gel provoque une dilatation de l'eau dans les pores de la brique qui peut conduire à une forte dégradation mécanique de celle-ci.

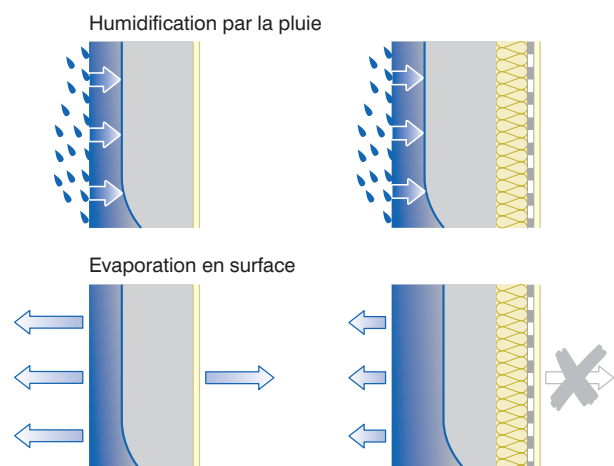
### ► Conditions causant des dégâts dus au gel

La photo ci-contre montre le cas de briques gélives soumises au gel. Ces désordres dépendent de trois conditions :

- la sensibilité au gel de la brique,
- la teneur en eau atteinte dans la brique (cf. « teneur en eau critique »),
- la température atteinte dans la brique (le gel n'apparaît que si celle-ci descend sous 0 °C).



Refroidissement dur mur par l'application d'une isolation par l'intérieur.



Humidification du mur due à la réduction du potentiel de séchage causée par l'application d'une isolation par l'intérieur et d'un pare-vapeur.



Exemple de briques gélives soumises au gel.

## ► Dilatations de maçonnerie

En parallèle, l'isolation par l'intérieur entraîne des variations de température et d'humidité plus franches au sein du mur puisque celui-ci subira davantage le climat extérieur (l'isolation le séparant de l'ambiance intérieure). Les déformations mécaniques (retraits/dilatations) liées à ces variations peuvent engendrer des ruptures locales dans la surface du mur, entraînant l'apparition de fissures. Ces fissures n'ont parfois que des conséquences esthétiques, mais peuvent aussi porter atteinte à la stabilité du mur ou favoriser la pénétration en profondeur de l'humidité.

De nombreuses recherches sont hélas encore nécessaires pour disposer d'un modèle adapté et pour effectuer les mesures nécessaires pour acquérir les valeurs relatives aux matériaux. Il n'est donc actuellement pas encore possible d'anticiper précisément le comportement mécanique d'un mur après l'application d'une isolation par l'intérieur.

## ► Conclusion

On considèrera que l'application d'un système d'isolation par l'intérieur aura tendance à aggraver la situation existante si rien n'est fait pour limiter la pénétration de l'eau de pluie (hydrofuge de surface, enduit ou bardage) et pour maintenir le potentiel de séchage du mur. Dès lors, pour un mur présentant déjà des risques de dégradation dus au gel ou aux déformations hygrothermiques, on évitera l'application d'une telle isolation.



## 2.5. EFFLORESCENCES DE SELS

Les efflorescences sont dues à la cristallisation de sels présents initialement dans les matériaux ou issus d'une source extérieure. Dans un mur existant contenant des ions de sel, les modifications de température et d'humidité qui s'opèrent au sein du mur de par l'isolation par l'intérieur peuvent influencer la quantité de sels dissous. Si celle-ci augmente, la quantité de sels qui cristallisera augmentera également entraînant des conséquences plus marquées au niveau esthétique et parfois au niveau structurel.

### ► Principe général

Les efflorescences sont dues à la cristallisation de sels suite à l'évaporation de l'eau qui les contient, lors d'une période de séchage consécutive à une période d'humidification. Les efflorescences apparaissent donc surtout au printemps.

La cristallisation des sels provoque une augmentation de la pression dans les pores du matériau ayant pour conséquence des éclatements de la maçonnerie. Il y a deux types d'efflorescences de sels : celles qui se produisent en surface et celles qui se produisent dans la structure poreuse des matériaux.



Exemple d'efflorescences de sels.

Source : <http://www.masonryworktools.com>.

Les efflorescences de surface n'entraînent aucun dommage au niveau des matériaux, mais provoquent des effets esthétiques indésirables. Les efflorescences apparaissant dans la structure de la brique peuvent quant à elles provoquer une dégradation prématurée de celle-ci.

Les efflorescences de sels constituent un phénomène complexe dans l'étude globale de la durabilité des maçonneries en briques de terre cuite. Cette complexité est liée au nombre élevé de paramètres intervenant dans le problème. Les trois points suivants définissent les conditions principales qui doivent être remplies pour rencontrer des problèmes liés aux sels.

### ► Conditions à remplir

#### Présence de sels

La présence de sels n'est pas directement liée à la réalisation d'un système d'isolation par l'intérieur : des ions de sel doivent être initialement présents dans les matériaux ou être issus d'une source extérieure. Les efflorescences apparaissent souvent par l'interaction de la brique et d'un mortier hydraulique. Les sels peuvent également venir de remontées capillaires, de l'aspersion de sels de dégivrage ou de réaction de gaz pollués avec la chaux présente dans les matériaux. Le type de sels et leurs effets dépendent du matériau de la maçonnerie. Si aucun sel n'est présent ou introduit dans la maçonnerie, la pose d'une isolation par l'intérieur n'entraînera pas de problème lié aux sels.

#### Humidité de la brique

Les sels sont caractérisés par une grande solubilité et apparaissent plus fréquemment sur les façades les plus exposées aux intempéries (orientation sud-ouest). Comme on l'a vu, l'application d'un système d'isolation par l'intérieur conduit à une maçonnerie globalement plus froide et plus humide si rien n'est fait pour limiter la pénétration de l'eau de pluie et pour maintenir le potentiel de séchage du mur.

Si la solubilité des sels décroît quand la température diminue, l'humidité accrue du mur favorise la disso-

lution des sels présents. L'application d'une isolation par l'intérieur sur une maçonnerie contenant des sels peut donc influencer la quantité de sels dissous. Il est toutefois difficile d'évaluer quel paramètre (température ou humidité) aura le plus d'influence.

#### Recristallisation des sels dissous

Quand le climat extérieur se réchauffe, le séchage du mur s'accélère et les sels dissous migrent vers le front de séchage. Il y a donc saturation puis recristallisation des sels dissous à cet endroit. L'augmentation de la quantité de sels dissous que peut provoquer la pose d'une isolation par l'intérieur risque d'augmenter la quantité de sel qui cristallisera et ainsi augmenter les conséquences de cette cristallisation.

#### ► **Conclusion**

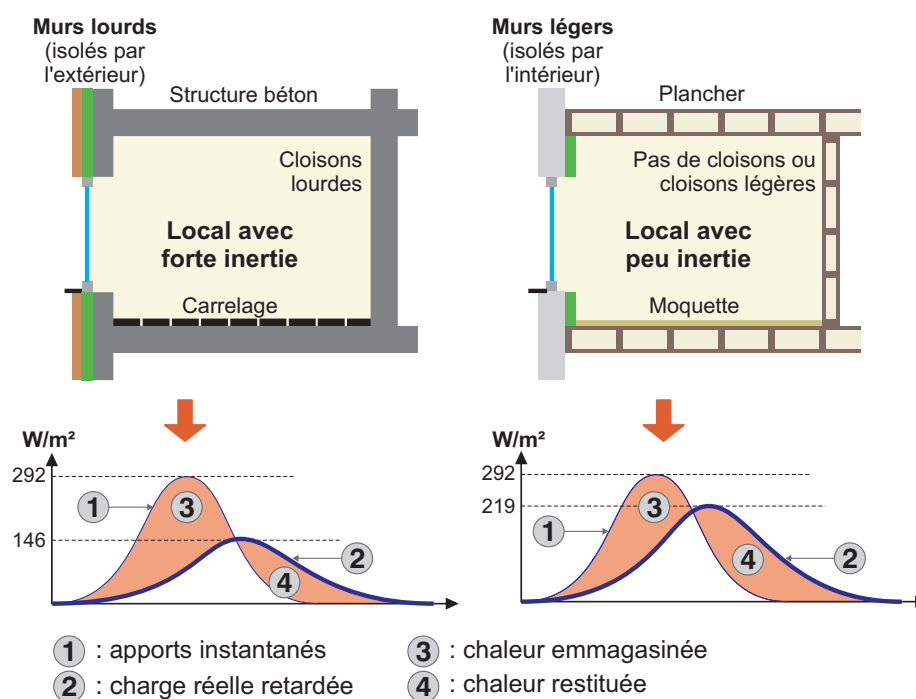
Le risque d'efflorescences et de dégâts dus aux sels dans une maçonnerie qui en présente déjà peut donc augmenter avec la pose d'une isolation par l'intérieur. Comme pour le risque de gel et de dilatations hygrothermiques, de nombreuses recherches sont encore nécessaires pour définir un modèle adapté et réaliser des mesures complémentaires.

Il n'est donc actuellement pas encore possible d'anticiper précisément la migration et la cristallisation des sels après l'application d'une isolation par l'intérieur. Une stratégie apparaît toutefois : le potentiel de séchage du mur doit être valorisé au maximum afin de garder la paroi sèche.

## 2.6. DIMINUTION DE L'INERTIE THERMIQUE ET RISQUE DE SURCHAUFFE

La réalisation d'un système d'isolation par l'intérieur rend la masse thermique du mur existant inaccessible aux échanges thermiques avec l'ambiance intérieure. En diminuant l'inertie des locaux, le risque de surchauffe augmente. La réduction de l'inertie peut être atténuée en étant attentif à garder la masse thermique des parois intérieures accessibles, en choisissant judicieusement les matériaux et en adaptant la stratégie de ventilation.

L'inertie thermique est, tout comme l'isolation thermique, un facteur essentiel de confort dans un bâtiment. L'inertie permet de lisser les variations de température à l'intérieur en stockant la chaleur et en la redistribuant plus tard dans la journée. Cela permet d'éviter les surchauffes en cas de brusque montée en température à l'extérieur ou d'apports solaires trop importants. De plus, l'inertie permet d'atténuer l'effet des chutes rapides de température à la mi-saison ou en hiver. La figure ci-dessous reprend les principes généraux associés à l'inertie thermique.



Effet de l'inertie thermique accessible.

Le fait d'isoler par l'intérieur réduit les échanges thermiques avec l'ambiance intérieure et réduit l'effet de la masse thermique de la maçonnerie sous-jacente sur l'inertie du local. En effet, ce sont les premiers centimètres de matériaux qui ont le plus d'effet sur l'inertie.

Dans les cas où l'occupation est continue et où l'on cherche à garantir une température homogène, il est dès lors utile de valoriser la masse thermique des parois intérieures, comme les dalles lourdes ou les murs intérieurs en maçonnerie, pour garantir un niveau d'inertie suffisant au local malgré la pose d'une isolation par l'intérieur. Les parois exposées au rayonnement direct du soleil sont celles qui ont le plus d'impact à ce niveau-là : le sol près des fenêtres, les cloisons intérieures directement exposées...

Le choix des matériaux peut avoir un effet important sur l'inertie thermique des locaux. Selon leur capacité thermique, leur effusivité et leur diffusivité<sup>7</sup>, les matériaux ont des comportements différents face au rayonnement solaire et à la chaleur. L'inertie d'un local peut être améliorée en privilégiant des isolants et les finitions dont la diffusivité est basse et l'effusivité élevée (enduits à l'argile, à la chaux, mélange chaux-chanvre) et en mobilisant la masse thermique du cloisonnement intérieur (béton, briques, terre crue). Les caractéristiques de nombreux matériaux seront présentées dans la troisième partie du guide (voir tableaux du paragraphe 3.3.2).

Les matériaux à base de fibres organiques semblent avoir des caractéristiques particulières du point de vue de l'inertie thermique. Les échanges d'humidité entre la paroi et l'ambiance intérieure peuvent provoquer des effets thermiques de chaleur latente non négligeable. Ce serait le cas des matériaux du type chaux-chanvre ou des matériaux à base d'argile, mais ces effets sont encore trop peu étudiés et dépassent le cadre de ce document.



Enduit chaux-chanvre au fond et enduit à l'argile à gauche. Enduit à l'argile.

Remarquons enfin qu'il n'est pas toujours conseillé d'avoir une forte inertie thermique. Les cas des locaux à occupation intermittente demande parfois d'avoir une grande réactivité en termes de régulation thermique. Ceux-ci doivent parfois atteindre une température confortable en un temps court (température de l'air et température de surface), ce qui est plus difficile avec un local ayant une forte inertie. On pense par exemple aux salles d'eau, mais aussi aux classes d'une école. Dans ce cas, une inertie thermique réduite permet aussi de limiter la puissance de relance nécessaire du système de chauffage.

7. Ces paramètres sont définis dans la première partie du guide au paragraphe 1.3.3.

# 3

## STRATÉGIES DE CONCEPTION ET DE RÉALISATION

Pour faire un choix raisonné de système d'isolation par l'intérieur, il est important de mettre en place une véritable stratégie dès les premières phases de sa conception et jusqu'à sa réalisation proprement dite, en envisageant même de baliser les étapes ultérieures d'utilisation du bâtiment ou de travaux d'entretien ou de modification. Cette partie présente les différentes étapes importantes de ce processus et l'ordre dans lequel il faudra les aborder.

On verra que le choix du système d'isolation par l'intérieur ne peut être envisagé qu'après avoir analysé en profondeur la situation existante sur laquelle il va falloir intervenir. Un relevé précis des parois existantes, du climat et de l'exposition sera donc fondamental. L'état général de conservation, ainsi que d'éventuels problèmes d'humidité déjà présents avant les travaux, devra également faire l'objet d'une attention particulière. L'évaluation des caractéristiques hygrothermiques des parois existantes est une tâche difficile, mais qui aura des conséquences importantes sur la qualité de l'analyse et du choix éventuel d'un système ou d'un autre. De plus, une connaissance précise des enjeux programmatiques et des exigences particulières des commanditaires est aussi fondamentale pour satisfaire leur demande.

Ce n'est qu'alors que le concepteur pourra aborder le choix proprement dit d'un système particulier : choix des matériaux, du type de mise en œuvre et des performances. Ce choix impliquera des solutions constructives qui entraîneront vraisemblablement des nœuds constructifs spécifiques qu'il faudra alors analyser en détail pour tenter de résoudre ou d'atténuer les problèmes qu'ils risquent d'engendrer. Ainsi, après vérification du comportement des parois et des nœuds constructifs, il faudra peut-être revoir le choix qui a été fait et l'adapter pour éviter les risques hygrothermiques, chimiques ou mécaniques abordés dans la partie précédente.

Une dernière étape fondamentale consiste à vérifier que la mise en œuvre est d'une qualité irréprochable et qu'elle correspond bien à ce qui a été prévu par le concepteur. Une présence attentive et répétée à chaque étape importante de la mise en œuvre sera le meilleur moyen de se prémunir des désordres liés à une mise en œuvre de mauvaise qualité. Enfin, il est toujours préférable de sensibiliser les propriétaires et occupants par rapport aux risques qu'ils encourent à ne pas veiller à la bonne tenue dans le temps du système d'isolation par l'intérieur. Le suivi des consommations et les entretiens adaptés ont, à ce niveau, une importance significative.



## 3.1. ANALYSE DE LA SITUATION EXISTANTE

L'analyse de la situation existante est une étape préliminaire indispensable à toute conception d'isolation. Pour concevoir l'isolation par l'intérieur d'une paroi et en comprendre les phénomènes hygrothermiques, il est important de connaître la situation générale (climat intérieur et extérieur) ainsi que les caractéristiques du mur existant et des matériaux ajoutés. Dans ce chapitre sont abordés tous les points touchants au contexte général et à l'enveloppe du bâtiment existant.

### 3.1.1 CONTEXTE DU PROJET

#### ► Situation générale

Chaque projet est différent, les besoins du maître d'ouvrage, ses exigences et son programme réduisent les possibilités offertes aux maîtres d'œuvre. Ceux-ci doivent s'imprégner de l'ensemble des contraintes pour y répondre au mieux. Ainsi, il est très important de prévoir de se rendre sur le futur chantier pour pouvoir se faire une idée concrète de la situation initiale de l'ensemble du bâtiment. Les données suivantes doivent être relevées :

- Type de sol, pente et ruissellement, accès ;
- Situation, orientation, ombrage des autres bâtiments et de la végétation ;
- Protections éventuelles par rapport au soleil, au vent, aux pluies battantes et à l'humidité ascendante ;
- État de conservation (matériaux, systèmes, réseaux...) et valeur patrimoniale.

#### ► Climat extérieur

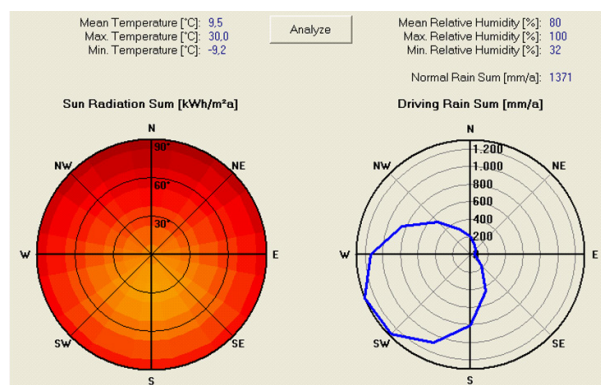
Le climat extérieur, c'est-à-dire la température et l'humidité, mais aussi l'ensoleillement, la pluie, le vent, la pression, ainsi que le contexte (orientation, voisinage, ombres portées...) ont un effet important sur le comportement hygrothermique des parois. Ces conditions peuvent varier au cours du temps, et leur influence est parfois complémentaire, parfois contradictoire. Au plus d'informations on aura sur celles-ci, au plus précis sera l'analyse du comportement des parois.

#### Orientation et exposition

Pour Uccle, on remarque sur les schémas suivants que l'ensoleillement le plus favorable (séchage, apports gratuits) est le sud. Par contre, l'orientation la plus défavorable pour la pluie (humidification et chaleur latente d'évaporation) est le sud-ouest. L'un compensant partiellement l'autre, le sud-ouest a été choisi comme orientation critique. Une autre orientation qui peut se révéler critique est le nord, car, si elle présente peu de pluie (à Uccle), elle ne reçoit que peu d'ensoleillement direct et est donc globalement plus froide.

#### Pluie battante

La quantité d'eau qui touche le mur a un impact très important sur le profil d'humidité du mur (répartition de la teneur en eau). Cette quantité peut être estimée suivant l'orientation et l'inclinaison de la paroi.



Rayonnement solaire et pluies battantes à Uccle, Bruxelles.  
Source : Wufi

### Rayonnement solaire

L'intensité du rayonnement solaire, la couleur et l'orientation des parois sont des paramètres importants. À propriétés égales (notamment la perméabilité à la vapeur et l'absorption d'eau), on constate par exemple qu'au plus une paroi est foncée et rugueuse, au plus vite elle se chauffe et au plus vite elle séchera.



### Vent

Le vent augmente l'effet de convection à la surface des parois, ce qui renforce l'échange thermique avec l'air ambiant. Certains modèles permettent de prendre en compte cette influence. Remarquons que la force du vent n'est pas la même selon l'altitude, et, sur les bâtiments de grande hauteur, l'influence du vent est dès lors différente sur les parois des étages inférieurs que sur les parois des étages supérieurs.

### ► **Climat intérieur**

Le comportement hygrothermique des parois est aussi influencé par le climat intérieur. En effet, tous les transferts d'humidité et de chaleur qui se créent à travers la paroi sont dus à la différence de climat qui existe entre l'extérieur et l'intérieur. Si la prise en compte du climat intérieur et de la qualité de l'air fait partie de l'analyse de l'état existant, il est important de noter que le climat intérieur sera certainement différent après la réalisation du système d'isolation par l'intérieur. De plus, le climat intérieur pourra être différent dans chaque zone du bâtiment, voire dans chaque local. Les problèmes de condensation ou de moisissures ne seront par exemple pas les mêmes dans les pièces chaudes (séjour) et dans les pièces froides (chambres), dans les pièces humides (salles de bains) et dans les pièces sèches.

Différentes normes permettent de caractériser le climat intérieur selon le type d'activité, la charge en humidité (la production d'humidité est souvent liée à l'occupation), le niveau de ventilation, le type de système de chauffage ou de conditionnement de l'air qui prendront place dans la zone concernée. En Belgique, 4 classes de climat sont définies dans la NIT 215. Au niveau européen, citons la norme EN 13788 et la norme EN 15026. L'association américaine ASHRAE a, elle aussi, défini ses critères propres dans sa norme ASHRAE 160P.

## **3.1.2 CARACTÉRISTIQUES DU MUR EXISTANT**

### ► **Propriétés de la maçonnerie**

Connaître les propriétés des matériaux composant le mur existant n'est pas toujours évident. Le cas qui nous occupe est celui des murs pleins, maçonnés en briques pleines. La diversité des murs qui répondent à ce critère est plus grande qu'on ne pourrait le croire au premier abord. En effet, trois principales classes de briques pleines ont été identifiées dans le bâti existant en Belgique :

- Les briques moulées à la main « anciennes »,
- Les briques moulées à la main « modernes »,
- Les briques pressées.

Selon la provenance, et même pour un site de production donné, selon le moment de la production, les caractéristiques des briques varient, principalement en fonction de leur composition, du type de cuisson, du type de séchage et de l'état de surface. Enfin, les caractéristiques d'ensemble de la maçonnerie que ces briques composent, varient elles aussi selon l'âge du mur, le type de mortier utilisé, les sollicitations ou dégradations que le mur a subies...



En cas de doute, certaines techniques relativement faciles à mettre en oeuvre permettent d'étudier les caractéristiques des briques composant le mur existant. Celles-ci seront abordées ci-après. Une analyse préalable a montré que l'influence du type de mortier (mortier à la chaux vs. mortier au ciment) est significativement moins importante que celle des paramètres hygrothermiques propres à la brique elle-même. Parmi ceux-ci, les paramètres relatifs aux transferts d'eau liquide sont prépondérants.

### ► Résistance thermique

Il est important de connaître la conductivité thermique  $\lambda$  et l'épaisseur du mur existant. Il est parfois nécessaire d'effectuer un carottage afin d'évaluer la densité  $\rho$  de la brique et de pouvoir en déduire une conductivité thermique probable. La norme CEN TC 125 – Annexe A donne une approximation des valeurs pour la conductivité thermique ( $\lambda$ ) et le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau ( $\mu$ ) selon la densité ( $\rho$ ) de la brique. Malheureusement, une série complète de valeurs relatives à une brique donnée (même récente) est encore rarement disponible. L'humidité contenue dans les matériaux ayant un impact sur la conductivité thermique de ceux-ci, il est préférable, dans le doute, de surévaluer la conductivité thermique pour considérer cette influence.

### ► Diffusion de vapeur d'eau

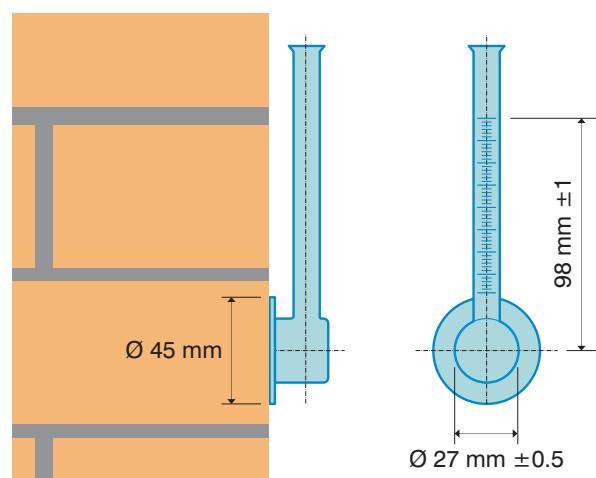
Cette valeur est très importante pour évaluer la quantité de condensats dans le mur et le potentiel de séchage du mur. Ce coefficient  $\mu$  est rarement connu pour les murs existants, mais il peut également être estimé à partir de la densité de la brique.

### ► Transfert d'eau liquide

Il est essentiel de caractériser le transfert d'eau liquide au sein de la structure poreuse des matériaux pour évaluer les risques liés aux condensations et/ou aux pluies battantes. L'eau présente au sein des matériaux peut migrer ; cette migration dépend du type de matériau et de sa porosité. Une méthode approximative permet de déterminer le coefficient d'absorption, A, de la brique en plaçant un échantillon du matériau dans une couche d'eau de 5 mm et en mesurant la quantité d'eau absorbée par celui-ci pendant 24 heures. Le coefficient d'absorption est le coefficient angulaire de la droite représentant l'évolution de la masse de l'échantillon en fonction de la racine carrée du temps. Dans le cas d'une rénovation, il ne semble toutefois pas toujours évident de prélever un échantillon de brique du mur pour pouvoir l'analyser.

Une autre méthode, celle de la pipe de Karsten (ou pipe en verre) peut être utilisée pour déterminer le coefficient d'absorption A. Celle-ci est relativement peu précise, mais permet de faire une mesure in situ sans avoir à prélever un échantillon de mur.

Elle consiste à mesurer la quantité d'eau absorbée par la brique en fixant une pipe en verre, illustrée ci-contre, à la surface du mur existant à l'aide d'un mastic souple préformé assurant la tenue et l'étanchéité. La colonne d'eau est remplie jusqu'au niveau zéro et l'on mesure l'évolution du niveau d'eau en fonction du temps grâce aux graduations du tube. En général, plusieurs mesures doivent être réalisées pour améliorer la précision (idéalement sur la brique, ou la pierre, et sur le joint).



Mesure de l'absorption d'eau à l'aide d'une pipe de Karsten.  
Source : CSTC - NIT 224 Hydrofugation de surface, juin 2002.

## ► Teneur en eau

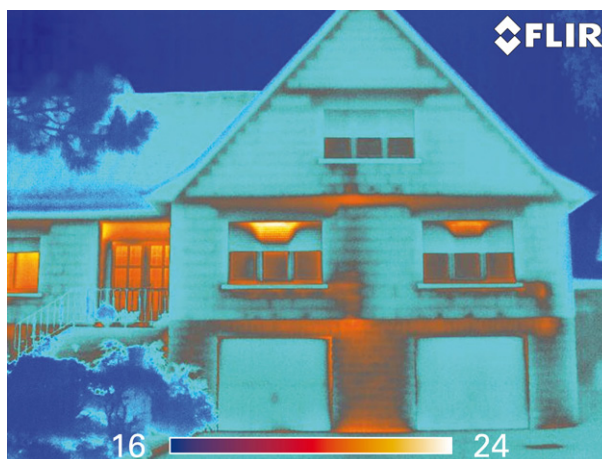
Si la distribution de la température au sein du mur s'adapte assez vite, la distribution de la teneur en eau, elle, pourra mettre plusieurs mois, voire plusieurs années pour retrouver un nouvel équilibre après la réalisation du système d'isolation par l'intérieur. Il est donc important de tenir compte de l'état initial du mur en termes de répartition de l'humidité afin d'identifier d'éventuels problèmes d'humidité présents avant la réalisation du système d'isolation par l'intérieur.

En effet, le mur peut avoir subi des problèmes d'humidité au cours de sa vie : remontées capillaires, fuites de canalisation, désordres dans l'éégouttage des eaux de toitures... La source d'humidité a peut-être disparu, mais le problème ne s'est peut-être pas encore résorbé et peut provoquer un comportement atypique du mur après la réalisation du système d'isolation par l'intérieur. Il est donc fortement conseillé de réaliser une mesure de l'humidité, soit par carottage, soit de façon non destructive, grâce à un instrument de mesure prévu à cet effet. Trois grands types d'instrument existent, mesurant soit une variation de conductivité électrique, soit une variation de capacité électrique, soit encore une variation de réponse magnétique entre le matériau sec et le matériau humide.

### 3.1.3 DÉTECTION DES PONTS THERMIQUES

En rénovation, il est essentiel de réaliser une étude spécifique de cette problématique. Pour commencer, une recherche exhaustive des ponts thermiques existants devra être réalisée à l'aide des outils adéquats : thermographie, thermomètres de surface, etc. La thermographie n'est toutefois possible que par des températures extérieures basses (hiver).

Une fois les ponts thermiques localisés, il faudra étudier les solutions pour les supprimer ou au moins les atténuer. Il n'est pas évident de résoudre l'ensemble des ponts thermiques, surtout en rénovation lorsque l'aspect extérieur et/ou intérieur de la paroi doit être préservé. Des pistes de solutions seront présentées au chapitre 3.4.



La thermographie peut révéler des ponts thermiques au droit des dalles de sol et des linteaux en béton.

Source : [www.flir.com](http://www.flir.com).

## 3.2. CONCEPTION DU SYSTÈME D'ISOLATION PAR L'INTÉRIEUR

Une fois que l'on a une bonne vision d'ensemble de la situation existante, il s'agit de définir les bases de la conception du projet d'isolation. On se questionnera d'abord sur l'intérêt de rénover plutôt que de reconstruire. Ensuite, on envisagera d'autres solutions que l'isolation par l'intérieur (isolation par l'extérieur ou par remplissage de la coulisse). Ce n'est qu'alors qu'on entamera la conception proprement dite du système d'isolation par l'intérieur en fixant les performances thermiques à atteindre, le mode constructif et le type de matériau. Le choix de la membrane pour réguler la vapeur devra se faire après une analyse précise de ses conséquences. Enfin, il faudra également vérifier que les systèmes de chauffage et de ventilation conviennent à la situation rénovée et de prévoir des adaptations et/ou des nouvelles installations si nécessaire.

### 3.2.1 PRÉLIMINAIRES

#### ► Bilan écologique et choix du système

A priori, le bilan écologique d'une rénovation semble favorable vu que l'existant est en quelque sorte « recyclé ». Cependant, cela dépend de l'état initial du bâtiment et des performances que l'on souhaite atteindre. Par exemple, pour aller jusqu'au standard passif, il est souvent nécessaire d'intervenir de façon plus poussée sur la structure du bâtiment, ce qui implique davantage de démolitions et de reconstructions et donc un alourdissement du bilan énergétique et environnemental global.

Si l'on opte pour une rénovation, il est important de voir si l'isolation par l'intérieur est la seule solution envisageable. En effet, comme nous l'avons vu dans la première partie du guide, cette technique comporte de nombreux risques et tant la conception que la mise en oeuvre des détails devront faire l'objet d'une attention particulière.

Vu les difficultés techniques et les limites d'efficacité pouvant être rencontrées au niveau de l'isolation par l'intérieur, il peut parfois s'avérer plus intéressant tant au niveau économique qu'écologique de démolir et de reconstruire plutôt que de rénover. Il convient donc de se poser la question, du moins face aux bâtiments ne présentant pas d'intérêts techniques, esthétiques ou patrimoniaux.

#### ► Niveau de performance thermique

La première étape consiste à fixer les objectifs de performance thermique que l'on souhaite atteindre. En rénovation, surtout dans les bâtiments classés, il n'est pas toujours possible d'arriver à un coefficient de transfert thermique de  $0,4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . Les épaisseurs d'isolation posées du côté intérieur sont souvent limitées, que ce soit pour préserver l'esthétique des parois (moultures...) ou l'habitabilité des espaces quand ceux-ci sont déjà exigus.

Toutefois, même quand la norme n'impose pas d'atteindre des performances poussées, le fait d'isoler au mieux permet de pallier les principales insuffisances de l'enveloppe, d'améliorer le confort des occupants et d'économiser l'énergie. Si les épaisseurs mises en oeuvre sont très faibles, on ne parlera plus d'isolation, mais plutôt de « correction thermique ». Bien que l'effet de celle-ci soit limité, il n'est pas négligeable vu que ce sont les premiers centimètres d'isolant qui sont les plus efficaces.

Il est parfois aussi intéressant d'envisager une isolation partielle de l'enveloppe. Les images ci-dessous illustrent par exemple un cas où seules les allèges ont été isolées afin de préserver la symétrie des moulures au plafond. Les performances thermiques de cette maison ont été améliorées malgré le fait que seule une partie de la façade à rue ait pu être isolée.<sup>8</sup>



Une isolation correctement mise en oeuvre permettra, outre l'amélioration des performances thermiques, une augmentation de la température de surface qui diminuera le risque de condensation de surface et de moisissures et augmentera la sensation de confort.

Le fait d'isoler un mur existant par l'intérieur provoque, on l'a vu, un refroidissement global du mur par rapport à la situation initiale. Au plus on isole, au plus ce phénomène se renforce et au plus il risque de provoquer une humidification du mur par réduction de son potentiel de séchage et une augmentation des risques liés à la condensation interne. Le niveau de performance thermique choisi lors de la réalisation d'un système d'isolation par l'intérieur a donc une importance significative sur le comportement du mur.

### 3.2.2 SYSTÈMES<sup>9</sup>

#### ► Chauffage

Si aucun système de chauffage n'existait avant les travaux d'isolation, il faut prévoir une nouvelle installation complète permettant de maintenir des températures intérieures confortables pour les habitants. Un choix adéquat ne pourra se faire qu'en connaissant la performance d'ensemble du bâtiment. Si des corps de chauffe sont nécessaires, il est préférable de les placer le long des parois les plus froides afin d'augmenter leur température de surface et de réduire les risques de condensation.



Si un système existait déjà, il est souvent nécessaire de l'adapter pour s'assurer que celui-ci convient à la nouvelle situation. En effet, l'installation risque d'être surdimensionnée par rapport aux besoins qui auront baissé grâce à l'isolation de l'enveloppe.

8. Pour plus d'informations sur ce projet, voir : <http://www.lehr.be/FR-P-DeNys.htm>.

9. Ce paragraphe dépasse le cadre de ce guide. Des informations plus détaillées relatives à la conception du chauffage et de la ventilation en rénovation sont reprises dans de nombreux documents. Citons par exemple le projet LEHR (Low Energy Housing Retrofit), où différents documents ont été produits dont un "Guide de la rénovation basse énergie des logements en Belgique" réalisé par Architecture et Climat et un guide technique réalisé par le CSTC dont un chapitre est dédié à la ventilation et un autre au chauffage. Tous ces documents sont téléchargeables sur le site Internet : <http://www.lehr.be>. De nombreuses informations sur ces sujets peuvent également être trouvées dans l'outil Energie +, réalisé par Architecture et Climat et accessible sur le site Internet : <http://www.energieplus-lesite.be>. Cet outil traite de la conception et la rénovation des bâtiments tertiaires mais certains principes peuvent être généralisés au logement.

La qualité d'une installation de chauffage est définie par la qualité du système de production de chaleur, de la distribution, du système d'émission ou des corps de chauffe, et de la régulation. Chacun de ces aspects devra être analysé pour vérifier qu'il convient à la nouvelle situation, après la réalisation du système d'isolation par l'intérieur. Une installation performante, bien entretenue et bien régulée permettra des économies d'énergie importantes.

## ► Ventilation

### Ventilation hygiénique

Dans la plupart des bâtiments anciens, de nombreuses infiltrations d'air se produisent au droit des défauts d'étanchéité de l'enveloppe (cf. schéma p. 29). Celles-ci entraînent des déperditions et donc des consommations d'énergie importantes, mais permettent aussi une certaine « ventilation » du bâtiment. Si le bâtiment devient très étanche, ces pertes diminuent, mais l'humidité n'est plus évacuée.



Il est donc primordial lorsqu'on isole l'enveloppe d'un bâtiment de concevoir en parallèle une stratégie de renouvellement d'air qui prenne en charge les aspects suivants :

- satisfaire les besoins en oxygène des occupants,
- évacuer la vapeur d'eau dégagée par les occupants et leurs activités,
- limiter la pollution intérieure (CO<sub>2</sub> et autres polluants intérieurs),
- améliorer le confort en éliminant odeurs et fumées.

En principe, on considère qu'un renouvellement d'air de 30 m<sup>3</sup>/h par personne doit être prévu au niveau des logements pour maintenir la qualité de l'air et évacuer l'humidité produite à l'intérieur du logement.

Les débits de ventilation minimaux qui doivent pouvoir être assurés et qui garantissent la qualité de l'air d'un bâtiment résidentiel sont définis par la norme belge NBN D50-001 (norme européenne EN 13779), selon le type de local et sa surface. Ils ont été définis sur base de la concentration de polluants dans l'ambiance. Cette norme définit également les 4 stratégies (ou systèmes) de ventilation présentés ci-dessous. Leur mise en oeuvre conforme aux prescriptions de la norme est un gage de qualité de l'installation.

Systèmes de ventilation	Locaux de vie (séjours, chambres, bureaux, ...)	Locaux humides (salles de bain, wc, cuisine, ...)
Système A - Ventilation naturelle	Amenée d'air, par exemple par des grilles réglables dans les menuiseries.	Evacuation par des cheminées verticales.
Système B - Ventilation simple flux par pulsion mécanique (rare)	Pulsion mécanique.	Evacuation par des cheminées verticales.
Système C - Ventilation simple flux par extraction mécanique	Amenée d'air par des ouvertures réglables (généralement dans les châssis).	Extraction mécanique.
Système D - Ventilation mécanique double flux	Pulsion mécanique.	Extraction mécanique.

Plus l'isolation thermique et l'étanchéité seront efficaces, plus grande sera la proportion de pertes énergétiques par ventilation par rapport à l'énergie totale consommée pour le chauffage. Si l'enveloppe est fortement isolée, il est utile de prévoir une ventilation mécanique double flux avec récupération de chaleur.

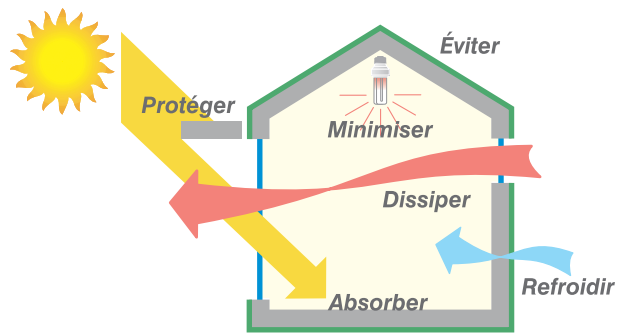
### Ventilation intensive

L'isolation par l'intérieur a pour effet de diminuer l'inertie des espaces intérieurs, ce qui peut entraîner des surchauffes pendant les périodes estivales. Le choix des matériaux utilisés peut permettre de limiter ce problème.

D'autres stratégies peuvent être mises en place afin de limiter les surchauffes. Il peut notamment être intéressant de prévoir une ventilation naturelle intensive, de jour ou surtout de nuit, permettant d'évacuer la chaleur intérieure. Le taux de ventilation dépendra de la géométrie des espaces et des ouvertures, des températures intérieures et extérieures et de l'orientation et de la vitesse du vent.

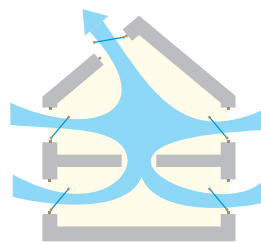
Deux grands principes peuvent être mis en oeuvre pour optimiser la ventilation naturelle :

- l'effet de cheminée, en plaçant des ouvertures en hauteur ou en jouant sur la différence de hauteur de différentes ouvertures ;
- la transversalité, en plaçant des ouvertures sur deux façades différentes.

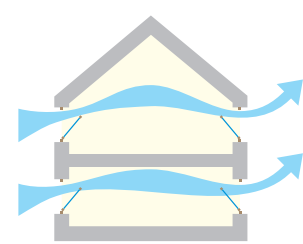


Stratégies de limitation des surchauffes :

- minimiser l'impact des gains internes,
- limiter les apports solaires et la transmission de chaleur vers l'intérieur,
- augmenter l'inertie,
- ventiler.



Ventilation par effet de cheminée.



Ventilation transversale.

### 3.2.3 CHOIX DU MODE CONSTRUCTIF

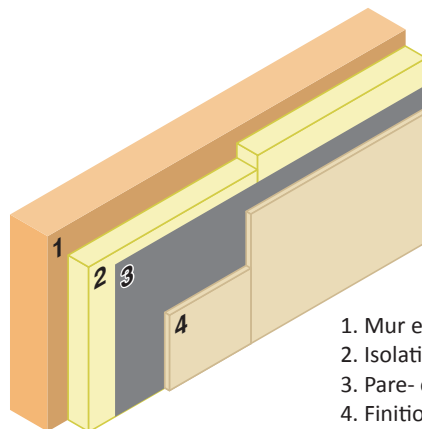
Pour l'ensemble des systèmes présentés ci-dessous, il est toujours préférable de prévoir une contre-cloison technique du côté intérieur (de 2 à 10 cm). Celle-ci est réalisée après la pose de l'isolant et de la membrane pour réguler la vapeur (et l'air) et permet de distribuer les câbles, tuyaux ou gaines (électricité, chauffage...) sans percer la membrane.

#### ► Système à panneaux isolants collés

Ce système est généralement le plus simple à mettre en oeuvre, mais la surface intérieure du mur doit être relativement plane : les défauts de planéité ne peuvent pas dépasser 15 mm sur une règle de 2 m.

#### Matériaux :

On rencontre souvent le polystyrène expansé (EPS) ou extrudé (XPS), le polyuréthane (PUR) ou les panneaux en fibres de bois. Des panneaux sandwich avec isolant, membrane et finition sont proposés sur le marché (la continuité entre les éléments doit alors être soignée). Des blocs ou des panneaux isolants en silicate de calcium collés entre eux et au support peuvent aussi être utilisés.



1. Mur existant en briques
2. Isolation rigide collée
3. Pare- ou freine-vapeur
4. Finition intérieure



Isolation réalisée à l'aide de panneaux de fibre de bois.

Gerôme Forthomme, architecte

### Mise en oeuvre :

La mise en oeuvre doit être très soignée de façon à ce que les différents panneaux soient parfaitement jointifs et que les liaisons avec les autres parois soient aussi correctement réalisées. Les panneaux isolants peuvent être recouverts de plaques de finition ou d'un enduit (lequel peut être renforcé d'une trame).

#### ► **Système à structure**

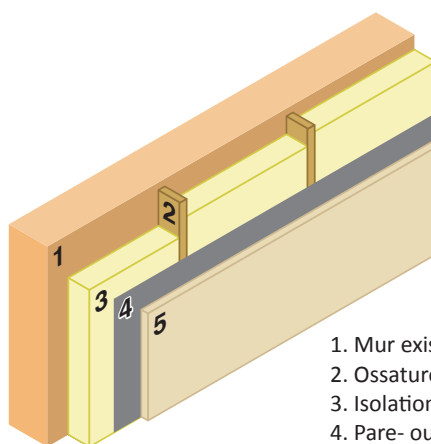
Ce système permet de rattraper les défauts de planéité du mur. Un isolant souple est posé dans une ossature bois ou métallique fixée au mur et formant des caissons. Un isolant en vrac peut également être insufflé dans l'ossature. Les éléments de structure diminuent le pouvoir isolant du complexe. Pour limiter cet effet, une plaque d'isolant rigide peut être posée sur les structures avant le pare-vapeur éventuel et la finition.

### Matériaux :

Les matériaux utilisés le plus couramment sont les rouleaux de laine minérale (MW) ou végétale, ou les isolants projetés comme la cellulose (CEL).

### Mise en oeuvre :

La mise en oeuvre doit être soignée. Il faut veiller à ce que les interruptions de l'isolant au droit de la structure soient limitées. La membrane pour réguler la vapeur doit être parfaitement continue.



1. Mur existant en briques
2. Ossature
3. Isolation souple ou en vrac
4. Pare- ou freine-vapeur
5. Finition intérieure



En haut à droite : Rouleaux de laine minérale placés entre des structures métalliques et recouverts d'un freine-vapeur à  $S_d$  variable et de plaques de fibro-plâtre. Un retour d'isolation est réalisé sur le mur de refend pour réduire l'effet du pont thermique.  
En bas : Insufflation de flocons de cellulose dans des caissons, derrière des panneaux OSB. Bandes étanches sur tous les joints.

### ► Système d'isolation projetée

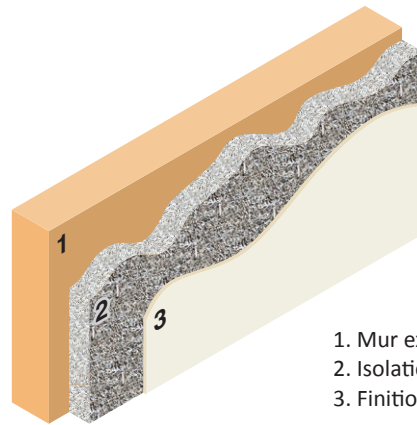
Certains isolants peuvent être directement projetés sur le mur existant en brique. Les irrégularités du mur ne posent alors plus de problèmes.

#### Matériaux :

L'isolant utilisé le plus couramment est la mousse de polyuréthane (PUR) projetée recouverte d'un enduit (qui rend les panneaux jointifs). Ces propriétés sont alors proches du cas des panneaux de XPS simulés dans l'outil ISOLIN. D'autres options existent : les mélanges chaux-chanvre (LHM), les enduits isolants à base de billes de polystyrène expansé (EPS) ou de vermiculite...

#### Mise en oeuvre :

La mousse de polyuréthane est projetée par couches successives, jusqu'à l'épaisseur souhaitée et sèche en quelques minutes. La mise en oeuvre des mélanges chaux-chanvre est plus délicate et plus longue et demande des temps de séchage beaucoup plus importants. Selon leur dosage en liant (à base de chaux aérienne), les mélanges chaux-chanvre peuvent être soit projetés directement sur le support (manuellement ou mécaniquement), soit coffrés contre le support le temps de la mise en oeuvre. La finition est généralement réalisée à l'aide d'un enduit à la chaux dont il faut assurer la parfaite continuité.



1. Mur existant en briques
2. Isolation projetée
3. Finition intérieure

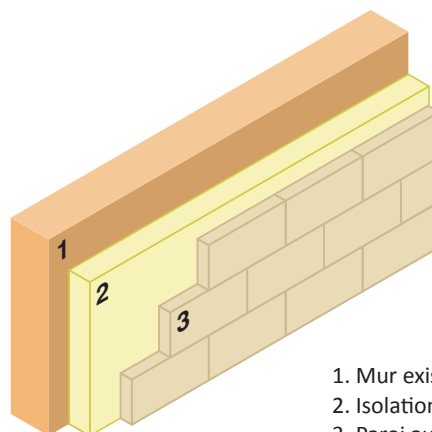


Projection d'un mélange chaux-chanvre entre des structures en bois.

### ► Système avec contre-cloison maçonnée

Ce système permet de rajouter un matériau lourd devant l'isolant et donc de récupérer au moins une partie de l'inertie thermique perdue. Cette solution est toutefois rarement envisageable étant donné la perte d'espace qu'elle engendre. Le poids de la contre-cloison peut également poser un problème.

Une paroi autostable est réalisée à l'intérieur, parallèlement et à une certaine distance du mur. Les matériaux les plus utilisés sont les briques de terre cuite (ou de terre crue), les carreaux de plâtre, les blocs de béton... L'isolant est incorporé entre la contre-cloison et le mur. Il peut être en vrac, ou en panneaux.



1. Mur existant en briques
2. Isolation souple ou en vrac
3. Paroi auto-stable



### Matériaux :

Au niveau des panneaux isolants, il peut s'agir de polystyrène expansé (EPS), de laine minérale semi-rigide (MW) ou de polyuréthane expansé (PUR). Les panneaux présentent l'inconvénient de moins facilement remplir tout l'espace entre le mur et la contre-cloison. Les isolants en vrac sont à priori plus intéressants pour cette technique : perlite, vermiculite, liège... Etant donnée l'absence de véritable régulateur de vapeur du côté intérieur, il faut éviter les isolants putrescibles, si le mur existant est humide ou s'il risque de le devenir.



Rouleaux de laine minérale placés entre le mur existant et la nouvelle paroi intérieure constituée de blocs de plâtre.

### Mise en oeuvre :

L'isolant est placé au fur et à mesure que la cloison monte. La mise en oeuvre doit être soignée afin de remplir complètement d'isolant l'espace entre le mur et la contre-cloison et d'éviter tout tassement. Lorsqu'on utilise un isolant en vrac pour la première partie du mur, des panneaux isolants peuvent être utilisés avant la pose des derniers rangs de briques pour faciliter la réalisation du mur en partie haute du mur.

## **3.2.4 CHOIX DES MATÉRIAUX ISOLANTS ET DES FINITIONS**

Le choix des matériaux d'isolation et des finitions, ne se limite pas au choix d'un mode constructif. Les critères de choix se basent tant sur leurs performances propres ou combinées, que sur leur impact sur l'environnement ou sur la santé des occupants, leur facilité de mise en œuvre et d'entretien, leur durée de vie et le temps qui sépare leur entretien, leur possibilité d'être recyclés, ou simplement leur prix.

Au niveau du transfert thermique, on choisira des matériaux ayant une conductivité thermique  $\lambda$  la plus faible possible, en tout cas pour la couche d'isolation afin d'atteindre un coefficient de transfert thermique  $U$  le plus bas possible. Certains matériaux permettent de conserver une certaine inertie thermique. Ceux-ci doivent alors être « accessible » aux échanges thermiques avec l'ambiance intérieure, et une stratégie adaptée doit être mise en place pour qu'ils restent « actifs ». Ainsi, on essaiera que les couches superficielles des parois intérieures aient une faible diffusivité et une forte effusivité. Les finitions ont dès lors souvent un impact significatif sur le sentiment de confort.

Le transfert de vapeur est abordé plus en détail dans le paragraphe suivant et dans le chapitre 3.4, mais notons déjà qu'il apparaît que les matériaux totalement étanche à la vapeur ne sont pas toujours une solution idéale, ni pour les membranes placées du côté intérieur, ni pour les revêtements extérieurs. Ces derniers permettent d'atténuer l'effet des pluies battantes en limitant la quantité d'eau absorbée par le mur, mais doivent permettre le transfert de vapeur pour garantir le séchage du mur. Trois caractéristiques principales sont donc à considérer : l'absorption d'eau liquide par capillarité, sa redistribution au sein du réseau poreux du matériau et la résistance à la diffusion de vapeur. Les autres caractéristiques ont un effet secondaire toutefois non négligeable (capacité de rétention d'eau, effet de l'humidité sur la conductivité thermique...). Ainsi, recouvrir la brique d'une peinture non perméable à la vapeur d'eau n'est généralement pas souhaitable.

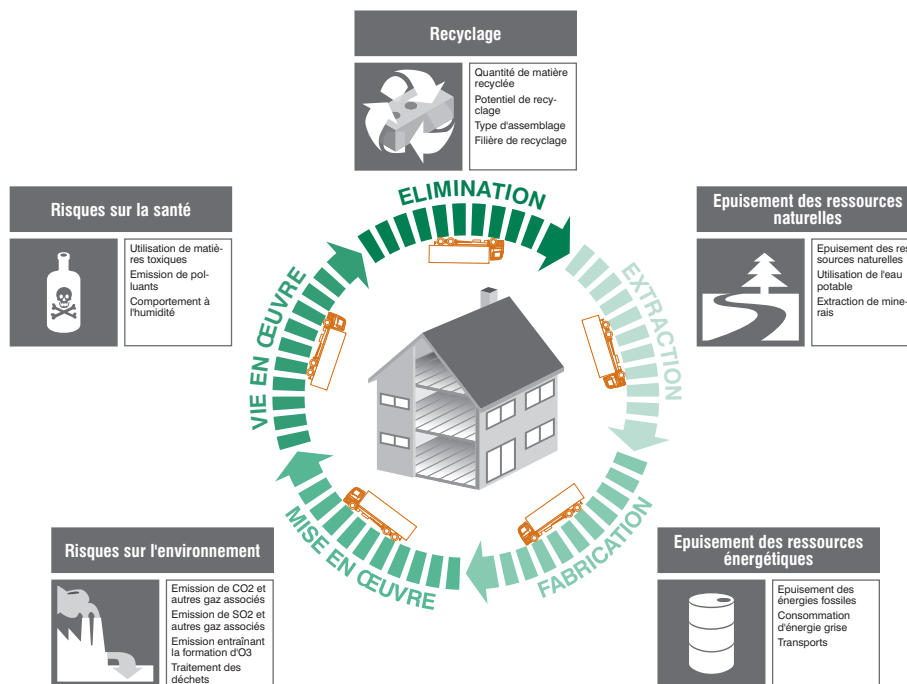
Les tableaux qui suivent présentent une série de matériaux pour lesquelles sont reprises les valeurs des principaux paramètres hygrothermiques. Les paramètres hygrothermiques sont donnés pour le matériau en soi (cases plus claires) et pour l'élément constructif qu'il compose, en considérant  $1\text{m}^2$  d'une couche

de matériau d'une certaine épaisseur (cases plus foncées). Il est essentiel de tenir compte de l'ensemble des composants de la paroi pour choisir chaque matériau. Le mur existant (caractéristiques de la brique et de la finition extérieure) influencera déjà le choix des autres composants.

Les valeurs des différents paramètres hygrothermiques repris ont été définies suite à une analyse des propriétés de différents produits existants, des certificats des matériaux d'isolation existants (ACERMI<sup>10</sup>), de la littérature et des normes belges établissant les valeurs de calcul pour la conductivité thermique et les propriétés hygrothermiques des matériaux de construction (NBN 62-002 et NBN EN 12524).

L'impact environnemental de chaque matériau est également indiqué. Tous les matériaux induisent des nuisances au niveau de l'environnement et de la santé des êtres vivants tout au long de leur cycle de vie : de l'extraction des matières premières à la fabrication et la mise en oeuvre jusqu'à l'élimination en passant par l'utilisation et les remplacements nécessaires. Dans une démarche durable globale, il est impératif d'intégrer ces préoccupations.

Seuls les deux indicateurs facilement quantifiables les plus utilisés sont repris: l'énergie grise (pour le bois, celle-ci correspond au cycle complet du bois) et les émissions de gaz à effet de serre. Les valeurs reprises ici proviennent de la base de données autrichienne Ecosoft créée par IBO<sup>11</sup>. Celle-ci ne dispose de valeurs que pour la phase de fabrication des matériaux. Des données plus complètes sur l'écobilan des matériaux peuvent être trouvées, notamment dans les outils d'aide à la conception de maisons individuelles à basse et très basse consommation d'énergie publiés par le Département Énergie et Bâtiment durable du Service Public de Wallonie<sup>12</sup>.



Principaux impacts des matériaux de construction pendant leur cycle de vie.

10. Association pour la certification des matériaux isolants (ACERMI) : <http://acermi.cstb.fr>.

11. Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie - Institut autrichien pour la science et l'écologie de la construction. La base de données est accessible gratuitement sur le site : <http://www.ibo.at/de/oekokennzahlen.htm>.

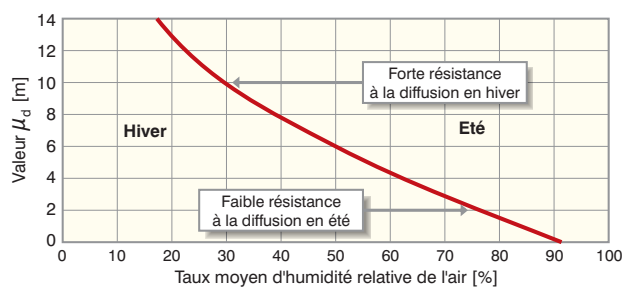
12. Impacts des matériaux de construction - Comparatif de parois, Sophie Trachte, Architecture et Climat

### 3.2.5 RÉGULATION DE LA VAPEUR

Comme on l'a vu dans la deuxième partie du guide, essayer d'éviter le risque principal de condensations internes par diffusion en choisissant une membrane totalement étanche à la vapeur peut engendrer un risque secondaire à cause de la difficulté qu'a le mur pour sécher du côté intérieur. Ce risque principal est lié à l'apparition de condensations internes par diffusion en hiver, ou quand la pression de vapeur est plus importante à l'intérieur qu'à l'extérieur et que la vapeur a donc tendance à traverser la paroi de l'intérieur vers l'extérieur. Les modèles statiques (comme celui de Glaser présenté au chapitre 3.4) entraînent presque systématiquement le choix d'une membrane très étanche à la vapeur du côté intérieur. On les appelle souvent les « pare-vapeurs ». Lorsque l'on affine l'analyse, il apparaît que le choix d'une membrane plus faiblement étanche à la vapeur est parfois suffisant. On parle alors de « freine-vapeur ». La valeur  $S_d$  des pare-vapeur n'est pas définie avec précision, mais en pratique, elle sera de plusieurs dizaines de mètres (pex 50 ou même 100 m) alors que la valeur  $S_d$  des freine-vapeur ne sera que de quelques mètres seulement (pex 2m à 5 m, mais rarement plus de 10 m).

Le choix d'un freine-vapeur, plus ouvert au passage de la vapeur, permet souvent de se prémunir du risque, dit secondaire, de condensations internes en été ou au printemps, ou quand la pression de vapeur est plus importante à l'extérieur qu'à l'intérieur et que la vapeur a donc tendance à traverser la paroi de l'extérieur vers l'intérieur. En effet, le flux de vapeur n'est pas complètement bloqué vers l'intérieur ce qui facilite le séchage du mur.

D'autres membranes, dites intelligentes, sont de ce point de vue encore plus adaptées. En effet, leur perméabilité à la vapeur évolue avec l'humidité relative. Elles sont conçues pour être relativement fermées à la vapeur quand l'humidité relative est faible et pour s'ouvrir au passage de la vapeur quand l'humidité relative est plus élevée. Ce principe est illustré sur l'illustration ci-contre. Dès lors, elles freinent le passage de la vapeur quand l'air intérieur est plus sec (généralement en hiver), et permettent le séchage du mur, lorsque l'humidité relative intérieure est plus élevée (généralement en été ou au printemps).



Principe de fonctionnement d'une membrane intelligente.  
Source : Proclima.

Plusieurs types de membranes intelligentes existent avec une valeur  $S_d$  moyenne allant de quelques mètres à une dizaine de mètres. Remarquons que ces changements de  $S_d$  ne sont pas instantanés et que le choix de la membrane doit d'abord se faire sur base de l'ambiance globale du local pour éviter le risque principal de condensations internes par diffusion. On pense ici au cas des salles d'eau qui sont le lieu des charges d'humidité élevées, mais ponctuelles dans temps.

Outre les risques de condensations, il est important de faire remarquer que certains matériaux dits hygroscopiques, comme le bois et les matériaux dérivés du bois, mais aussi d'autres matériaux comme la terre crue, ont le pouvoir de réguler l'humidité de l'ambiance intérieure en captant l'humidité en excès pour la restituer plus tard, atténuant ainsi les effets désagréables d'ambiances trop sèches ou trop humides. On parle alors parfois d'inertie hydrique par analogie avec l'inertie thermique. Malheureusement, peu de valeurs sont disponibles. Ce domaine devrait faire l'objet de recherches complémentaires et dépasse le cadre de ce guide. Remarquons seulement que la présence d'une membrane atténue fortement l'effet hygroscopique des couches sous-jacentes, et notamment celui de l'isolant.

Pour conclure ce paragraphe, remarquons enfin que la présence d'une membrane, en plus de permettre la régulation de la vapeur, permet aussi de bloquer le passage de l'air et donc d'éviter le risque de condensation par convection, pour autant bien sûr que la mise en oeuvre soit d'une qualité irréprochable (notamment au niveau des noeuds constructifs) comme rappelé au chapitre 3.5.

## ► Isolants

Densité		Épaisseur		Masse par m <sup>2</sup>		Isolation		Inertie				Humidité			Isolation		Inertie		Humidité								
ρ	kg/m <sup>3</sup>	d	m	d	m	λ	W/mK	C	J/kgK	ρC	kJ/m <sup>3</sup> K	Diffusivité	m <sup>2</sup> /s	Effusivité	J/m <sup>2</sup> Ks <sup>1/2</sup>	μ sec	/	μ hum.	A	U	W/m <sup>2</sup> K	dpC	kJ/m <sup>2</sup> K	μd sec	m	μd hum.	m

### ISOLANTS A BASE MINERALE

Panneau de laine de roche	100	0,12	12	0,035	1030	103,00	0,34	60,04	2	1	[0]	0,292	12,36	0,24	0,12
Panneau de laine de verre	50	0,12	6	0,035	1030	51,50	0,68	42,46	2	1	[0]	0,292	6,18	0,24	0,12
Panneau de verre cellulaire	110	0,14	15,4	0,040	1000	110,00	0,36	66,33	[∞]	[∞]	0,286	15,40	[∞]		
Panneau de silicate de calcium	270	0,25	67,5	0,070	1000	270,00	0,26	137,48	3	1	1,2	0,280	67,50	0,75	0,25

### ISOLANTS A BASE SYNTHETIQUE

Panneau de polystyrène expansé (EPS)	25	0,12	3	0,035	1450	36,25	0,97	35,62	100	40	[0]	0,292	4,35	12,00	4,80
Panneau de polystyrène extrudé (XPS)	38	0,11	4,18	0,032	1450	55,10	0,58	41,99	200	80	[0]	0,291	6,06	22,00	8,80
Panneau de polyuréthane	30	0,08	2,4	0,023	1400	42,00	0,55	31,08	100	30	[0]	0,288	3,36	8,00	2,40

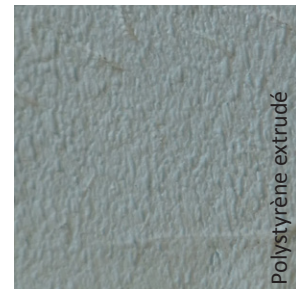
### ISOLANTS A BASE DE FIBRES NATURELLES

Cellulose en vrac	40	0,14	5,6	0,041	2150	86,00	0,48	59,38	2	1	0,3	0,293	12,04	0,28	0,14
Mateias souple de cellulose	50	0,14	7	0,040	2150	107,50	0,37	65,57	2	1	0,3	0,286	15,05	0,28	0,14
Mateias souple de fibres de bois	75	0,13	9,75	0,038	2100	157,50	0,24	77,36	5	3		0,292	20,48	0,65	0,39
Panneau rigide de fibres de bois	160	0,14	22,4	0,040	2100	336,00	0,12	115,93	5	3	0,007	0,286	47,04	0,70	0,42
Panneau de liège	120	0,14	16,8	0,040	1600	192,00	0,21	87,64	30	5	[0]	0,286	26,88	4,20	0,70
Panneau semi-rigide de fibres de chanvre	30	0,14	4,2	0,040	1600	48,00	0,83	43,82	2	1		0,286	6,72	0,28	0,14
Mélange chaux-chanvre	440	0,38	167,2	0,110	1560	686,40	0,16	274,78	5	3	0,07	0,289	260,83	1,90	1,14

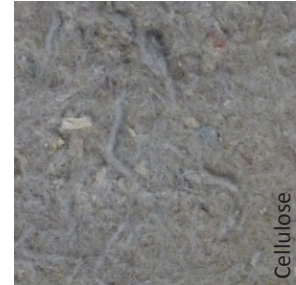
**REMARQUES :** Les isolants sont comparés à résistance thermique (R) équivalente. Les épaisseurs indiquées ont été calculées pour atteindre une résistance thermique supérieure ou égale à 3,5 m<sup>2</sup>K/W (idem sur les graphiques illustrant l'énergie grise et l'effet de serre). Attention, toutes les valeurs présentées dans ces tableaux sont données à titre indicatif. Vérifier si le produit possède un marquage CE ou un agrément technique et référez-vous à la législation en vigueur.



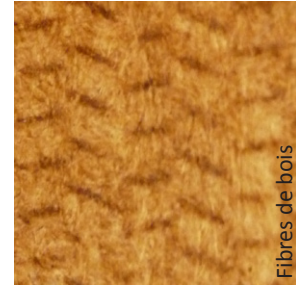
Laine de verre



Polystyrène extrudé



Cellulose



Fibres de bois



Liège



Chaux-chanvre

## ► Finitions intérieures

Densité		Epaisseur		Masse par m <sup>2</sup>		Isolation			Inertie			Humidité			Isolation		Inertie		Humidité				
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	d	m	C	J/kgK	$\lambda$	W/mK	$\rho C$	kJ/m <sup>3</sup> K	Diffusivité	m <sup>2</sup> /s	Effusivité	J/m <sup>2</sup> Ks <sup>1/2</sup>	$\mu$ sec	/	$\mu$ hum.	A	U	dpC	$\mu$ d sec	m	$\mu$ d hum.	m

### ENDUITS INTERIEURS

Enduit au plâtre	1300	0,015	19,5	1000	1300	0,40	822,19	10	6	0,287	34,67	19,50	0,15	0,09
Enduit à l'argile	1800	0,015	27	1000	1800	0,41	1146,30	10	5	48,67	27,00	0,15	0,08	
Enduit à la chaux	1400	0,015	21	1000	1400	0,57	1058,30	10	6	53,33	21,00	0,15	0,09	

### PLAQUES DE FINITION INTERIEURE

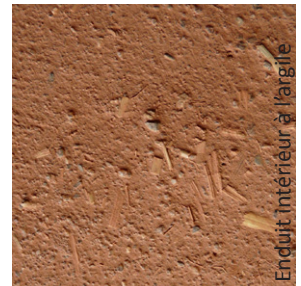
Plaque de carton plâtre	900	0,0125	11,25	1000	900	0,28	474,34	10	4	0,287	20,00	11,25	0,13	0,05
Plaque de fibro-plâtre	1200	0,0125	15	1100	1320	0,24	649,92	19	5	25,60	16,50	0,24	0,06	
Panneau OSB	500	0,015	7,5	1700	850	0,15	332,42	50	30	0,002	8,67	12,75	0,75	0,45
Panneau de particules dur	800	0,018	14,4	2100	1680	0,06	409,88	60	20	5,56	30,24	1,08	0,36	
Lambris bois massif résineux	600	0,022	13,2	1600	960	0,16	379,47	100	30	0,0004	6,82	21,12	2,20	0,66

## ► Finitions extérieures

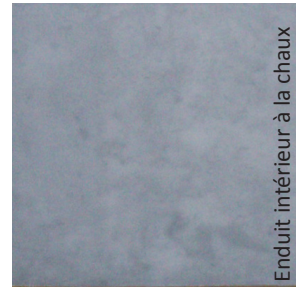
Densité		Epaisseur		Masse par m <sup>2</sup>		Isolation			Inertie			Humidité			Isolation		Inertie		Humidité				
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	d	m	C	J/kgK	$\lambda$	W/mK	$\rho C$	kJ/m <sup>3</sup> K	Diffusivité	m <sup>2</sup> /s	Effusivité	J/m <sup>2</sup> Ks <sup>1/2</sup>	$\mu$ sec	/	$\mu$ hum.	A	U	dpC	$\mu$ d sec	m	$\mu$ d hum.	m

### ENDUITS DE FAÇADE

Enduit au mortier de ciment	1500	0,01	15	1000	1500	1,00	1500,00	10	6	0,008	150	15,00	0,10	0,06
Enduit au mortier bâtard (chaux/ciment)	1500	0,01	15	1000	1500	0,93	1449,14	10	6	140	15,00	0,10	0,06	
Enduit synthétique (silicones et silicates)	1200	0,002	2,4					170					0,34	
Enduit à la chaux	1600	0,01	16	1000	1600	0,78	1408,55	10	6	0,05	124	16,00	0,10	0,06



Enduit intérieur à l'argile



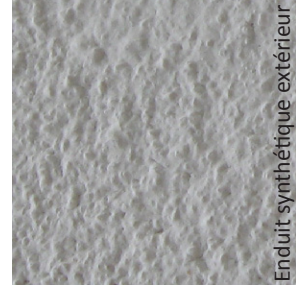
Enduit intérieur à la chaux



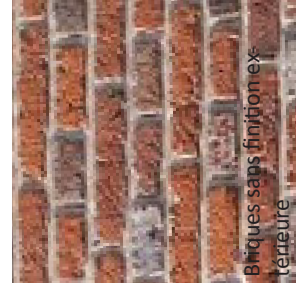
Panneau OSB



Lambris en bois



Enduit synthétique extérieur

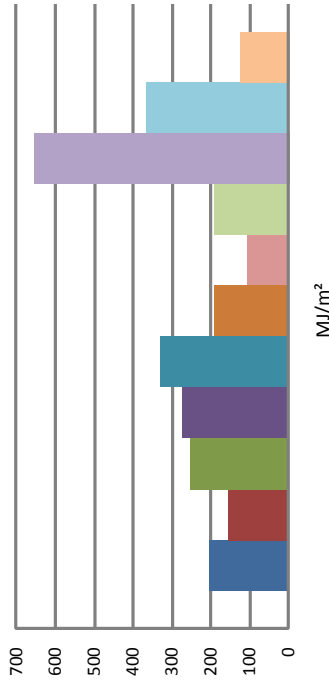


Briques sans finition extérieure

## ▶ Isolants

- Panneau de laine de roche
- Panneau de laine de verre
- Panneau de verre cellulaire
- Panneau de polystyrène expansé (EPS)
- Panneau de polystyrène extrudé (XPS)
- Panneau de polyuréthane
- Matelas souple de cellulose
- Matelas souple de fibres de bois
- Panneau rigide de fibres de bois
- Panneau de liège
- Panneau semi-rigide de fibres de chanvre

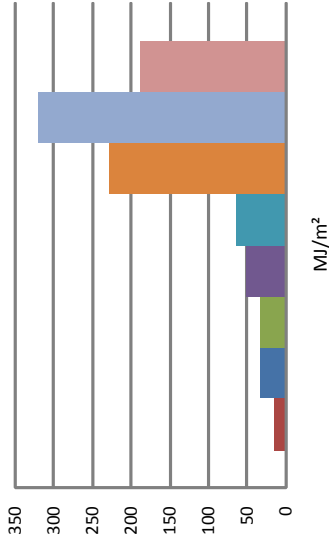
### Energie grise /m<sup>2</sup> d'isolant



## ▶ Finitions intérieures

- Enduit à l'argile
- Enduit au plâtre
- Enduit à la chaux
- Plaque de carton plâtre
- Plaque de fibro-plâtre
- Panneau OSB

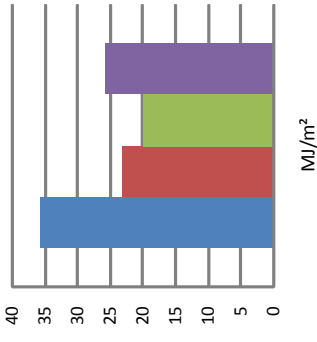
### Energie grise /m<sup>2</sup> de finition



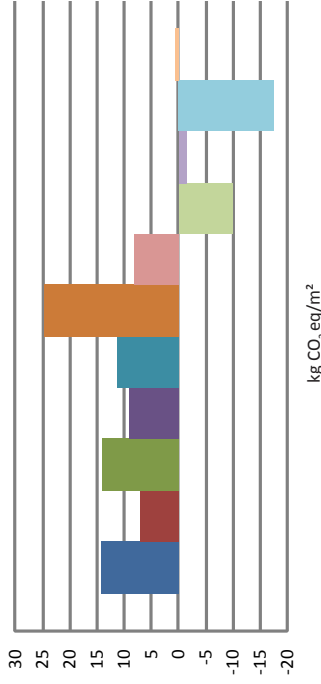
## ▶ Finitions extérieures

- Enduit au mortier de ciment
- Enduit au mortier bâtard (chaux/ciment)
- Enduit synthétique (silicones et silicates)
- Enduit à la chaux

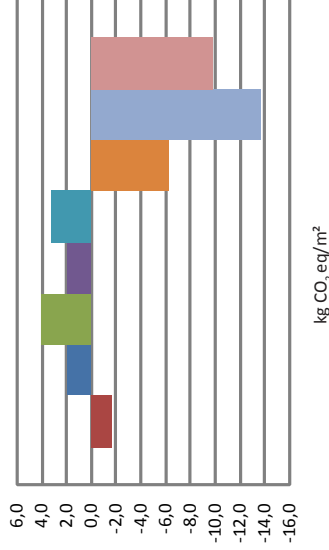
### Energie grise /m<sup>2</sup> d'enduit



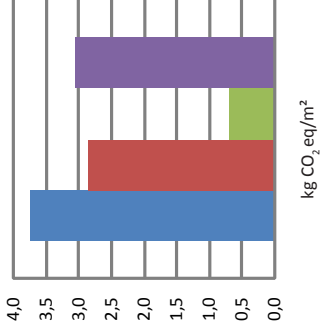
### Effet de serre /m<sup>2</sup> d'isolant



### Effet de serre /m<sup>2</sup> de finition



### Effet de serre /m<sup>2</sup> d'enduit



## 3.3. PONTS THERMIQUES

Comme on l'a vu, la continuité de l'isolation de l'enveloppe est très importante et les ponts thermiques peuvent avoir des conséquences désastreuses tant au niveau des déperditions thermiques qu'au niveau des désordres liés aux problèmes de condensation. Ce chapitre examine les exemples de ponts thermiques les plus courants quand on isole par l'intérieur des murs en briques.

### 3.3.1 GÉNÉRALITÉS

#### ► Résoudre les ponts thermiques

Dans le cas d'une isolation par l'intérieur, il faudra soigner la conception des détails pour assurer la continuité de l'isolation. Ces détails qui permettent d'éviter les ponts thermiques sont parfois complexes et engendrent des coûts supplémentaires.

Si des ponts thermiques existent et ne peuvent être résolus, il est nécessaire de prendre leur impact en considération en évaluant :

- les déperditions thermiques supplémentaires et l'influence sur les besoins de chauffage du bâtiment,
- les risques de condensation et de moisissures résultant de la température de surface intérieure plus faible au niveau du pont thermique.

Quelques outils utiles pour réaliser ces évaluations seront présentés au chapitre suivant.

#### ► Limiter le risque de condensation et de moisissures

Si certains ponts thermiques ne sont pas résolus, des condensations risquent d'y apparaître vu que la température de surface y est plus basse. Pour réduire ce phénomène, on peut :

1. Isoler suffisamment toute l'enveloppe de manière à ce que la température de la face intérieure de celle-ci ne descende pas en dessous de 17,5 °C.
2. Ventiler afin de diminuer l'humidité relative de l'air intérieur.
3. Chauffer la face intérieure des parois froides.

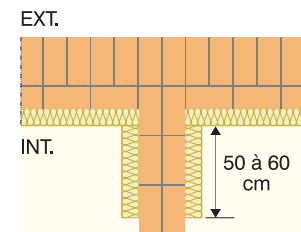
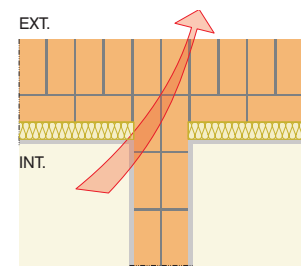
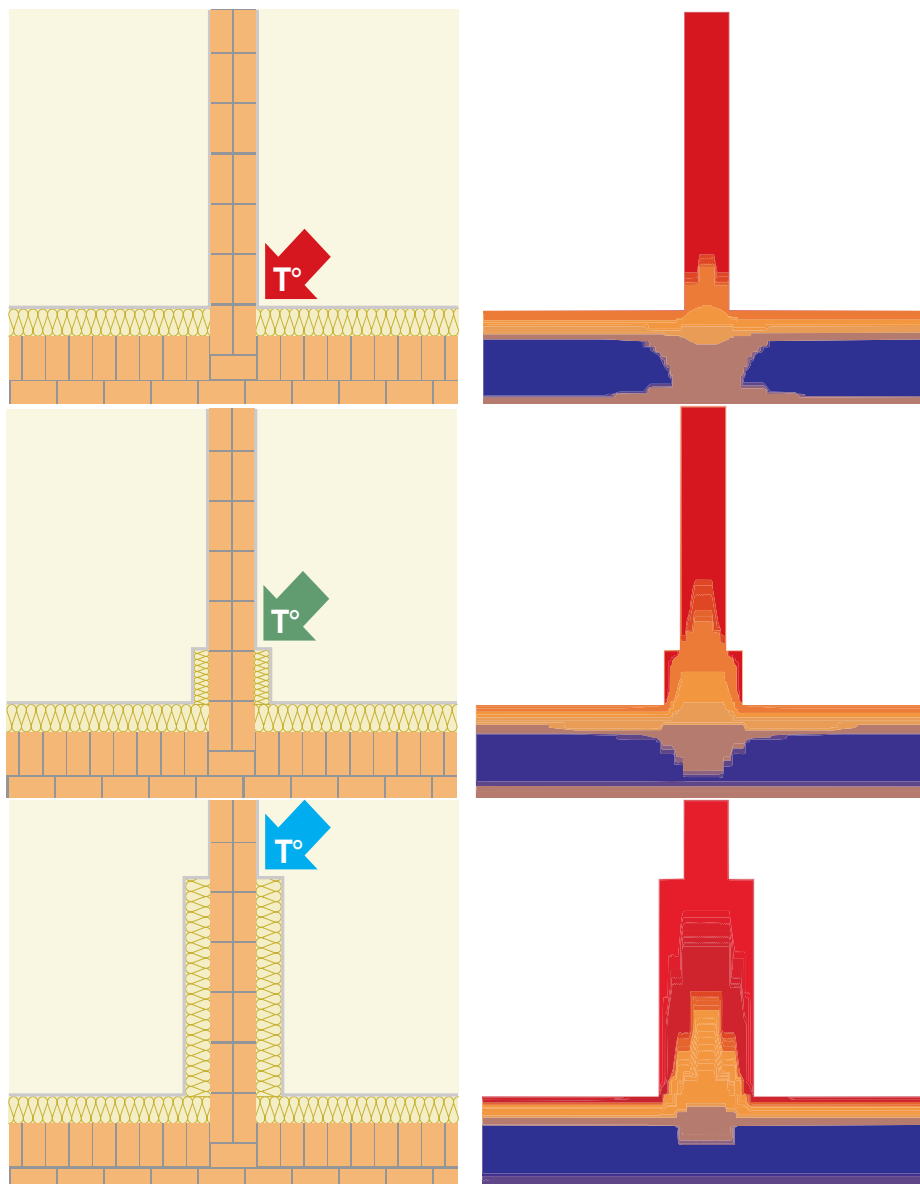
### 3.3.2 PISTES DE SOLUTIONS

#### ► Le mur de refend

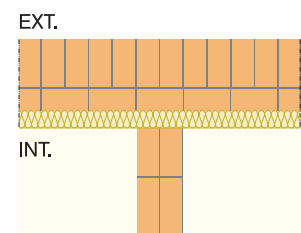
La jonction entre les murs de refend et les façades isolées par l'intérieur constitue un pont thermique qu'il est possible d'atténuer. Différentes solutions peuvent être envisagées. La solution la plus facile à mettre en oeuvre consiste à créer un retour d'isolant sur le mur de refend (avec, par exemple, une épaisseur plus faible que le mur). Toutefois, ce retour diminue encore la surface habitable et n'est pas toujours facile à intégrer.

Une autre solution consiste à entailler ou à recouper la jonction du mur de refend et du mur extérieur. Cette solution permet de limiter fortement le pont thermique. Cependant, elle ne sera que rarement envisageable, car elle cause des problèmes de stabilité au niveau du bâtiment.

La solution du retour d'isolant a été simulée à l'aide du programme WUFI® 2D. Trois options ont été étudiées : 1. pas de retour d'isolant ; 2. un retour d'isolant de 25 cm (épaisseur 5cm) ; 3. un retour d'isolant de 1 m (épaisseur 10cm).



**Solution 1**



**Solution 2**

- Les hypothèses utilisées correspondant à celles utilisées dans l'outil ISOLIN :
- Climat extérieur : climat extérieur de référence (TRY) calculé selon données de l'IRM à Uccle
  - Climat intérieur : température fixée à 20° et humidité relative normale (classe 2)
  - Brique de type B
  - Isolation avec 12,5cm de cellulose
  - Freine-vapeur à  $\mu$ d variable (type INT)

Températures dans les parois le 27 février à 17h.

#### Température [°C]

■	-10.0 < X < -5.9
■	-5.9 ≤ X < -1.8
■	-1.8 ≤ X < 2.3
■	2.3 ≤ X < 6.4
■	6.4 ≤ X < 10.5
■	10.5 ≤ X < 14.6
■	14.6 ≤ X < 18.7
■	18.7 ≤ X < 22.8
■	22.8 ≤ X < 26.9
■	26.9 ≤ X < 31.0



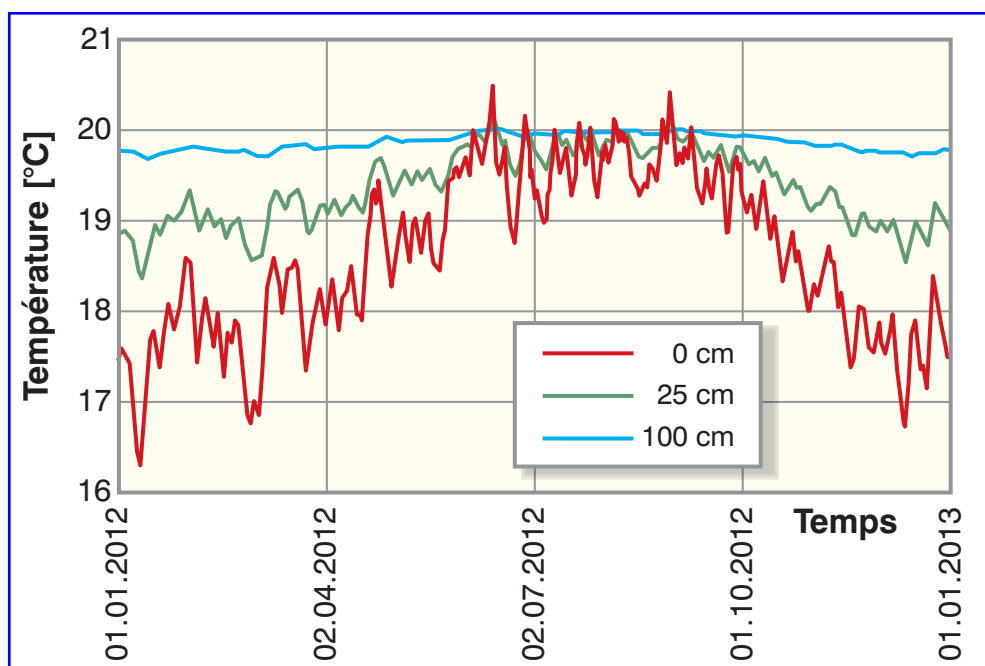
Les figures de la page précédente montrent les différences de température que provoquent le pont thermique. Un retour de 1 m permet de limiter de façon très efficace l'effet du pont thermique. Cependant, il peut gêner l'aménagement intérieur ou être peu esthétique. Un retour de 25 cm sera plus facile à adapter à l'architecture intérieure. L'espace créé pourra intégrer des rideaux ou stores, des radiateurs, des tablettes... On constate qu'avec un retour de 25 cm, l'impact du pont thermique est déjà limité.



Retour d'isolant sur le mur de refend.

L'endroit le plus critique sera situé au niveau de la première zone non isolée du mur de refend (voir flèches). Celle-ci étant la plus proche de l'extérieur, sa température de surface sera la plus influencée par les variations de la température extérieure. Si la température de surface passe en dessous de la température de rosée, la vapeur d'eau contenue dans l'air intérieur va se condenser dans cette zone.

Le graphique ci-dessous montre la température de surface de cette zone dans chacun des trois cas simulés tout au cours de l'année. On constate clairement que le cas sans retour d'isolation entraîne une température de surface intérieure plus fortement dépendante de la température extérieure.



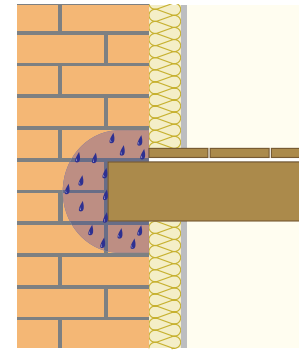
Ici, la température de l'ambiance intérieure a été fixée à 20 °C. Cependant, si dans certaines pièces ou à certains moments de l'année, la température intérieure était plus basse, la température de surface de cette zone critique risquerait de descendre régulièrement jusqu'à, voire sous, la température de rosée.

De même, dans une pièce avec une ambiance plus humide (une salle de bain par exemple), la température de rosée est plus élevée et risque donc d'être plus souvent atteinte (cf. diagramme de Molier).

## ► Le plancher en bois

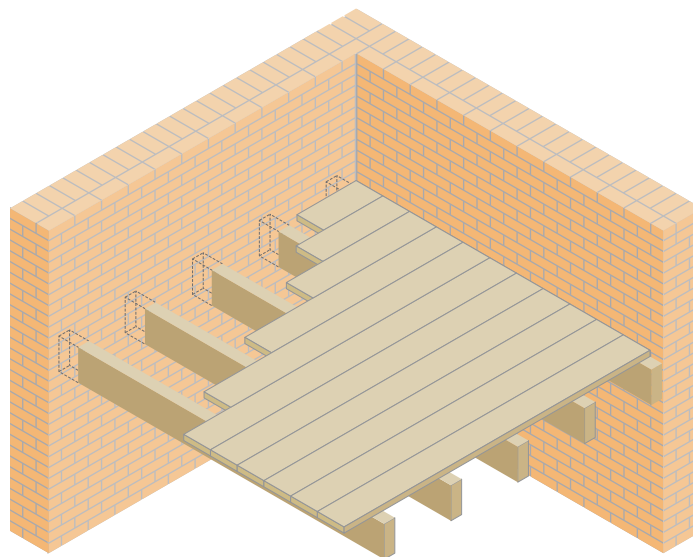
De nombreuses maisons comportent des planchers en bois portant de façade à façade. L'isolant peut être prolongé entre les gîtes d'un niveau à l'autre, ce qui permet de limiter le pont thermique, en comparaison, par exemple, au cas d'une dalle en béton. Au niveau de l'encastrement, il sera difficile d'assurer l'étanchéité à la vapeur et à l'air ce qui renforcera les risques de condensations. Les gîtes du plancher risquent alors de pourrir au droit de leur point d'appui, ce qui peut entraîner des problèmes de stabilité.

Ce phénomène dépend de nombreux paramètres (caractéristiques des briques, climat extérieur, climat intérieur...) et l'idéal serait de pouvoir effectuer une simulation dynamique complète. Malheureusement, aucun logiciel ne permet actuellement de simuler les transferts et stockages d'humidité au niveau des jonctions en « trois dimensions ».



Risques de condensation au droit de l'appui des gîtes dans le mur.

L'outil ISOLIN présenté dans la quatrième partie de ce guide permet d'analyser l'évolution de la teneur en eau dans la brique du côté intérieur. Une méthode d'évaluation rapide consiste à analyser une paroi qui correspond au mur dans lequel les gîtes sont encastrées et de vérifier que la teneur en eau des briques à cet endroit n'entraîne pas une teneur en eau dans le bois supérieur à 20 % en masse (limite au-delà de laquelle le bois risquerait de pourrir). Cette limite correspond à une teneur en eau de 91 kg/m pour un épicéa moyen (455 kg/m sec) qu'il atteint quand il est à l'équilibre dans une ambiance à 85,5 % d'humidité relative. En admettant que l'équilibre hydrique entre le bois et la brique soit instantané (hypothèse sécuritaire), il faut vérifier que la teneur en eau dans la brique ne dépasse pas 17 kg/m pour ce cas de brique.



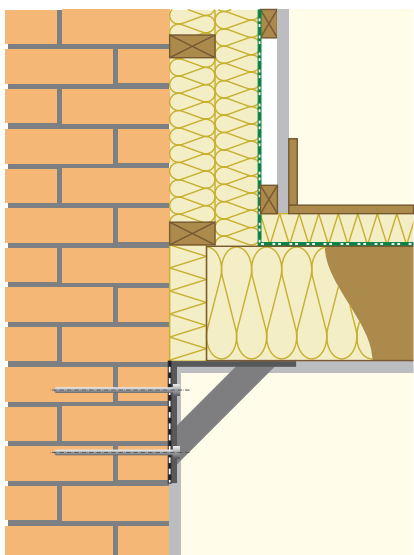
Vue d'ensemble des encastrement d'un plancher en bois dans un mur en brique avant la réalisation d'un système d'isolation par l'intérieur

Il faut donc toujours être vigilant du traitement des encastrement des planchers en bois dans les murs de façade isolés par l'intérieur. La solution la plus efficace consiste à couper les gîtes avant leur appui dans le mur et de les faire reposer sur une nouvelle poutre filière fixée au mur.

Les détails de la page suivante sont basés sur une étude réalisée par le CERAA<sup>13</sup> et sur un travail de maîtrise réalisé dans le cadre du Master of Advanced Studies en Architecture et Développement Durable<sup>14</sup>.

13. Application des principes de la maison passive en région de Bruxelles-Capitale, CERRA, 2008

14. La rénovation de la maison bruxelloise - Cas des maisons divisées en plusieurs logements, Florence Léonard, 2009

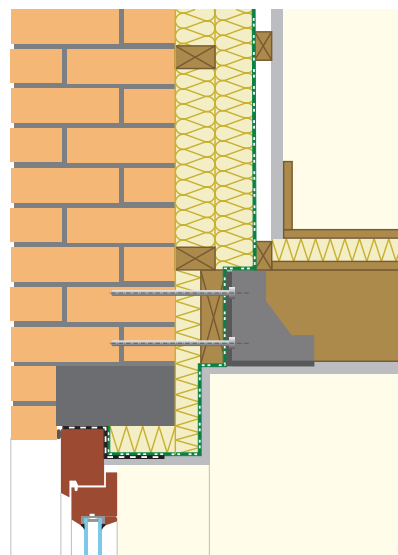


L'exemple ci-dessus illustre une solution possible entre un niveau chauffé (au-dessus) et un niveau non chauffé (en dessous).

La gîte coupée repose sur une poutre filante en « L » en acier fixée au mur à l'aide de tiges filetées ancrées chimiquement dans la maçonnerie. Un film d'étanchéité (noir et blanc) est placé entre le profilé métallique et le mur.

Un isolant rigide est placé entre la gîte sectionnée et le mur et un isolant souple est posé ou insufflé entre les gîtes. Le plancher existant est éliminé. Un freine-vapeur (vert et blanc) est placé au-dessus du gîtage et un isolant rigide résistant à la compression est posé dessus. Le nouveau plancher est alors réalisé.

Au niveau du mur, un espace est créé entre le freine-vapeur et la finition. Cet espace permet le passage des conduites de chauffage ou des câbles électriques et limite le risque de percer le freine-vapeur.



L'exemple ci-dessus illustre une solution possible entre deux niveaux chauffés et montre aussi le raccord au niveau d'une fenêtre.

La gîte coupée est reprise dans un sabot métallique, accolé à une poutre en bois, ancré chimiquement à l'aide de tiges filetées traversant un isolant rigide placé contre le mur en briques. L'isolant rigide se prolonge jusqu'à la fenêtre. Un freine-vapeur (en vert) et une étanchéité (en noir) sont placés au niveau de la jonction avec le châssis.

Ici, un isolant rigide résistant à la compression est posé sur le plancher existant afin d'améliorer l'isolation acoustique entre les deux niveaux. Un nouveau plancher est donc réalisé au-dessus. Si l'on souhaite garder le plancher existant, une amélioration acoustique peut également être obtenue en plaçant un isolant souple entre les gîtes.

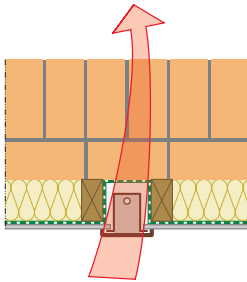
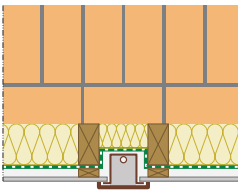
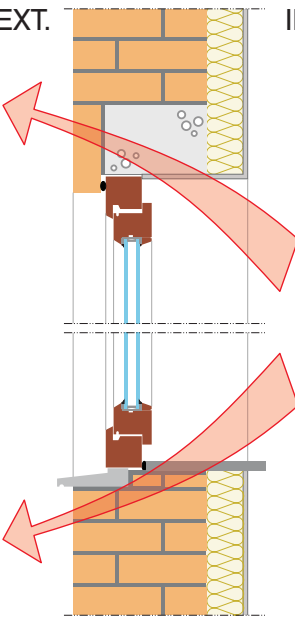
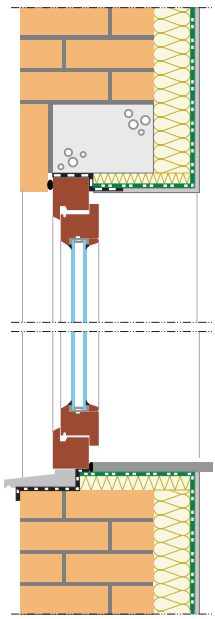
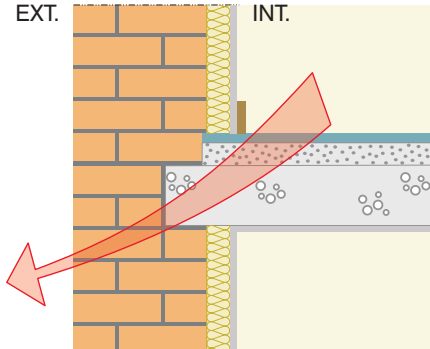
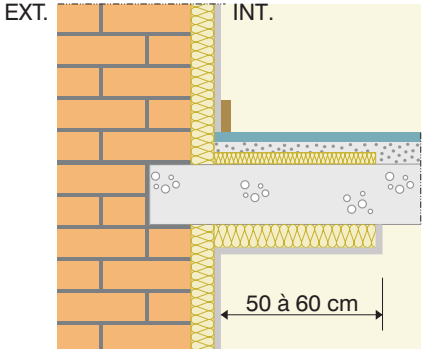


A gauche : découpe de la porte et appui sur un support temporaire.

A droite : plancher interrompu pour permettre la continuité de l'isolation.

► D'autres ponts thermiques courants

Voici quelques pistes de solutions pour d'autres ponts thermiques rencontrés fréquemment dans le cadre de l'isolation par l'intérieur.

	PROBLÈMES	PISTES DE SOLUTION
Prises électriques et canalisations		
Châssis, linteaux et tablettes de fenêtres		
Dalles d'étage en béton		

## 3.4. VALIDATION DES PERFORMANCES

Après avoir fait le choix d'un système d'isolation par l'intérieur particulier et d'une manière de résoudre autant que possible les nœuds constructifs qu'il engendre, le concepteur devra valider ses choix pour éviter les risques hygrothermiques et mécaniques liés à l'isolation par l'intérieur et présentés dans la deuxième partie de ce document. De nombreux outils et normes existent pour valider tant les parois que les nœuds constructifs, mais ils n'ont hélas pas la même précision. Certains utilisent des modèles simplifiés qui conduisent en général à faire des choix relativement sécuritaires. Leurs résultats sont parfois très éloignés de la réalité. D'autres sont plus précis, mais demandent de connaître l'ensemble des paramètres hygrothermiques des matériaux, et de disposer de fichiers climatiques correspondants au site correspondant. De plus, ceux-ci sont souvent plus complexes à manipuler, prennent beaucoup de temps pour l'encodage et l'analyse des résultats, et sont souvent chers. Ce chapitre introduit l'outil ISOLIN qui accompagne le présent guide. Cet outil sera présenté dans la quatrième partie du guide. Il permet la validation rapide d'un grand nombre de cas classiques.

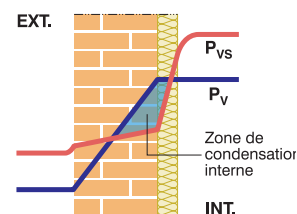
### 3.4.1 VALIDATION HYGROTHERMIQUE DES PAROIS

#### ► Coefficient de transfert thermique

Le calcul du coefficient de transfert thermique d'une paroi est décrit dans l'annexe VII de l'Arrêté du Gouvernement de la Région Wallonne du 17 avril 2008 et dans l'Annexe IX de l'Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 21 décembre 2007. La méthodologie est intégrée à l'outil PEB disponible on-line à l'adresse <http://energie.wallonie.be> > Professionnels - Outils et logiciels > Logiciel PEB.

#### ► Méthode Glaser

Jusqu'il y a peu, le risque de condensation interne s'analysait uniquement avec la méthode dite de «Glaser». Cette méthode considère que le régime hygrothermique auquel est soumise la paroi est statique (la température et l'humidité de part et d'autre restent constantes dans le temps). La paroi doit être rejetée si la courbe de pression partielle de vapeur d'eau, notée  $p_v$ , croise la courbe de pression de saturation, notée  $p_{vs}$ , comme illustré sur la figure ci-contre. Cette méthode est rapide et ne demande de connaître que la conductivité thermique  $\lambda$  [W/mK] et la résistance à la diffusion de vapeur d'eau  $\mu$  [-] des matériaux qui composent la paroi. Ces données sont largement disponibles dans la littérature.



$P_v$  : pression de vapeur  
 $P_{vs}$  : pression de vapeur de saturation

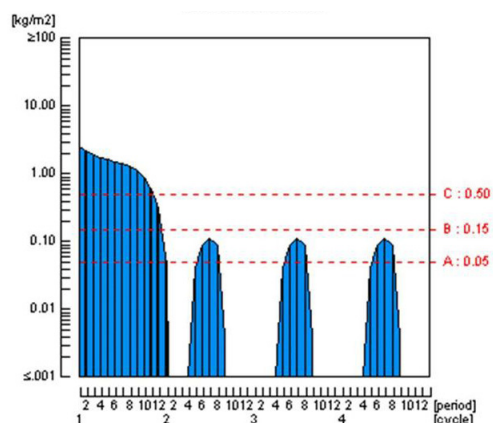
Méthode de Glaser et condensation interne en hiver.

La feuille Excel téléchargeable sur le site « <http://www.energieplus-lesite.be> > Calculs > La façade > La condensation interne d'une paroi » permet de faire cette analyse pour des parois de 1 à 5 couches.

Le grand avantage de la méthode de Glaser, qui reste très utilisée en pratique, est de donner une réponse binaire : si aucune condensation n'est prévue, il n'y a aucun de risque. Cette méthode est par contre considérée comme trop sécuritaire, car si des condensations sont annoncées, le risque est encore incertain. De nombreuses configurations de parois doivent être rejetées alors qu'elles ne présentent pas de risque en pratique. C'est notamment le cas avec de nombreuses configurations d'isolation par l'intérieur.

Les principales limites de cette méthode sont d'être exclusivement statique et de ne pas considérer les transferts (absorption et redistribution) et le stockage d'eau liquide dans les pores du matériau. En fait, elle ne prend donc pas en compte les effets de la pluie, du soleil (ou du vent), qui sont pourtant significatifs du point de vue du comportement hygrothermique et la durabilité (dans le temps) du composant.

Certaines méthodes ont été dérivées de la méthode de Glaser et permettent d'obtenir plus d'information sur les quantités de condensats et la répartition des éventuelles condensations dans le temps. Elles permettent donc de vérifier la durée du séchage initial et de distinguer les condensations éphémères, qui se résorbent rapidement, des condensations rémanentes, qui s'accumulent au cours du temps. L'illustration ci-dessous montre le type de résultats qu'on peut obtenir avec le logiciel GLASTA. Le graphique reprend la notion de teneur en eau limite selon le matériau (courbe A, B et C). L'interprétation des résultats sur base de ces limites est délicate étant donné que la méthode présente les mêmes caractéristiques que la méthode de Glaser (calcul statique, pas de transfert d'eau liquide, pas de prise en compte de la pluie, du soleil...).



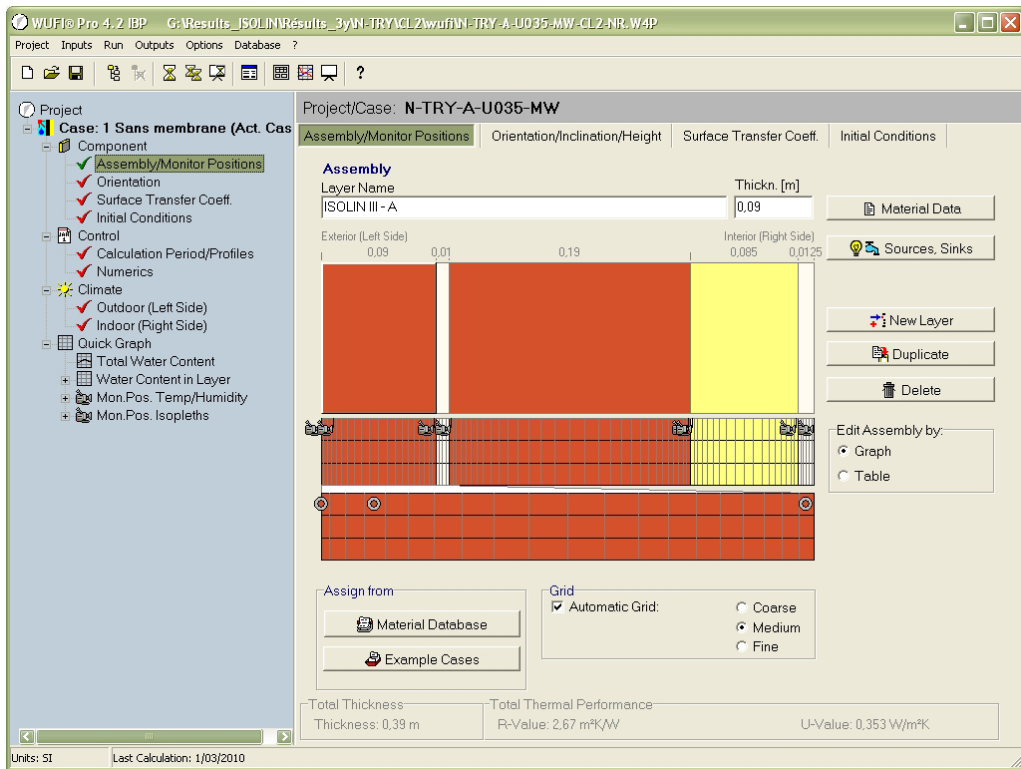
Evolution de la teneur en eau totale d'une paroi qui s'assèche puis se réhumidifie plusieurs fois sans présenter d'accumulation d'humidité.  
Source : Logiciel GLASTA (Physibel).

### ► Logiciels dynamiques couplant chaleur et humidité

Depuis plus de quinze ans, de nombreux modèles à une dimension se sont développés pour évaluer le comportement des parois multicouches soumises à un régime climatique dynamique. Ils permettent donc d'intégrer la variabilité des apports solaires, l'effet de la pluie battante, le contre rayonnement de la voûte céleste et parfois même l'effet du vent. La dynamique des flux de chaleur (transfert et stockage) y est combinée à celle des flux d'humidité, ce qui permet de considérer leurs interactions mutuelles et l'effet de celles-ci sur les performances d'ensemble des parois.

Le logiciel WUFI®Pro est sans doute le plus convivial, mais on peut aussi citer des logiciels comme Delphine, MOIST, MATCH... qui ont chacun leurs spécificités (notamment sur la modélisation du transfert et du stockage de l'humidité). Ces logiciels donnent généralement des résultats relativement équivalents qui sont bien sûr beaucoup plus proches de la réalité que les modèles statiques utilisés jusqu'alors. Néanmoins, leur utilisation est plus complexe et l'encodage peut être long. De plus, les licences d'utilisation sont souvent parfois chères.

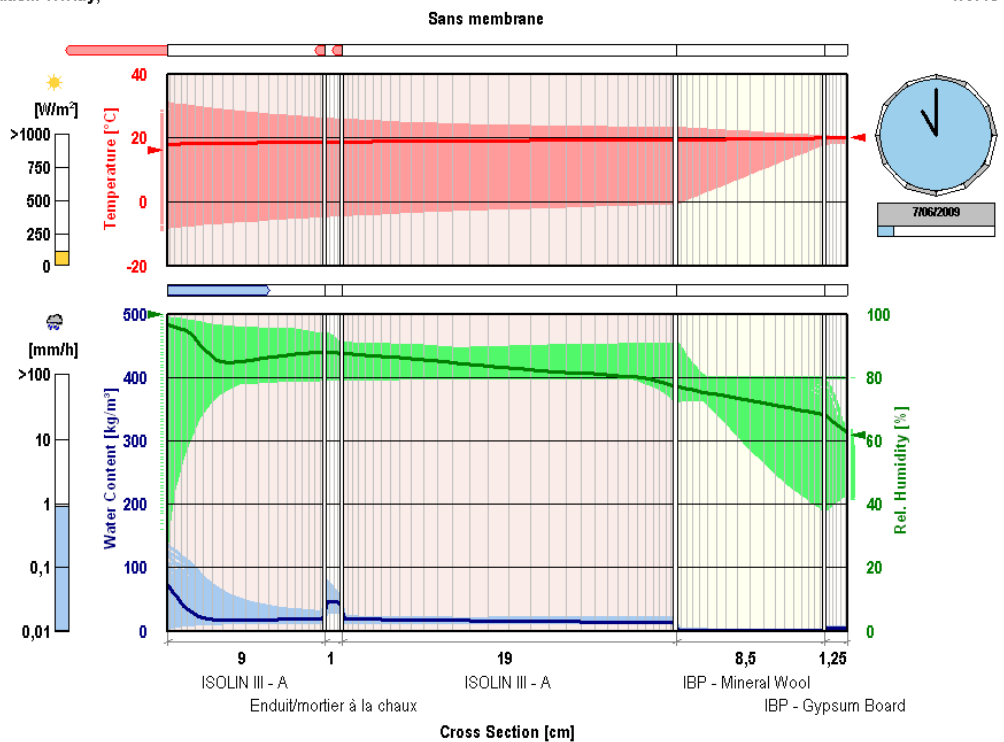
En parallèle de ces logiciels à une dimension, il peut y avoir un intérêt d'utiliser des logiciels multizones qui permettent d'étudier l'évolution des conditions intérieures selon le climat extérieur et le type d'enveloppe. Malheureusement, les logiciels de ce type qui couplent la dynamique des transferts et stockages de chaleur et d'humidité sont encore rares. Le logiciel WUFI®Plus semble à nouveau être le plus convivial. Remarquons enfin que le logiciel, WUFI®Bio, permet d'interpréter les résultats des logiciels de la gamme WUFI®, pour analyser en détail les risques en termes de croissance de moisissures d'une paroi, sur bases des caractéristiques de nombreux types de moisissures (vitesse de croissance, temps de survie...).



Logiciel WUFI®Pro – Encodage des données de la simulation.

Source : WUFI®Pro 4.2.

Location: TRY.try;



Logiciel WUFI®Pro – Visualisation des résultats sous forme de film. La courbe rouge montre la répartition de la température dans le composant à un instant donné. Les courbes verte et bleue sont corrélées, elles expriment respectivement la répartition de l'humidité relative et de la teneur en eau à travers le composant. L'interface fait aussi apparaître les flux de chaleur et d'humidité aux interfaces, ainsi que le rayonnement solaire et la quantité de pluie battante.

Source : WUFI®Pro 4.2.

## ► Normes pour éviter les risques de condensation

Deux normes importantes ont été définies, respectivement en Allemagne (DIN 4108-3:2001) et en Angleterre (BS 5250:2002), pour donner aux praticiens le moyen d'éviter les risques de condensation dans les parois qu'ils conçoivent d'une manière moins sécurisée qu'avec la méthode de Glaser. Elles se basent sur la répartition de la perméabilité à la vapeur des différentes couches qui composent la paroi. Le détail de ces normes dépasse le cadre de ce guide, mais, à titre d'exemple, présentons brièvement le garde-fou que constitue la norme anglaise.

La norme BS 5250:2002 propose de choisir un parement intérieur ayant un  $S_d$  (voir définition au chapitre 1.3.3, p.16) cinq fois supérieur à celle du parement extérieur, c'est ainsi qu'on l'appelle souvent la règle du « 5 pour 1 ». La couche intérieure doit toutefois avoir un  $S_d$  minimal de 1 m. Remarquons que dans le cas d'une isolation par l'intérieur d'un mur en brique, la valeur de  $S_d$  à utiliser du côté extérieur est celle de l'ensemble constitué par le mur et de son revêtement extérieur. Dans ce cas, le calcul conduit presque toujours à rajouter une membrane relativement fermée à la vapeur ce qui n'est pas toujours la solution idéale en pratique. Il semble dès lors favorable d'utiliser une autre méthode de validation quand on veut isoler par l'intérieur un mur maçonné.

## ► WTA 6-4

Le cas de l'isolation par l'intérieur des maçonneries existantes demande en fait une méthodologie spécifique. Ainsi, le WTA, association internationale pour la science et la technologie de la maintenance des bâtiments et la préservation du patrimoine, a édité en mai 2009 un « guide de planification » (disponible uniquement en allemand) qui est le premier d'une série consacrée à l'isolation thermique par l'intérieur.

Cette fiche technique, WTA 6-4, propose un diagramme innovant pour valider le choix du système d'isolation. Celui-ci croise la performance énergétique du système d'isolation appliqué sur le mur existant avec sa valeur  $S_d$  et permet de juger de la validité du système d'isolation choisi selon la capacité d'absorption du support sur lequel il est appliqué. Cette prise en compte de la capacité d'absorption du support est particulièrement innovante. Remarquons cependant que le verdict ne peut être considéré comme valide que sous certaines conditions :

- Pas de pénétration d'eau de pluie (protection, hydrofuge...),
- Le mur initial a une résistance thermique d'au moins  $R \geq 0.39 \text{ m}^2\text{K/W}$
- L'ambiance intérieure a une charge d'humidité normale (selon WTA 6-2)
- La température moyenne à l'extérieur est  $T_{\text{moy,ext}} \geq 7 \text{ }^\circ\text{C}$
- L'amélioration thermique est  $\Delta R \leq 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$  pour un support absorbant, ou  $\Delta R \leq 2 \text{ m}^2\text{K/W}$  si le support est peu absorbant.

Ainsi, si cette méthode permet de choisir plus précisément le système d'isolation par l'intérieur, elle reste assez contraignante, et ne peut être appliquée à tous les cas rencontrés en pratique.

## ► Outil ISOLIN

Le chapitre 4 présente l'outil ISOLIN développé en parallèle de ce guide. Celui-ci permet une validation rapide d'une multitude de parois, en se basant sur une base de données de résultats constituée par de nombreuses simulations dynamiques complètes réalisées avec le logiciel WUFI®Pro 4.2 . Il faut bien sûr s'assurer que les matériaux et les conditions climatiques du cas que l'on veut analyser correspondent bien à ceux utilisés pour les simulations.



### 3.4.2 VALIDATION HYGROTHERMIQUE DES NŒUDS CONSTRUCTIFS

#### ► Evaluation des déperditions thermiques supplémentaires

Le projet de modification de l'annexe IV de l'Arrêté PEB<sup>1</sup> fixe la prise en compte de l'incidence des nœuds constructifs sur le coefficient de transfert thermique par transmission. Dans celui-ci le choix est laissé entre trois méthodes : la méthode détaillée, la méthode de nœuds PEB-conformes et la méthode du choix du supplément forfaitaire pénalisant le niveau K.

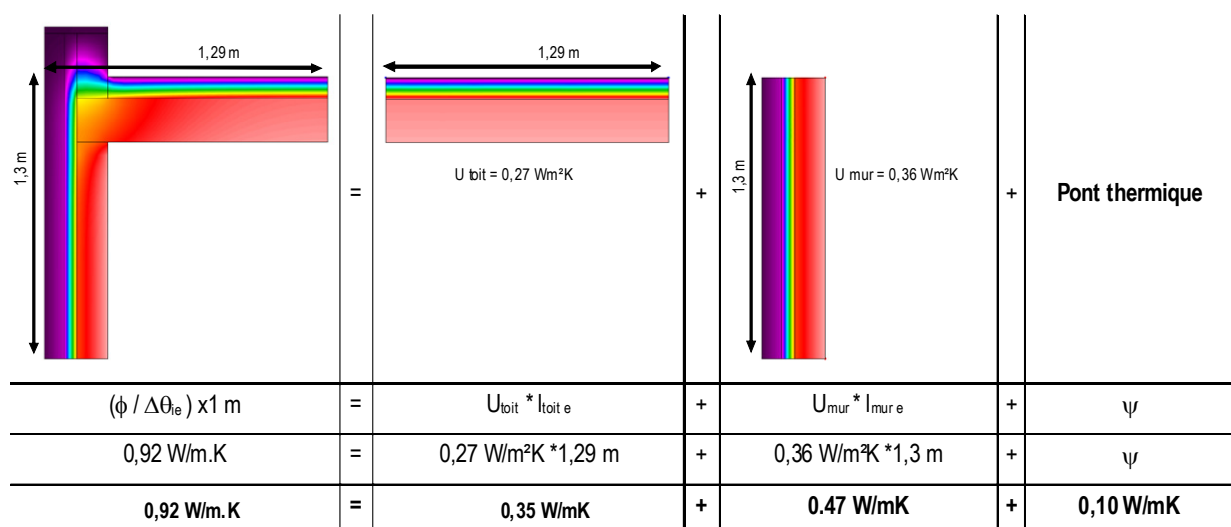
La méthode détaillée ('Option A') permet de déterminer le plus exactement possible l'influence des nœuds constructifs sur le flux de chaleur total. Tous les nœuds constructifs linéaires et ponctuels doivent dans ce cas être calculés individuellement.

La méthode des nœuds PEB-conformes ('Option B') prévoit une petite pénalité forfaitaire sur le niveau K pour les nœuds constructifs à pont thermique négligeable. Pour ces nœuds constructifs, il suffit de montrer qu'ils sont 'PEB-conformes'. Il n'est pas nécessaire d'en déterminer les longueurs et le nombre, pour que le calcul puisse être effectué. Les nœuds qui ne sont pas PEB-conformes doivent être pris en compte individuellement.

Si on choisit de ne pas prendre en compte l'influence des nœuds constructifs suivant la méthode détaillée ou la méthode des nœuds PEB-conformes, une pénalité forfaitaire ('Option C') est prévue.

Les ponts thermiques linéaires sont notés  $\Psi$  et s'expriment en W/m.K. Les ponts thermiques ponctuels sont notés X et s'expriment en W/K. Pour calculer les valeurs  $\Psi$  et X, deux méthodes sont possibles : la première passe par un calcul précis, la seconde par un calcul simplifié.

Pour un calcul précis selon des procédures de calculs bi- ou tridimensionnelles de la NBN EN ISO 10211, on peut recourir à des logiciels de calculs comme les logiciels développés par Physibel : Bisco, Trisco, Voltra, etc. ou des logiciels libres tels que THERM développé par le Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). L'exemple ci-dessous montre l'intérêt de ce type de logiciel pour estimer le flux thermique à travers le raccord entre une façade et une toiture plate. Le flux thermique du raccord étudié est noté  $\Phi$  et est exprimé en W/m<sup>2</sup>). On peut déduire de ce résultat la valeur  $\Psi$  du pont thermique, qui est linéaire dans ce cas, si l'on connaît le flux de chaleur qui traverse les parois (verticale et horizontale dans ce cas) si elle était seule.



Exemple de calcul de la valeur  $\Psi$  sur base des dimensions extérieures.

Source : RELOSO - Etude pour le renouveau du logement social, réalisée par Architecture et Climat et Matriciel

Pour un calcul simplifié selon la norme NBN EN ISO 14683, on peut utiliser des atlas de ponts thermiques (par exemple Eurokobra développé par Physibel). Ceux-ci reprennent de vastes banques de données de détails de construction dont les dimensions, matériaux et conditions peuvent être adaptés. Les valeurs par défaut peuvent toutefois faire l'objet d'une marge d'erreur allant jusqu'à 50 % tandis que pour les calculs à l'aide d'un logiciel, celle-ci est généralement de l'ordre de 20 %. Les annexes H et G de la norme NBN 62-002 (2008) reprennent pour la plupart des cas de ponts thermiques, des valeurs dites de sécurité permettant de ne pas sous-estimer l'impact des ponts thermiques. La future annexe IV de l'Arrêté PEB définira des valeurs par défaut.

### ► Évaluation du risque de condensation

À l'heure actuelle, il n'existe pas de norme permettant d'évaluer le risque de condensation associé à un pont thermique. Le seul document reconnu est la NIT 153 publiée par le CSTC en 1984. Il y est indiqué que pour éviter le risque de condensation, le « facteur de température » d'un élément de construction ou d'un pont thermique doit être en tout point supérieur à une certaine valeur. Le facteur de température est noté  $f_{R_{si}}$  (anciennement  $\tau$ ) et s'exprime sans unité.

Le facteur de température  $f_{R_{si}}$  en un point est la différence entre la température intérieure de surface en ce point ( $\theta_{si}$ ) et la température extérieure ( $\theta_e$ ) lorsque la différence de température entre l'ambiance intérieure ( $\theta_i$ ) et l'ambiance extérieure ( $\theta_e$ ) du local est égale à 1 K pour une valeur de résistance d'échange thermique superficiel intérieur  $R_{si}$ . En Belgique, la valeur  $R_{si} = 0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$  (au lieu de  $0,125 \text{ m}^2\text{K/W}$  pour les murs verticaux) est considérée.

Les valeurs guides de la NIT 153 ne s'appliquent que dans des conditions intérieures normales d'un appartement. Dans ce cas, ce document préconise :  $f_{0,20} \geq 0,7$ . Si le niveau d'humidité relative est plus faible que dans un appartement normal, le facteur de température peut être considéré comme étant plus faible, par exemple  $f_{0,20} \geq 0,65$  ou  $0,6$ . Dans le cas d'une humidité relative intérieure plus élevée (fort dégagement de vapeur), le facteur de température peut être plus élevé pour éviter le risque de condensation :  $f_{0,20} \geq 0,75$  ou  $0,8$ .

### ► Logiciel dynamique couplant chaleur et humidité

Comme indiqué plus tôt, de nombreux modèles se sont développés pour évaluer le comportement des parois soumises à un régime climatique dynamique depuis plus de quinze ans. Certains logiciels ont été conçus pour permettre de modéliser des nœuds constructifs en deux dimensions. C'est le cas du logiciel WUFI®2D, qui, comme son équivalent à une dimension, peut être couplé au logiciel WUFI®Bio pour étudier plus en finesse le développement des moisissures selon leur type. À nouveau, l'inconvénient de ces logiciels, en plus de leur coût, est le temps que demande l'encodage des données avant simulation et l'analyse des résultats.

## 3.5. SUIVI DE LA MISE EN OEUVRE

La conception est très importante pour garantir de bonnes performances aux parois. Cependant, celles-ci dépendront tout autant de la qualité de la mise en oeuvre. Les logiciels qui permettent de simuler le comportement des parois considèrent toujours une mise en oeuvre parfaite, sans aucune irrégularité. Or, on sait que dans la pratique, ce n'est pas souvent le cas, et d'autant plus en rénovation. Il est essentiel d'organiser les travaux dans un ordre logique et d'être très soigneux à chaque étape de la mise en oeuvre pour arriver à un résultat optimal.

### 3.5.1 PRINCIPAUX POINTS SENSIBLES EN RÉNOVATION

De nombreux aspects doivent être pris en compte lors de la réalisation des travaux. Il est très important d'avoir une vision d'ensemble du chantier et de bien coordonner les différentes étapes de mise en oeuvre pour que tout puisse être réalisé dans les règles de l'art. Les principaux points sensibles demandant une attention particulière en rénovation sont repris ci-dessous.

- Le mur doit être en bon état et capable de supporter les intempéries (gel entre autres). Les problèmes éventuels d'humidité initiaux doivent être résolus avant la pose de l'isolant ;
- Si un revêtement extérieur existe, il est important de connaître ses caractéristiques hygrothermiques ;
- L'étanchéité à l'air doit être extrêmement soignée afin d'éviter les risques de condensation interne par convection ;
- L'isolation doit être la plus continue possible. Les ponts thermiques doivent être repérés et limités au maximum ;
- Le système de ventilation doit permettre un renouvellement d'air suffisant ;
- La masse thermique des murs n'étant plus accessible, une stratégie adaptée doit être mise en place pour éviter les surchauffes.



Etanchéité à l'air soignée :

- Injections de mousse isolante dans les joints entre les murs et les châssis,
- Pose de bandes adhésives étanches sur les joints des panneaux OSB et sur les trous d'insufflation,
- Raccords entre les différents lés de freine-vapeur, avec la fenêtre, ...

### 3.5.2 PRÉCAUTIONS SUR CHANTIER

L'isolation par l'intérieur présente de nombreux avantages au niveau de l'organisation du chantier puisqu'elle ne demande pas d'échafaudage et que les travaux se trouvent à l'abri des intempéries. Cette technique a souvent été présentée comme étant à la portée de tout bon bricoleur. Bien que sa réalisation puisse sembler facile par rapport à d'autres systèmes d'isolation, il convient de rappeler que sa conception demande beaucoup d'attention et de rigueur afin d'éviter les différents risques liés à l'isolation par l'intérieur. Pour les mêmes raisons, la réalisation devra-t-elle aussi être très soignée.

#### ► Limitation des risques d'humidification

Afin d'éviter les risques d'humidification avant ou au cours de la mise en oeuvre, il convient de prendre certaines précautions. On pensera notamment à :

- Stocker les matériaux à l'abri des intempéries dans une position adaptée ;
- Obturer provisoirement les baies si les châssis sont remplacés ;
- Réaliser les finitions extérieures si celles-ci sont nécessaires ;
- Penser préalablement au placement des conduits électriques ou des canalisations de façon à réduire les saignées et percements ultérieurs et si nécessaire, prévoir si possible un espace à cet effet entre le pare-vapeur et la finition.

Il est important de prévoir et de respecter un ordre logique par rapport à la réalisation des différents ouvrages que comporte le chantier. Il faut s'assurer en particulier de la continuité de l'isolation et de l'étanchéité à l'air.

#### ► Préparation des supports

Différentes précautions doivent être prises avant la pose de l'isolant pour garantir une mise en oeuvre de qualité et un bon fonctionnement hygrothermique de la paroi isolée.

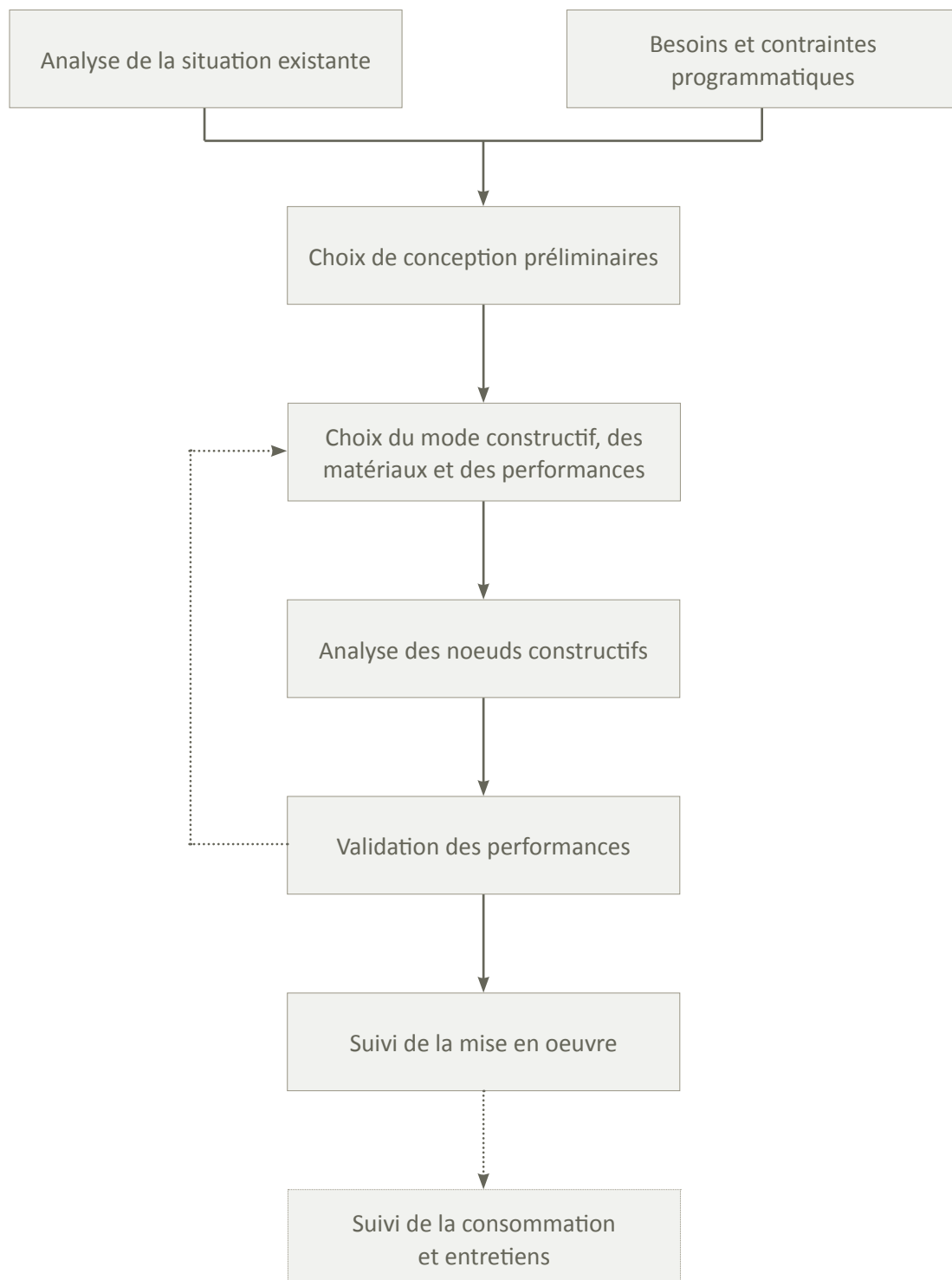
- Éliminer la finition intérieure existante éventuelle avant la pose de l'isolant. Celle-ci risquerait de créer une barrière aux transferts de vapeur d'eau et de limiter l'absorption des condensations éventuelles ;
- S'assurer que la surface du mur soit saine, exempte de poussière, de graisse ou d'huile et bien sèche ;
- Reboucher les fissures importantes éventuelles ;
- Vérifier la planéité du mur et choisir le mode constructif et l'isolant à utiliser en fonction.

#### ► Santé

Les dangers de ces chantiers intérieurs ne doivent pas être sous-estimés. Les zones en travaux devront être inhabitées, régulièrement nettoyées et fortement ventilées. Des outils adaptés et des protections (gants, masques respiratoires...) devront être employés.

## 3.6. SYNTHÈSE

L'organigramme suivant donne une vision d'ensemble de la stratégie détaillée dans cete partie du guide.





# 4

## OUTIL ISOLIN

Pour permettre aux concepteurs d'un système d'isolation par l'intérieur de faire un choix raisonné, les risques liés à une configuration particulière doivent être évalués en analysant tant les phénomènes de stockage et de transfert de chaleur que ceux liés à l'humidité. L'analyse du comportement d'une paroi est, de plus, beaucoup plus réaliste quand on utilise un modèle dynamique au lieu d'un modèle statique. Ainsi, les outils statiques utilisés jusqu'à la dernière décennie ont progressivement montré leurs limites et se font remplacer par des logiciels dynamiques couplant les phénomènes de transfert et de stockage de la chaleur à ceux liés à l'humidité.

Pour faire apparaître l'importance de chaque paramètre, près de 7000 simulations ont été effectuées avec le logiciel WUFI® 4.2 Pro. Afin de faciliter la tâche du concepteur dès les premières phases de sa conception, ou de permettre à tout acteur du secteur de se faire une idée précise du comportement d'une paroi dans une situation proche de la sienne, il est apparu essentiel de mettre à disposition l'ensemble de ses résultats.

Un ensemble de critères a été défini pour repérer rapidement les risques encourus par telle ou telle configuration. Les valeurs par défaut proposées pour chacun de ces critères peuvent être adaptées selon les exigences. Les résultats correspondent au comportement hygrothermique d'une paroi composée de plusieurs couches, et ne permettent donc pas d'étudier celui des nœuds constructifs.

La diversité des configurations qu'il est possible de rencontrer en pratique est telle qu'il est impossible de modéliser l'ensemble des cas possibles. Si les conditions climatiques ou les matériaux sont trop différents de ceux utilisés dans les simulations, il est toujours conseillé de réaliser une analyse hygrothermique complète correspondant à la réalité du cas à analyser.

Notons que la couche de finition éventuellement présente avant l'intervention sur le mur existant n'a pas été introduite dans les simulations. C'est aussi le cas des joints horizontaux de la maçonnerie et de l'éventuelle ossature. De plus, le logiciel utilisé ne tient pas compte des effets de convection au sein de la paroi, et les systèmes d'isolation par l'intérieur présentant une lame d'air derrière l'isolant, particulièrement sensible de ce point de vue, n'ont donc pas non plus été considérés. Enfin, les paramètres hygrothermiques introduits dans les simulations ne tiennent évidemment pas compte de la détérioration dans le temps des matériaux (hydrofuge, peinture...).

Pour favoriser sa diffusion, l'outil ISOLIN a été développé, en anglais, dans un format largement répandu (logiciel Microsoft Office Excel 2007). Ce fichier Excel, décomposé en plusieurs feuilles (dont certaines sont cachées), comprend des macros et des liens internes et externes. Une série de fichiers sont associés à celui-ci (fichiers « .dll » et « .exe », résultats de simulation...). Ceux-ci ne peuvent être ni modifiés ni déplacés. Remarquons que pour que l'outil puisse fonctionner, le package « .NET framework » doit être installé et un fichier nommé « progression.dat » doit aussi avoir été activé. Deux annexes sont jointes en annexe de l'outil : « Materials.pdf » qui reprend l'ensemble des paramètres correspondants aux matériaux utilisés dans les simulations ; et « Climats.xlsx » qui reprend les données horaires des différents climats (intérieur et extérieur) et des conditions de surface utilisées dans les simulations.



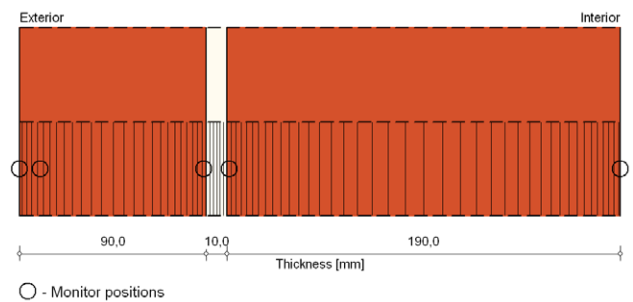
## 4.1. PARAMÈTRES ÉTUDIÉS

La diversité des configurations qu'il est possible de rencontrer en pratique est telle qu'il est impossible de modéliser l'ensemble des cas possibles. L'impact de six facteurs d'influence a été analysé dans l'outil ISOLIN : les caractéristiques du mur existant, les conditions climatiques à l'extérieur et à l'intérieur, le type d'isolant et son épaisseur, la présence d'une éventuelle membrane et celle d'un revêtement extérieur. Pour chacun de ces facteurs, plusieurs possibilités ont été envisagées. L'ensemble des configurations considérées balaye donc un champ assez large, qui couvre une grande partie des cas classiques rencontrés en pratique.

### 4.1.1 SITUATION EXISTANTE

#### ► Mur en briques existant

Le cas qui nous occupe est celui des murs pleins, maçonnés en briques pleines d'une épaisseur de briques d'une brique et demie, soit 29 cm (panneresse + boutisse). Les valeurs retenues pour les briques ont été définies en croisant différentes bases de données, celles de la norme CEN TC 125, de la fédération belge de la brique et du logiciel WUFI®.

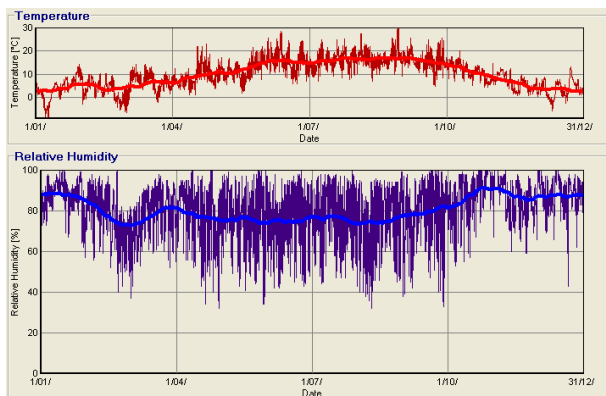


Une série d'analyses préalables sur l'influence de ces paramètres et de leur variabilité a montré que les paramètres ayant le plus d'influence sont les coefficients de transfert d'eau liquide de la brique. Quatre classes de brique ont alors été définies sur base du coefficient d'absorption A :

- Type « A » : Brique très absorbante :  $A = 0,3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$  ;
- Type « B » : Brique moyennement absorbante :  $A = 0,15 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$  ;
- Type « C » : Brique peu absorbante :  $A = 0,05 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$  ;
- Type « D » : Brique très peu absorbante :  $A = 0,02 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ .

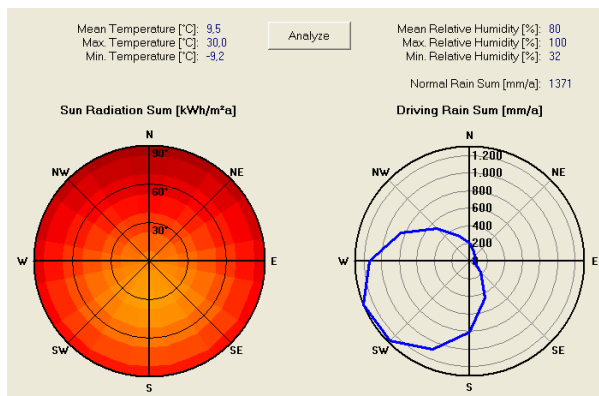
Par ailleurs, les autres paramètres correspondent à des valeurs moyennes rencontrées couramment en pratique ( $\rho = 1700 \text{ kg/m}^3$  ;  $\lambda = 0,6 \text{ W/mK}$  ;  $\mu = 10$ ). Le mortier utilisé pour le joint vertical est un mortier à la chaux classique. Les joints horizontaux ont été négligés. L'ensemble des paramètres hygrothermiques des matériaux utilisés est repris en annexe de l'outil. Remarquons que l'on considère que la finition intérieure du mur existant a été soigneusement éliminée avant la réalisation du système d'isolation par l'intérieur.

Les briques de type « B » sont en fait les plus courantes. Les briques « A » et « C » sont moins souvent rencontrées. Les briques « D » sont relativement rares. Le paragraphe 3.1.2 explique comment faire un choix qui correspond à la réalité.



Température et humidité relative (TRY).

Source : WUFI®.



Analyse du climat à Uccle (TRY).

Source : WUFI®.

## ► Climat extérieur

Le climat extérieur de référence (TRY) correspond au climat calculé sur base d'une moyenne des enregistrements de plusieurs années consécutives à Uccle par l'Institut Royal Météorologique belge - IRM: longitude : 4,36 ° Est ; latitude : 50,80° Nord ; altitude 100m.

Du point de vue de l'orientation, on peut déduire de l'illustration de droite que l'orientation la plus défavorable du point de vue de l'effet de la pluie battante (humidification et chaleur latente d'évaporation) est le sud-ouest. On remarque cependant que l'effet de la pluie sera partiellement compensé (séchage, apports gratuits) par l'effet du rayonnement solaire, maximum au sud. L'orientation nord est l'autre orientation critique, car le rayonnement solaire et la pluie battante y seront nettement plus faibles.

Ainsi, deux orientations ont été retenues dans l'outil ISOLIN : le nord (N), plus critique du point de vue des transferts de chaleur ; et le sud-ouest (SW), plus critique du point de vue de l'effet de la pluie. Il est conseillé de choisir l'orientation nord pour les parois orientées au nord-est, est ou même sud-est. De même, les parois orientées au sud, ou sud-ouest jusqu'au nord-ouest, peuvent être validées grâce aux résultats correspondant à l'orientation sud-ouest. En cas de doute, les cas correspondants aux deux orientations proposées doivent être analysés en parallèle.

Le climat de référence TRY, calculé sur une moyenne, ne permet pas de mettre en évidence les comportements atypiques qui peuvent apparaître durant des périodes climatiques plus sévères. Pour les deux orientations choisies, un climat plus sévère a donc été défini sur base de l'année de référence dans laquelle on a inséré une séquence de périodes critiques. Il s'agit de périodes très froides formant une année « froide » (COLD) pour l'orientation nord, et de périodes très pluvieuses formant une année « pluvieuse » (WET) pour le sud-ouest. Il est utile de vérifier le comportement de la paroi choisie avec le climat extrême correspondant.

Les coefficients de transfert de chaleur en surface correspondent aux prescriptions de la norme belge NBN 62-002 :  $h_e=23\text{m}^2\text{K}/\text{W}$  à l'extérieur et  $h_i=8\text{m}^2\text{K}/\text{W}$  à l'intérieur pour un mur vertical séparant une ambiance intérieure d'une ambiance extérieure. Les coefficients de transfert de vapeur sont déduits des précédents par le logiciel WUFI®. Les valeurs horaires relatives aux quatre couples climat/orientation définis dans l'outil ISOLIN (SW-TRY, N-TRY, SW-WET, N-COLD) et aux coefficients de surface sont repris heure par heure en annexe de l'outil.

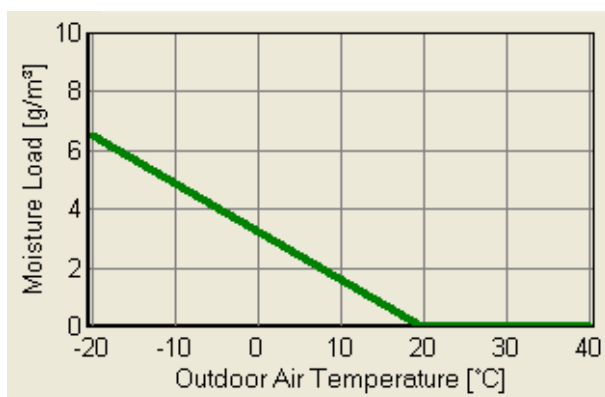
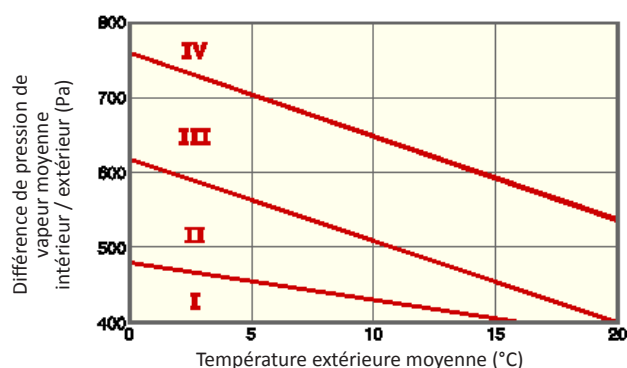
En plus de ces données, il est important de considérer aussi les conditions initiales du mur existant. Celles-ci dépendent des sollicitations hygrothermiques que le mur a subies au cours de sa vie. Dans l'outil ISOLIN, les profils de distribution de température et d'humidité choisis pour le mur existant correspondent à ceux obtenus lorsqu'il est soumis à l'extérieur au climat de référence (TRY) et à l'intérieur au climat dit « normal » (CL2), pendant une période assez longue que pour que ces profils soient en situation d'équilibre hygrothermique, c'est-à-dire qu'ils se répètent d'année en année.

## 4.1.2 CLIMAT INTÉRIEUR

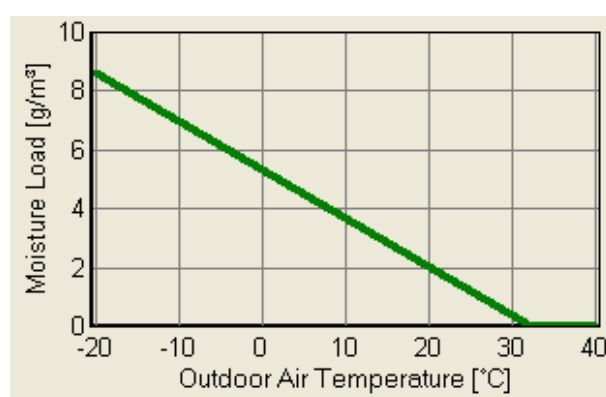
Le climat intérieur que l'on prévoit après l'application du système d'isolation par l'intérieur doit être considéré pour choisir le système à mettre en œuvre puisque tout transfert à travers la paroi est dû à une différence de climat entre l'intérieur et l'extérieur.

Dans l'outil ISOLIN, le choix s'est porté sur l'utilisation de la norme EN 13788 qui permet de définir une charge en humidité du climat intérieur qui varie selon la température extérieure. Ce choix permet d'utiliser des climats intérieurs qui correspondent à ceux définis dans la NIT 215 du CSTC.

Deux classes de climat intérieur ont ainsi été modélisées, respectivement la classe 2, dite « normale », pour les « Bâtiments bien ventilés avec une production d'humidité limitée par m<sup>3</sup> » (CL2) et la classe 3, dite « humide », pour les « Bâtiments avec une production d'humidité plus importante au m<sup>3</sup> et ventilation modérée à suffisante » (CL3).



CL 2

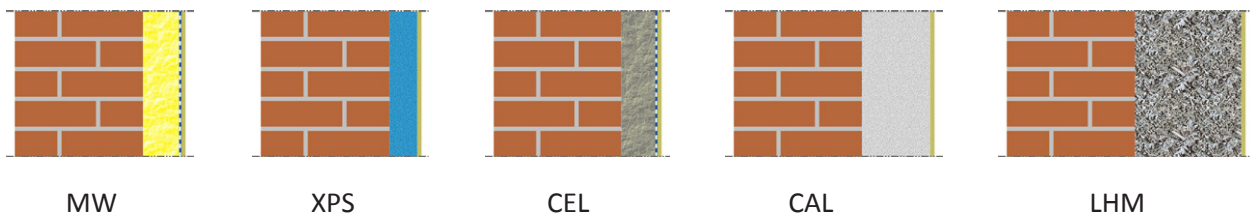


CL 3

En général, la première, CL2, s'utilise principalement pour les grandes habitations, alors que la seconde, CL3, s'utilise pour des habitations de dimension plus réduites ou simplement plus humides. Dans la norme EN 13788, le niveau de température intérieure est considéré comme constant, et il est fixé ici à 20 °C. Si ce choix permet de correspondre à la terminologie de la NIT 215, il ne permet donc pas de mettre en évidence les effets de la surchauffe, et il faudra être prudent dans l'interprétation des résultats de ce point de vue.

## 4.1.3 TYPE D'ISOLANT

Dans l'outil ISOLIN, cinq matériaux génériques ont été modélisés : la laine minérale (MW), le polystyrène extrudé (XPS), les fibres de cellulose (CEL), le silicate de calcium (CAL) et le chaux-chanvre (LHM). Les principaux paramètres hygrothermiques de ces matériaux sont repris en annexe de l'outil. Ils se distinguent par leur mode constructif, leur coût, leurs performances hygrothermiques. Leur impact environnemental respectif ressort des chiffres présentés au chapitre précédent, il est important de considérer celui-ci d'un point de vue global sur le chantier et la vie du système.



Matériaux analysés ( $U=0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Les matériaux les plus répandus sont bien sûr les matériaux les moins chers, MW et XPS. Ils bénéficient d'un marché bien installé, de gros volumes de production et des techniques de mise en œuvre bien maîtrisées, ce qui justifie en partie leur coût réduit. Les isolations en CEL ou CAL sont pourtant parfaitement compétitives et celle en LHM sont certainement vouée à un développement plus large et à une optimisation des techniques de mise en œuvre.

Le mode constructif de MW et CEL sont un remplissage de structures. Ils sont disponibles sous forme de rouleaux souples ou semi-rigides, ou sont projetés directement dans les caissons formés par l'ossature de la structure. Ils sont généralement mis en œuvre en combinaison d'une membrane freine-vapeur. L'effet de l'ossature a été négligé.

Le polystyrène extrudé est classiquement fourni sous forme de panneaux à coller sur le support existant rafraîchi. Le silicate de calcium est vendu sous forme de plaques, maçonnées directement contre la brique existante débarrassée de la finition préexistante à l'aide d'un mortier-colle compatible. Le LHM peut être projeté, mais il est encore très souvent placé à la main dans une structure de coffrage provisoire.

Le choix de l'isolant conditionne, dans une certaine mesure, celui de la finition intérieure. On considère qu'il s'agit de plaques de plâtres cartonnées pour MW, CEL, XPS. C'est la solution la plus fréquente en pratique (les panneaux d'isolant sont d'ailleurs parfois vendus avec cette finition collée sur une face du panneau). CAL et LHM sont le plus souvent recouverts d'un enduit compatible avec le matériau. Il est important de remarquer que la continuité (pas d'interruption ou percement) de cette finition et de l'éventuelle membrane située sous celle-ci ne doit pas être percée. Les fixations d'éléments de mobilier ou de décoration doivent donc être soignées pour éviter de dégrader la performance du système isolant.

Leurs performances thermiques sont très différentes. MW et XPS possèdent une conductivité thermique très basse, mais leur capacité thermique (voir définition au §1.3.3) est aussi très basse, ce qui les rend très isolants, mais n'offre aucune inertie au mur. CEL est tout aussi isolant, mais sa capacité thermique est plus élevée grâce à la cellulose qu'il contient. CAL est légèrement moins isolant, mais sa capacité thermique est aussi relativement plus élevée. CEL et CAL offriront donc globalement plus d'inertie thermique. LHM est sensiblement moins isolant. Pour une valeur de coefficient de transfert thermique donnée, les épaisseurs nécessaires sont donc systématiquement plus élevées que pour les autres matériaux. Néanmoins, ce matériau procure une réelle inertie thermique d'une part grâce à la cellulose qu'il contient, mais aussi grâce à ses propriétés hydriques particulières.

Chacun de ces matériaux a un comportement à l'humidité spécifique, que ce soit du point de vue de la vapeur, des transferts d'eau liquide ou du point de vue de la rétention d'eau. MW est très ouvert à la vapeur, mais ne supporte pas une humidification répétée. Il est donc en général hydrofugé et combiné à une membrane freine-vapeur (et pare-air). XPS est, lui, très fermé à la vapeur et ne doit donc pas être combiné à une membrane. Pour ces deux premiers, on considère que leur capillarité (absorption et redistribution) est nulle et que leur rétention d'humidité est négligeable.

CEL est très ouvert à la vapeur et, bien que son humidité s'adapte à l'environnement, il est en général aussi combiné à une membrane freine-vapeur. Sa capillarité est faible, mais il possède une forte capacité de rétention d'eau qui n'est partiellement exploitable qu'avec une membrane faiblement freine-vapeur.

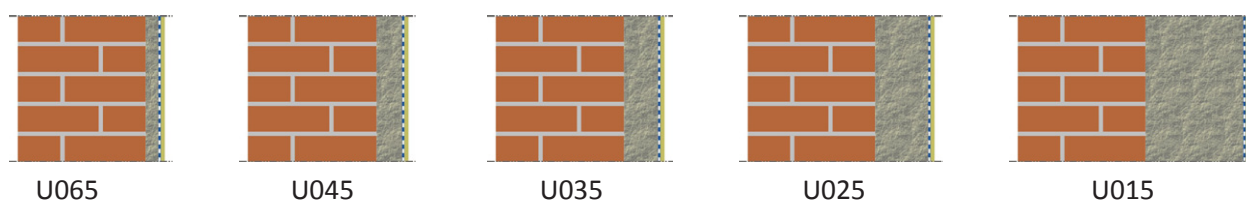
CAL est ouvert à la vapeur, mais n'est pas combiné à une membrane freine-vapeur, car il possède une forte capillarité qui lui permet une gestion facilitée de l'humidité (redistribution et évaporation de surface). Sa capacité de rétention d'eau reste pourtant faible comparée à CEL ou LHM. Puisque ce n'est pas sa performance thermique, l'intérêt principal du LHM est justement sa gestion de l'humidité. Très ouvert à la vapeur, c'est un matériau capillaire (capillarité active) qui est capable de tolérer une rétention d'eau considérable modifiant peu ses propriétés hygrothermiques. Remarquons toutefois que si l'on peut alors se passer de membranes pour réguler la vapeur, c'est la finition qui doit la remplacer. Celle-ci doit donc faire l'objet d'une mise en œuvre de qualité.

Rappelons que si les matériaux utilisés sont trop différents de ceux utilisés dans les simulations, une analyse complète est alors nécessaire. On pourra néanmoins considérer, en première approximation, que le comportement d'une laine minérale d'une autre densité aura les mêmes tendances ; qu'un matériau à base de fibre de bois aura un comportement globalement proche de celui des fibres de cellulose ; et qu'un béton cellulaire adapté à l'isolation par l'intérieur pourra être assimilé au silicate de calcium étudié...

#### 4.1.4 PERFORMANCE THERMIQUE

On l'a vu, plus on isole, au plus le mur préexistant est froid, puisqu'il bénéficie de moins d'apports de chaleur par l'intérieur. Ce phénomène équivaut en fait à réduire le potentiel de séchage du mur. Un premier cas analysé correspond au mur initial (INIT), sans système d'isolation par l'intérieur. Le coefficient de transfert thermique de ce mur initial est de  $U = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Cinq niveaux de performance thermique ont été modélisés en complément :  $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  (U015),  $U = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$  (U025),  $U = 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$  (U035),  $0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$  (U045) et  $U = 0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$  (U065). Le tableau ci-dessous donne les épaisseurs d'isolant correspondantes aux différents niveaux de performances thermiques.

Epaisseur [cm]	U015	U025	U035	U045	U065
MW	24	13	8.5	6	3.5
XPS	18	10	6.5	4.5	2.5
CEL	23	12.5	8	6	3
CAL	-	25	16	11.5	6.5
LHM	-	-	25	18	10



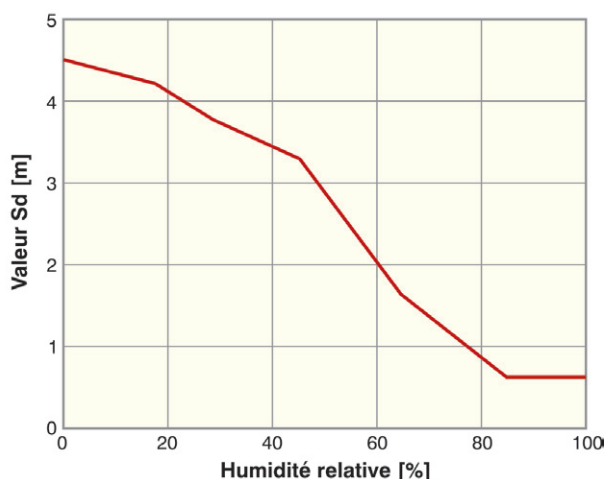
Différents niveaux de performances thermiques pour un mur isolé avec des fibres de cellulose.

Remarquons que les niveaux U015 et U025 n'ont pas été simulés pour LHM car celles-ci entraîneraient des épaisseurs (et un coût) trop importantes. Même remarque pour le niveau U015 avec CAL. Les niveaux U045 et U065 ne répondent pas à réglementation en vigueur sur les valeurs de  $U_{max}$  (voir premier chapitre) et sont donc en général insuffisants. Ces résultats permettent toutefois d'étudier une alternative de plus dans certains cas spécifiques où la réglementation n'est pas aussi exigeante (autre contexte réglementaire, exceptions liées au type de bâtiment...).

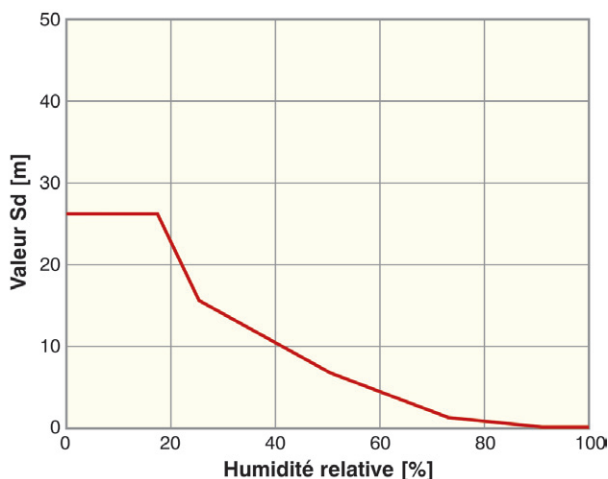
Notons enfin que le calcul du coefficient de transfert thermique  $U$  est fait sur base des propriétés sèches des matériaux. Traversée, et parfois chargée d'humidité, la conductivité thermique des matériaux évolue, ce qui peut augmenter légèrement la valeur  $U$ . En général pourtant, on verra que le transfert thermique calculé en dynamique est proche de celui qu'on peut évaluer sur base du  $U$  (sec) et des différences de température entre intérieur et extérieur. La couche de revêtement extérieur, ainsi que l'effet de la structure ou des ancrages de l'isolant, ne sont pas pris en compte dans les calculs.

### 4.1.5 MEMBRANE

Pour MW, deux types de membranes en polyéthylène ont été introduites dans les simulations, en plus du cas sans membrane, elles ont respectivement une épaisseur lame d'air  $S_d$  de 2 m (E1) et de 100 m (E3), nommée suivant les classes de membrane définies dans la NIT215 du CSTC. Les mêmes membranes peuvent aussi être choisies pour CEL, en plus du cas sans membrane. De plus, deux membranes intelligentes (DB et INT) ont été introduites pour ce matériau (CEL). Les graphiques suivants illustrent comment leur résistance à la diffusion de vapeur d'eau varie en fonction de l'humidité relative ambiante. On remarque que la première (DB) est bien plus ouverte à la vapeur que la seconde (INT), leur  $S_{d, \text{moyen}}$  est respectivement de l'ordre de 2 m (DB) et de 10 m (INT). Toutes ces membranes sont considérées comme ayant été mises en œuvre parfaitement (continuité parfaite, pas de percement).



Membrane Intelligente « DB »



Membrane Intelligente « INT »

### 4.1.6 REVÊTEMENT EXTÉRIEUR

Quatre choix de revêtement sont proposés : soit le mur n'a aucun revêtement et la brique est directement soumise au climat extérieur (NR), soit la brique est revêtue d'un enduit (CL), soit elle est imprégnée d'un hydrofuge de surface (WR), soit encore, elle est couverte par une peinture étanche à l'eau et à la vapeur (PA).

Pour la brique non revêtue, les caractéristiques de la maçonnerie prennent une importance significative. L'enduit choisi pour les simulations correspond à un enduit à la chaux classique (cf. valeurs reprises en annexe de l'outil). Remarquons que la variabilité des propriétés des enduits peut être étendue (à la chaux, au ciment, à base d'autres liants synthétiques ou minéraux) et le type de mise en œuvre et de technique de finition (serré, taloché, gratté, épongé...). L'hydrofuge est modélisé comme ayant un comportement idéal : on considère qu'il annule complètement l'absorption de pluie battante et qu'il ne diminue la perméabilité à la vapeur du premier centimètre de brique que de 25 %. Les produits correspondants sont décrits dans la NIT 224 du CSTC. Recouvrir la brique d'une peinture non perméable à la vapeur d'eau n'est généralement pas souhaitable, même si l'on considère qu'il annule complètement l'absorption de pluie battante, car elle empêche le séchage du mur et l'évacuation de l'humidité qui transite à travers lui. Ce type de revêtement a été envisagé dans l'outil ISOLIN car il se rencontre encore souvent en pratique.

Remarquons enfin que pour tous les matériaux, et donc aussi pour les enduits, hydrofuges et peintures, il est recommandé de vérifier si les propriétés envisagées sont réellement rencontrées en pratique et pendant combien de temps celles-ci restent valables.

## 4.2. RÉSULTATS DISPONIBLES

L'outil ISOLIN permet de comparer 5 cas de parois simultanément. Pour chacun de ceux-ci, l'utilisateur a accès à une grande quantité de données correspondant aux résultats de simulations pour une année complète. L'évolution horaire des flux de chaleur et d'humidité en surface et à l'interface entre le mur et l'isolant, ainsi que des températures et de la teneur en eau aux positions les plus stratégiques de la paroi, sont présentés sous forme graphique et peuvent être rapidement analysés grâce à certaines valeurs clés (maximum, minimum, moyenne...). Ces valeurs sont utilisées pour générer d'autres graphiques utiles pour compléter la comparaison : ceux présentant les déperditions thermiques, ceux présentant la quantité d'humidité échangée avec l'intérieur et ceux présentant les teneurs en eau moyenne dans le composant. Ces graphiques illustrent les résultats saison par saison et pour l'année entière.

Dans le cas des briques très absorbantes et absorbantes (A et B), l'équilibre hygrothermique du mur est plus rapidement atteint que dans le cas des briques moins absorbantes (C et D). Les simulations correspondantes aux deux premiers types ont dès lors été réalisées sur 3 années, alors que celles correspondantes aux briques C ont été réalisées sur 10 années, et 20 années pour les briques D. Seules les valeurs correspondantes à la dernière année sont reprises dans l'outil ISOLIN.

Remarquons également que les conditions initiales des matériaux rapportés lors de la mise en œuvre du système d'isolation par l'intérieur ont été fixées à 20 °C et 80 % à travers la paroi (les conditions initiales pour le mur existant sont précisées au paragraphe précédent).

Les illustrations de ce chapitre correspondent à l'analyse de 5 parois ayant des matériaux d'isolation différents (respectivement MW, XPS, CEL, CAL et LHM), mais ayant toutes un U de 0,35 W/m<sup>2</sup>, une maçonnerie de briques de type « B », pas de revêtement extérieur. Dans tous les cas, le climat extérieur et l'orientation sont N-TRY et le climat intérieur est CL2. Ces parois n'ont pas de membrane pour réguler la vapeur, sauf MW (E1) et CEL (DB). Sur les illustrations, un point rouge désigne l'endroit au sein de la paroi auquel les valeurs correspondent.

### 4.2.1 CLIMATS ET MATÉRIAUX

Le climat extérieur est défini par la température et l'humidité, mais aussi par l'ensoleillement direct et diffus, les précipitations et le vent (la pression est considérée comme constante et le contre-rayonnement de la voûte céleste est négligé). L'annexe « climats.xlsx » reprend l'ensemble des valeurs climatiques et de surface relatives aux orientations nord et sud-ouest. La colonne E des feuilles « Case1 » à « Case5 » reprend la température extérieure.

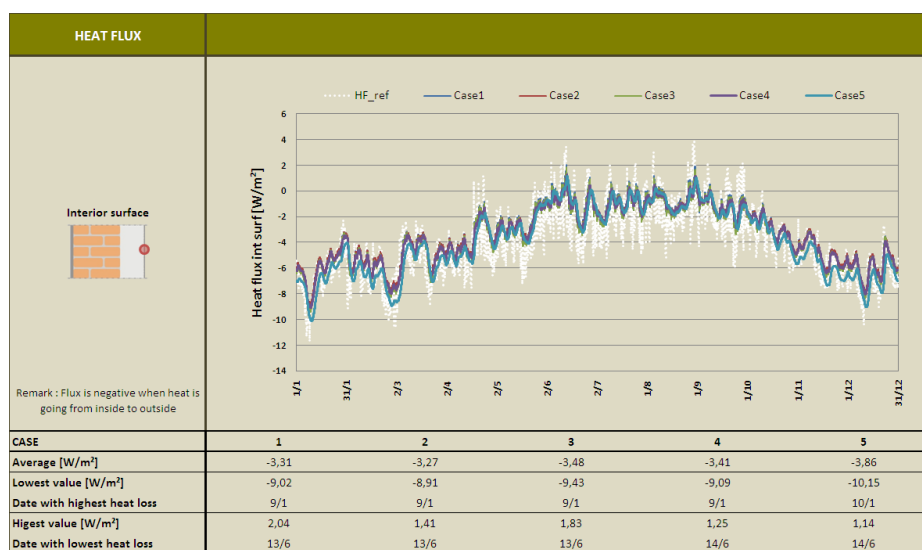
Les matériaux sont définis dans WUFI® sur base de 5 paramètres hygrothermiques de base et 5 relations à l'humidité. L'annexe « Materials.pdf » reprend les valeurs utilisées dans les simulations pour chacun des matériaux, comme notamment :

- densité sèche  $\rho_0$  [kg/m<sup>3</sup>],
- porosité totale sèche  $\xi_0$  [%],
- chaleur massique sèche  $c_0$  [J/kg.K],
- conductivité thermique sèche  $\lambda_0$  [W/m.K],
- résistance à la diffusion de vapeur d'eau sèche  $\mu_0$  [-],
- la teneur en eau de référence, à 80% d'HR,  $w_{80}$  [kg/m<sup>3</sup>],
- la saturation libre, ou teneur en humidité à 100% d'HR,  $w_f$  [kg/m<sup>3</sup>],
- la teneur en eau maximale  $w_{max}$  [kg/m<sup>3</sup>],
- le coefficient d'absorption A [kg/m<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>].

## 4.2.2 FLUX DE CHALEUR ET D'HUMIDITÉ

L'utilisateur de l'outil ISOLIN dispose, pour chacune des parois sélectionnées, de l'ensemble des valeurs relatives aux flux de chaleur et d'humidité à trois endroits stratégiques : à la surface extérieure, à l'interface entre la brique et l'isolant, et à la surface intérieure. Le flux d'humidité se décompose en flux de vapeur (flux diffusif) et en flux d'eau liquide (flux capillaire). Les colonnes de F à Q des feuilles « Case1 » à « Case5 » reprennent l'ensemble de ces valeurs.

Le flux de chaleur à travers la surface intérieure est présenté sous forme graphique à la feuille « H » pour chacune des parois sélectionnées sur l'ensemble de l'année (valeur négative par convention quand le flux va de l'intérieur vers l'extérieur). Le graphique reprend aussi, par la courbe HF\_Ref, le flux traversant une paroi dont le coefficient de transmission thermique est le  $U_{max}$  réglementaire, calculé en multipliant la différence de température entre intérieur et extérieur avec ce coefficient de transmission thermique (calcul statique). La moyenne de l'année, ainsi que le maximum et le minimum (et leur date d'occurrence) pour chacun des cas sont aussi repris à titre indicatif.

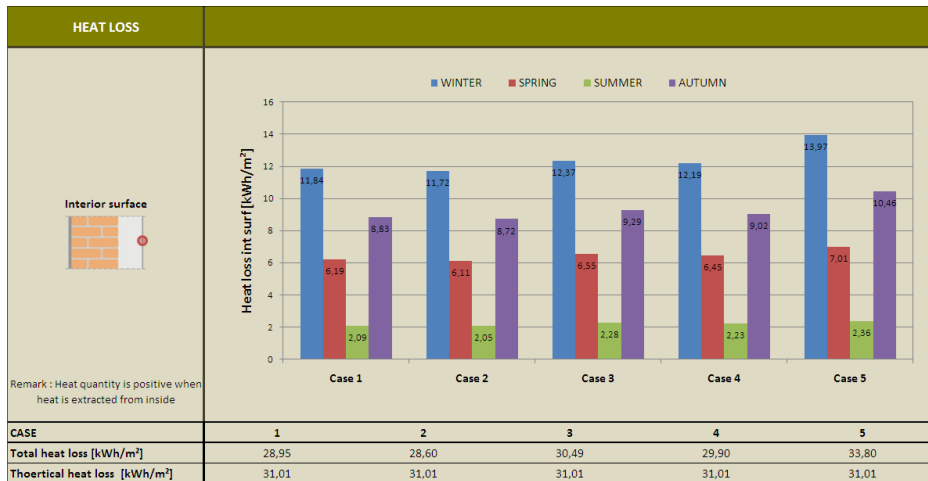


Exemple de résultats – Flux de chaleur.

De plus, toujours sur cette feuille « H », une intégrale du flux de chaleur est réalisée pour chacune des saisons et pour la totalité de l'année, donnant la déperdition thermique à travers chacune des parois pour ces périodes (la déperdition est positive quand la chaleur est perdue par l'ambiance intérieure).

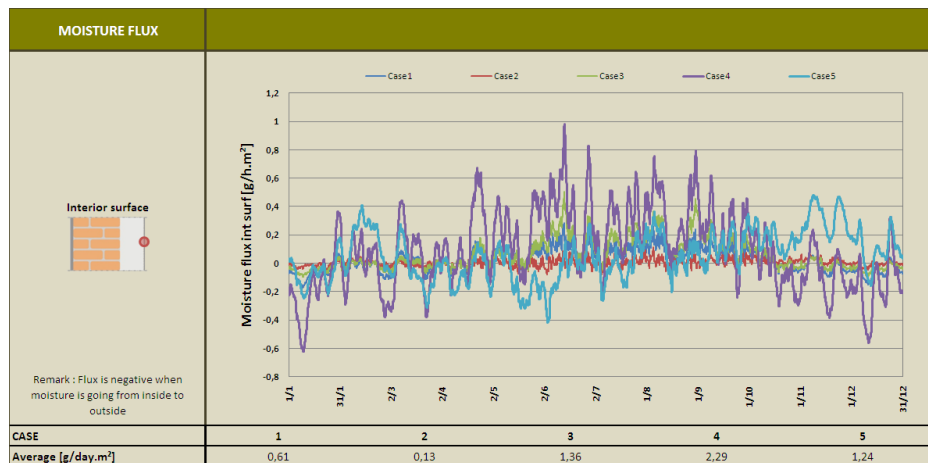
La déperdition théorique est calculée en multipliant le coefficient de transmission thermique  $U$  de la paroi par la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur (calcul statique). Ce calcul théorique ne prend pas en compte le soleil, la pluie, l'humidité du mur et les effets d'inertie (thermique et hydrique). Le résultat peut donc être assez différent de la déperdition thermique issue de l'intégration du flux de chaleur résultant des simulations, mais montre la marge d'erreur de ce type de calcul.



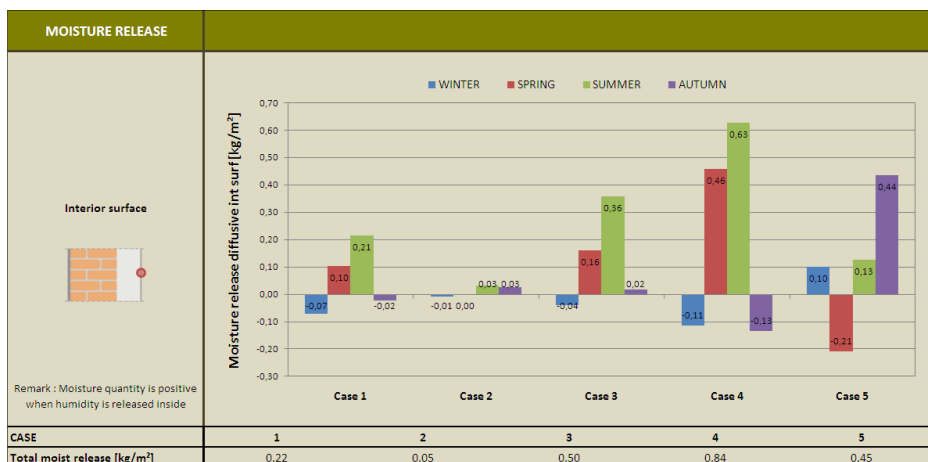


Exemple de résultats – Déperditions thermiques.

Le flux d'humidité à travers la surface intérieure et sur l'ensemble de l'année est présenté sous forme graphique à la feuille « M » (valeur négative par convention quand le flux va de l'intérieur vers l'extérieur). La moyenne annuelle est reprise à titre indicatif. Remarquons que le flux correspond ici au flux de vapeur (flux diffusif), car le flux capillaire est nul à la surface intérieure. L'intégrale de ce flux est réalisée pour chacune des saisons et pour la totalité de l'année, donnant la quantité de vapeur libérée dans l'ambiance intérieure à travers chacune des parois pour ces périodes (la valeur est positive quand l'humidité est libérée dans l'ambiance intérieure).



Exemple de résultats – Flux d'humidité.

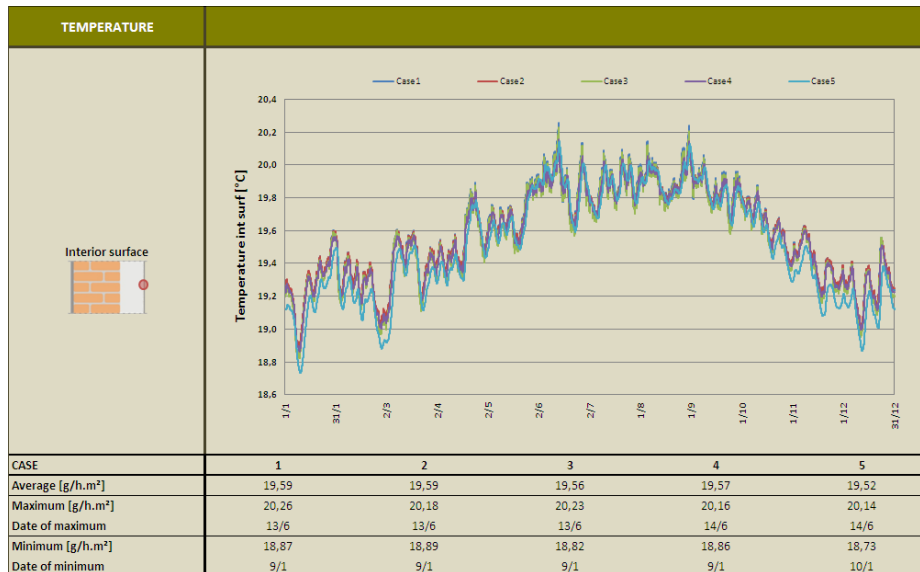


Exemple de résultats – Vapeur libérée à l'intérieur.

## 4.2.3 TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ RELATIVE

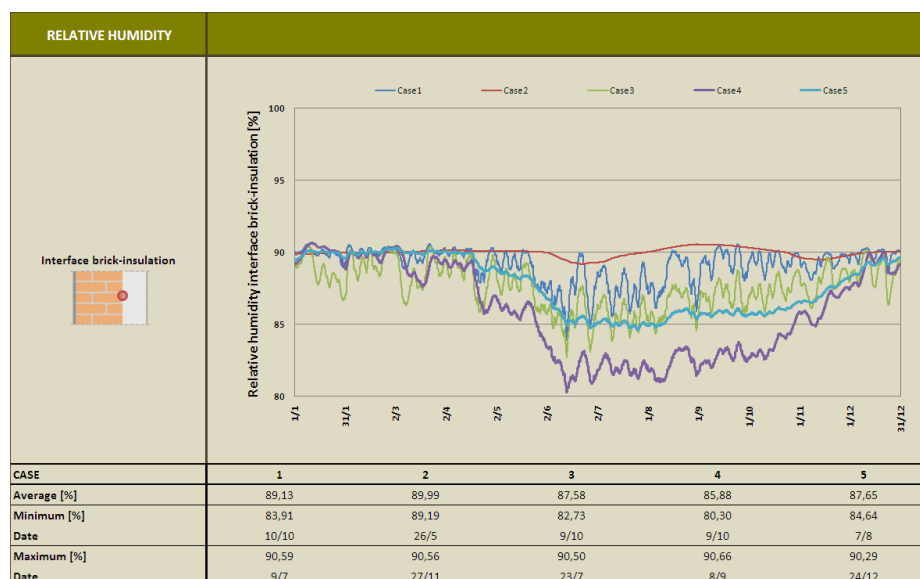
L'outil ISOLIN reprend, pour chacune des parois sélectionnées, la température et l'humidité relative dans la brique, à 1 cm sous la surface extérieure (ou sous la couche extérieure, s'il y en a une), à 1 cm de l'interface avec l'isolant, dans la brique et dans l'isolant, à 1 cm sous la couche de finition intérieure (ou sous la membrane, s'il y en a une), et à la surface intérieure. Les colonnes de R à AA des feuilles « Case1 » à « Case5 » reprennent l'ensemble de ces valeurs.

Les températures dans la brique à 1 cm sous la surface extérieure, et à la surface intérieure sont présentées sous forme graphique à la feuille « T ». La moyenne de l'année, ainsi que le maximum et le minimum (et leur date d'occurrence) sont repris à titre indicatif. Remarquons que la température à la surface intérieure reste relativement élevée, car l'ambiance intérieure est fixée à 20 °C lors des simulations.



Exemple de résultats – Température de surface intérieure.

L'humidité relative dans la brique, à 1 cm sous la surface extérieure, dans l'isolant, à 1 cm sous l'interface avec la brique, et à 1 cm sous la couche de finition intérieure est présentée sous forme graphique à la feuille « HR ». La moyenne de l'année, ainsi que le maximum et le minimum (et leur date d'occurrence) sont repris à titre indicatif.



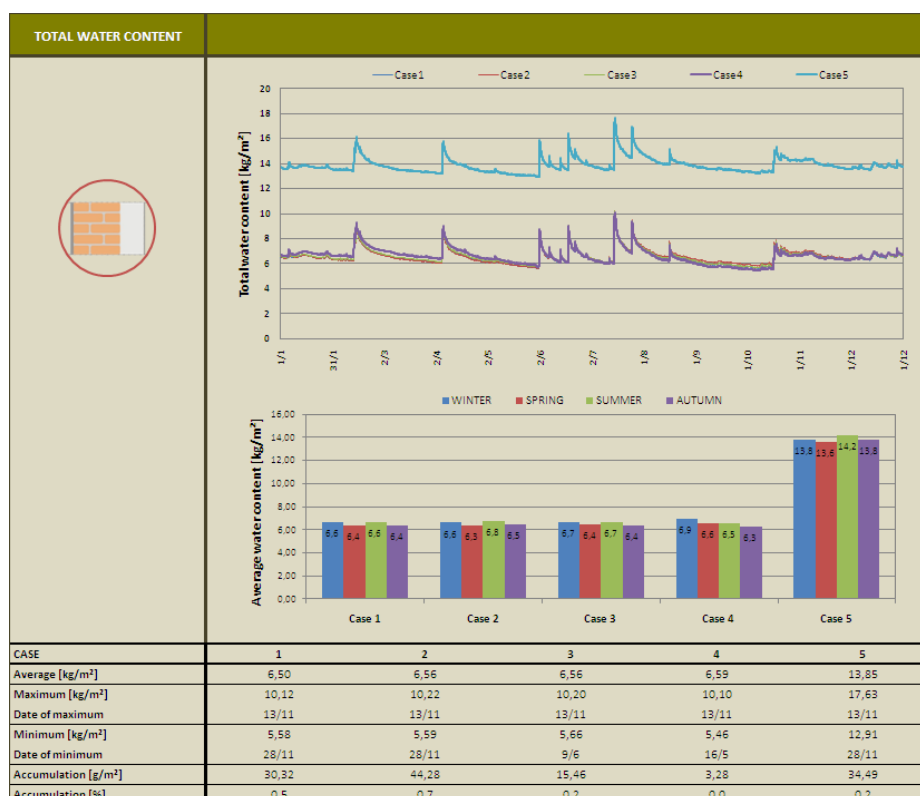
Exemple de résultats – Humidité relative à l'interface entre l'isolant et la brique.

## 4.2.4 TENEUR EN EAU

L'outil ISOLIN met à disposition, pour chacune des parois sélectionnées, la teneur en eau totale (en kg/m<sup>2</sup> de paroi), ainsi que la teneur en eau d'ensemble de certaines couches (en kg/m de matériau) : le revêtement extérieur, la brique du côté extérieur, la brique du côté intérieur et l'isolant. Les colonnes de AB à AK des feuilles « Case1 » à « Case5 » reprennent l'ensemble de ces valeurs.

Quatre feuilles reprennent les résultats sous forme graphique : « Wtot » présente la teneur en eau totale des composants, « Wb.ext » et « Wb.int » présentent la teneur en eau, respectivement dans la brique du côté extérieur et du côté intérieur, et « Wisol » qui présente la teneur en eau dans l'isolant.

La feuille « Wtot » présente, en plus, la teneur en eau moyenne pour chaque saison, dans chacune des parois sélectionnées. Chacune de ces quatre feuilles présente aussi l'accumulation d'humidité dans la couche correspondante en plus de la moyenne de l'année, le maximum et le minimum (et leur date d'occurrence) qui sont repris à titre indicatif. Cette dernière est calculée par la différence de teneur en eau entre le début et la fin de l'année dont les résultats sont présentés. Elle s'exprime soit en kg/m<sup>3</sup>, soit en % de variation par rapport à la valeur moyenne de l'année. Remarquons que, dans la feuille « Wisol », la teneur en eau, qui s'exprime partout ailleurs en kg/m<sup>3</sup>, est aussi exprimée en pourcentage de masse, mass%, afin de pouvoir comparer les valeurs obtenues pour des isolants très différents.



Exemple de résultats – Teneur en eau totale des composants sélectionnés.



## 4.3. CRITÈRES DE VALIDITÉ ET VALEURS PAR DÉFAUT

Pour permettre de valider un choix de système d'isolation par l'intérieur dès les premières phases de conception, un ensemble de conditions ont été définies en comparant les résultats de simulation avec une série de valeurs recommandées et de valeurs limites. L'ensemble de ces valeurs est repris dans la feuille « Limits » de l'outil ISOLIN. Des valeurs par défaut ont été définies sur base des normes en vigueur ou par exploitation de la littérature. Ces valeurs doivent être adaptées pour affiner l'analyse et devraient à l'avenir faire l'objet de recherches spécifiques pour définir des valeurs de référence pour les situations standards rencontrées en pratique. Une feuille nommée « Results » synthétise, sous forme de tableau de bord, les résultats nécessaires pour valider chacune des parois sélectionnées et repérer plus facilement les risques qui y sont liés.

Pour chacun des critères présentés ci-dessous, l'outil ISOLIN présente les résultats sous forme d'icônes :



– POSITIF : Signifie que le résultat pour ce critère est acceptable au vu des limites définies ;



– RISQUE : Signifie (sauf pour critère H) que la valeur recommandée est dépassée. Il y a un risque, mais la situation n'est peut-être pas grave. Il est conseillé de vérifier plus précisément son ampleur en analysant les résultats bruts présentés dans les feuilles correspondantes ;



– NEGATIF : Signifie que la valeur limite est dépassée ; Le cas doit vraisemblablement être rejeté.

### 4.3.1 PERTES DE CHALEUR

En Région wallonne, le coefficient de transfert thermique des murs extérieurs doit, dans la majorité des cas, être inférieur à  $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Cette valeur peut varier selon les régions et n'est pas applicable à tous les types de bâtiments. Le critère H vérifie la performance thermique du mur dans son ensemble. Le résultat du critère H sera considéré comme « à risque » si le U de la paroi analysée est supérieur à cette valeur réglementaire (cette valeur par défaut peut être adaptée). Remarquons qu'il est conseillé, lorsque c'est possible, de concevoir des murs plus performants que ce que la législation impose.

Le critère H compare aussi la déperdition obtenue sur base du résultat des simulations, à la déperdition théorique (voir le chapitre précédent) et annonce un risque si la déperdition calculée de façon dynamique est plus élevée que celles issues d'un calcul statique.

### 4.3.2 CONDENSATION

Dans l'outil ISOLIN, le risque de condensation est évalué par une analyse de l'humidité relative atteinte à un endroit précis de la paroi ou de la teneur en eau atteinte par une couche de matériau. Quatre critères ont été définis :

- Le critère C1 vérifie que l'humidité relative [%] dans l'isolant, à 1 cm de l'interface avec la brique, ne dépasse, à aucun moment de l'année, les valeurs définies ;
- Le critère C2 vérifie que l'humidité relative [%] dans l'isolant, juste sous l'éventuelle membrane, ou sous la finition intérieure s'il n'y a pas de membrane, ne dépasse pas les valeurs définies ;
- Le critère C3 vérifie que la teneur en eau [kg/m] de la brique du côté intérieur ne dépasse pas les valeurs définies ;
- Le critère C4 vérifie que la teneur en eau d'ensemble [%mass] de l'isolant ne dépasse pas les valeurs [kg/m<sup>3</sup>] définies.

Ce dernier critère (C4) permet essentiellement de vérifier une limite communément admise pour matériaux dérivés du bois ou contenant des fibres végétales : la teneur en eau doit rester inférieure à 20 % de la masse volumique sèche. Pour l'outil ISOLIN, ce critère n'est donc, en principe, applicable qu'aux fibres de cellulose (CEL). Remarquons que celles-ci n'atteignent une telle teneur en eau que pour une humidité relative de l'ordre de 90 et 90%, alors que pour le silicate de calcium et le chaux-chaux l'humidité relative correspondante est atteinte plutôt de l'ordre de 98 et 98% (voir courbe de rétention d'eau)

Il est important de rappeler que l'outil ISOLIN identifie le risque du point de vue des condensations internes par diffusion, ce, t ce à n'importe quel moment de l'année. Il faut toujours veiller à la qualité de mise en œuvre, car si elle est imparfaite, la difficulté est alors de connaître le degré d'imperfection pour donner des valeurs aux paramètres représentant la situation telle qu'elle a été mise en œuvre (« jonctions entre panneaux ou entre deux feuilles de membrane parfaite » e » ; « membrane percée, mais par quel trou ? » ; etc.).

Les risques de condensations internes par convection, qui ne sont pas modélisés dans l'outil ISOLIN, demandent aussi de connaître le degré d'imperfection de la mise en œuvre, et doivent ainsi être modélisés au cas par cas avec un logiciel à 2 voire 3 dimensions. Ainsi, il est toujours conseillé de placer une membrane faiblement étanche à la vapeur (pex E1 ou DB) sur des isolants ouverts au passage de l'air (pex laine minérale, fibre de cellulose, fibres de bois...). Cette membrane sert alors à empêcher les infiltrations d'air dans et à travers la paroi. Le cas correspondant (avec la membrane) doit alors aussi être validé grâce à l'outil ISOLIN.

Pour les condensations superficielles, il est préférable d'utiliser un logiciel calculant l'ambiance intérieure sur base des parois et des conditions extérieures (dans l'outil ISOLIN, le climat est donné en entrée des simulations ce qui fausse l'évaluation de celui-ci). Ce type de logiciel demande de modéliser une zone complète d'un bâtiment (mur, toit, sol, parois opaques et parois vitrées...) et les résultats ne sont alors valables que dans ce cas précis.

### 4.3.3 ACCUMULATION D'HUMIDITÉ

Pour éviter des problèmes d'humidité et de dégradation de la paroi rénovée à plus long terme, il faut vérifier qu'elle ne présente pas une accumulation d'humidité résiduelle d'année en année. L'accumulation est ici exprimée par l'augmentation de la teneur en eau pendant l'année analysée, en pourcentage de la teneur en eau moyenne de cette année. Ainsi :

- **Le critère A1** vérifie l'augmentation de la teneur en eau totale de la paroi [%] ;
- **Le critère A2** vérifie l'accumulation dans les briques du côté extérieur du mur [%] ;
- **Le critère A3** vérifie l'accumulation dans les briques du côté intérieur du mur [%] ;
- **Le critère A4** vérifie l'accumulation dans la couche d'isolant [%].

Par défaut, les valeurs recommandées ont été fixées à 2 % et les valeurs limites à 5 % d'accumulation. L'interprétation de ces résultats est délicate. En effet, si un risque est annoncé, rien n'est dit sur l'évolution de ce risque dans le temps (va-t-il s'aggraver, ou s'atténuer ?).

Remarquons que c'est principalement pour éviter d'avoir systématiquement une alerte au niveau de l'accumulation pour les briques peu absorbantes (C et D) que la période de simulation a été prolongée pour celles-ci (respectivement à 10ans et 20ans, au lieu de 3ans). Pour ces briques, il y a une accumulation pendant une période relativement longue, mais un équilibre hydrique s'installe en général après cette période.

#### 4.3.4 GEL

Le risque de gel est influencé par de nombreux paramètres, tant au niveau des conditions climatiques (température minimale atteinte à l'extérieur, vitesse de refroidissement et de réchauffement, durée de la période de gel) qu'au niveau du matériau. Le risque est lié au taux de saturation dans les matériaux avant le gel et donc à leur caractéristique de rétention d'eau et à leurs paramètres de transport de vapeur et d'eau liquide (absorption et redistribution), à leur module d'élasticité, à leur porosité (distribution et géométrie)... La définition d'un critère unique n'est donc pas aisée.

On peut néanmoins caractériser le comportement au gel des matériaux par leur « taux critique », noté  $T_c$ , qui est la teneur en eau à partir de laquelle la chute de module d'élasticité dynamique (MED) devient critique. Quand le taux critique est inférieur à la teneur en eau à la saturation libre ( $w_f$ ), le matériau faiblement résistant au gel. Il est assez rare de disposer des valeurs correspondantes.

Dans l'outil ISOLIN, **le critère F1** se base sur les niveaux de température et d'humidité atteints **à 1 cm sous la face apparente de la brique située du côté extérieur**. Les valeurs recommandées et les valeurs limites fixent les valeurs de température et d'humidité qui ne peuvent être rencontrées simultanément, ainsi que la durée qui rend cette combinaison de température et d'humidité dommageable. Ces valeurs doivent être adaptées si des informations plus précises sur la brique sont disponibles.

#### 4.3.5 CONFORT

En parallèle d'une amélioration de la performance énergétique, l'amélioration des conditions de confort devrait être l'objectif principal des concepteurs. Le critère T défini ici ne prétend pas donner d'indication du niveau de confort global atteint après la réalisation du système d'isolation par l'intérieur, ce qui demanderait de considérer le bâtiment dans son ensemble (confort hygrothermique, visuel et respiratoire, modèles multizones).




La température de confort est définie par la moyenne de la température des parois et de la température de l'ambiance intérieure, mais celles-ci ne peuvent pas être trop différentes sous peine d'inconfort dans le voisinage de la paroi. **Le critère T** de l'outil ISOLIN vérifie que cette **différence entre l'ambiance et la température de la surface intérieure** reste suffisamment faible. Par défaut, la valeur recommandée est fixée à 2 °C mais peut être adaptée selon la situation. Il n'y a pas de valeur limite, les parois qui ne répondent pas au critère H sont donc considérées comme « à risque » (pas de rejet lié à ce critère).

Remarquons qu'un mur qui répond positivement au critère H, et donc à la réglementation en termes de performance thermique, ne présente normalement qu'une différence très faible entre la température de surface et la température de l'air intérieur et répond donc souvent aussi au critère T.

#### 4.3.6 LE CAS EST-IL VALIDE ?

Il est évident qu'une paroi qui présenterait des risques pour tous les critères définis ci-dessus ne sera pas considérée comme valide dans l'outil ISOLIN. À l'inverse, une paroi qui répondrait positivement à tous les critères sera considérée comme valide au sens des hypothèses émises. Rappelons que le concepteur doit s'assurer de la correspondance entre les valeurs utilisées dans les simulations et leur analyse. Les valeurs qui caractérisent le mur existant, les matériaux rajoutés et les conditions climatiques. La mise en œuvre doit être d'une qualité irréprochable et l'étanchéité à l'air doit être parfaite (pas de flux d'air dans le modèle utilisé).

Qu'en est-il pour les autres cas, quand une partie seulement est « à risque » ? Combiner des pommes et des poires est un exercice peu réaliste, mais l'outil ISOLIN donne toutefois un résultat d'ensemble pour chaque cas :

-  – POSITIF : Signifie que le système d'isolation par l'intérieur est considéré comme valide au sens des hypothèses émises. Ce ne sera le cas que si la paroi analysée n'a reçu de réponse négative à aucun des critères, et que 2 critères au maximum annoncent un risque ;
-  – RISQUE : Signifie que le système d'isolation par l'intérieur présente un risque. Ce sera le cas si 2, 3 ou 4 critères annoncent un risque, et que la paroi analysée n'a reçu de réponse négative à aucun des critères ;
-  – NEGATIF : Signifie que le système d'isolation par l'intérieur correspondant doit être rejeté. C'est le cas si la paroi analysée a reçu une réponse négative à au moins un des critères, ou que 5 critères ou plus annoncent un risque.

Le résultat de ce dernier critère est repris tant sur la feuille « Results » de l'outil ISOLIN, avec le résultat de l'ensemble des critères, que sur la feuille « Wall » qui reprend l'ensemble des paramètres qui caractérisent les parois analysées. En cas de rejet, il est conseillé de faire varier les paramètres (revêtement de surface, type de membrane) qui semblent les plus critiques pour mettre en évidence ceux qui conditionnent ce résultat. Une analyse numérique complète peut aussi être réalisée sur base de cette analyse avec l'outil ISOLIN pour affiner les résultats et les conclusions qui en découlent.



## 4.4. ANALYSE DES RÉSULTATS

L'outil ISOLIN ne considère pas tous les cas imaginables. Pour les cas étudiés, si l'on utilise les valeurs par défaut proposées pour les différents critères de validation qui viennent d'être définis, on obtient un taux de rejet de 45 %. Ce chapitre analyse l'impact des différents paramètres sur les chances de succès des murs étudiés et permet de dégager des tendances générales. Attention, les tendances proposées ne sont ni exhaustives, ni suffisantes pour faire un choix approprié, et ne permettent pas de se passer d'une analyse au cas par cas (avec l'outil ISOLIN, par exemple).

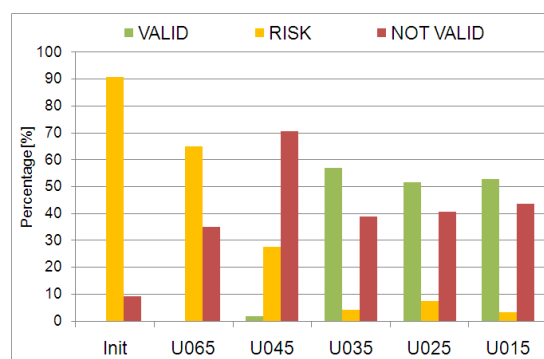
### 4.4.1 VISION D'ENSEMBLE SUR LES RÉSULTATS

L'outil ISOLIN ne considère que les murs massifs en briques pleines correspondant essentiellement à des murs datant d'avant la Première Guerre mondiale (de 30 cm d'épaisseur). Il ne considère donc ni les murs massifs plus épais ou maçonnés totalement ou partiellement en pierre, ni les murs creux avec ou sans isolant dans la coulisse. Le nombre de cas étudiés reste néanmoins important : ~7000 cas.

Si l'on utilise les valeurs par défaut proposées pour les critères de validité, on obtient un taux de validité d'ensemble de 31 %. 24 % des cas sont considérés comme à risque et 45 % sont à rejeter. Les paragraphes suivants, obtenus en utilisant ces mêmes valeurs par défaut, montrent l'influence des paramètres choisis : climat intérieur et extérieur, performance thermique, matériaux des différentes couches et type de membrane ou de revêtement intérieur. Ces résultats doivent être interprétés avec prudence. Ils permettent de dégager des tendances, mais il est apparu que si l'on observe des paramètres pour lesquels une majorité de parois sont refusées, il en reste presque toujours une partie d'entre elles qui est acceptée. Inversement, si certaines conditions sont plutôt favorables, car elles entraînent un grand nombre de cas valides, il restera toujours certaines quantités de parois qui seront à rejeter dans ces conditions. Ainsi, les tendances proposées dans les paragraphes qui suivent ne sont ni exhaustives, ni suffisantes pour faire un choix approprié.

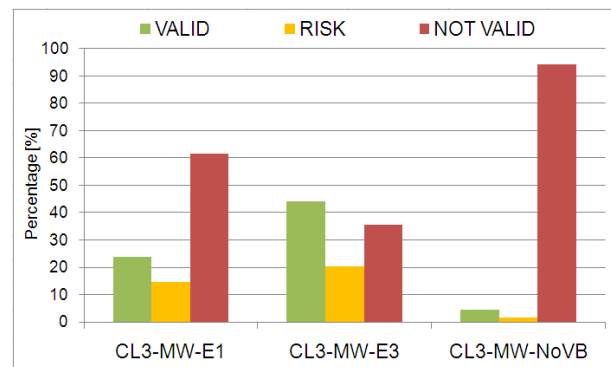
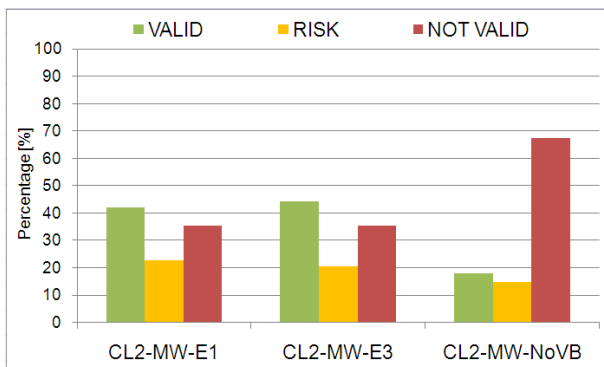
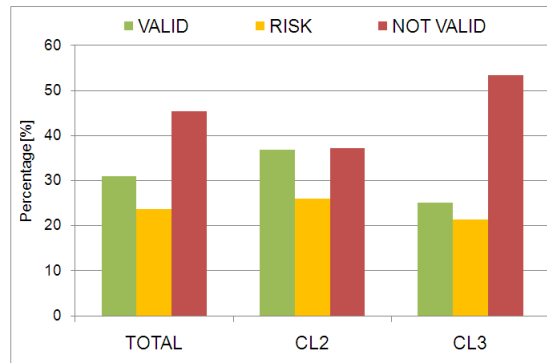
### 4.4.2 IMPACT DE LA PERFORMANCE THERMIQUE

Le graphique ci-dessous montre l'impact qu'ont les critères de performance thermique, critère H, et de chaleur de surface, critère T (les murs moins isolés provoquent des températures de surface à l'intérieur relativement basses, considérées comme à risque par les critères définis). Ces résultats ont un grand impact sur les répartitions entre cas valides et non valides présentés dans les paragraphes suivants. En effet, on remarque que la grande majorité (88 %) des cas à risque se trouve être des cas où la performance thermique est faible (dont le U est plus grand que 0,4 W/m<sup>2</sup>K). On remarque aussi que, pour les autres cas, plus l'isolation des murs est importante, plus le nombre de cas rejetés augmente, bien que les différences ne soient pas significatives. Remarquons enfin que certains cas sans isolant sont aussi à rejeter. Plus de la moitié d'entre eux présente une peinture étanche à l'extérieure et est refusée à cause d'accumulation d'humidité dans la brique (critère A1 à A3).



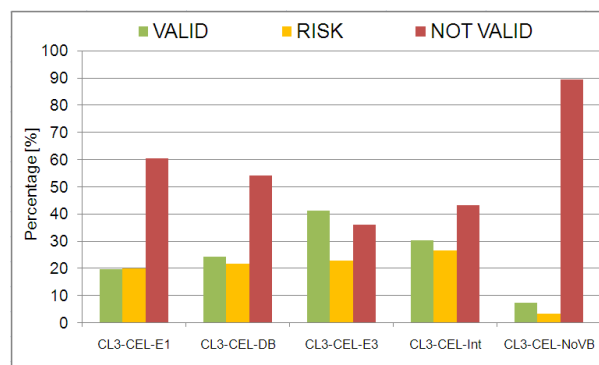
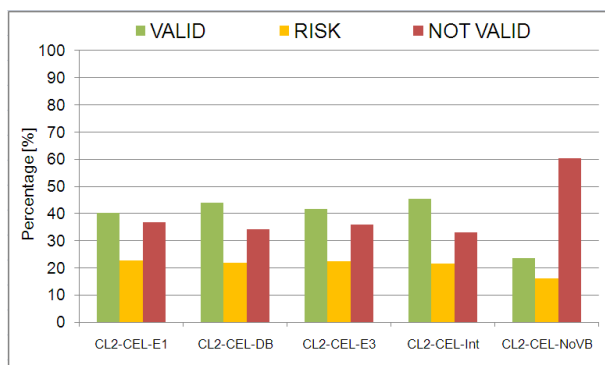
### 4.4.3 IMPACT DU CLIMAT INTÉRIEUR ET DE LA MEMBRANE

Le premier graphique montre les résultats obtenus selon que le climat intérieur est « normal » (CL2) ou « humide » (CL3). On constate évidemment que le CL3 est plus sévère que le CL2, mais les différences semblent moins marquées qu'on aurait pu s'y attendre. Les deux graphiques suivants montrent, en prenant comme exemple les cas où de la laine minérale (MW) est choisie, que la présence et le type de membrane de régulation de la vapeur (NoVB : pas de membrane ; E1 : polyéthylène Sd=2m ; E3: polyéthylène Sd=100m) peut avoir une importance significative sur les résultats, et ce, surtout si le climat intérieur est humide. Malgré cela, les différences de résultats selon la membrane choisie sont moins marquées qu'on aurait pu s'y attendre.



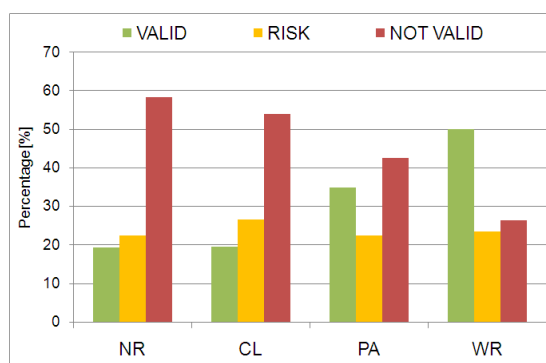
Une tendance générale se confirme, il faut être particulièrement attentif au comportement hygrothermique de la paroi si l'on est dans le cas d'un climat intérieur humide. Pour un isolant très perméable à la vapeur et peu hygroscopique comme la laine minérale, il est important de placer une membrane, même relativement ouverte à la vapeur.

Pour les cas utilisant de la cellulose (CEL), deux membranes supplémentaires peuvent être comparées (DB : membrane intelligente Sdmoyen~2m ; INT : membrane intelligente Sdmoyen~10m). Les graphiques ci-dessous prouvent aussi qu'il est important de placer une membrane (surtout pour un climat intérieur humide), bien que les différences de résultats en termes de validité d'ensemble sont toutefois aussi moins marquées qu'on aurait pu s'y attendre. On peut voir que la cellulose réagit légèrement mieux sans membrane grâce à son volant hygroscopique. De plus, certains cas, non valide avec une membrane classique (E1) le devienne avec une membrane intelligente dont le Sd moyen est très proche (DB), ce qui confirme l'intérêt de cette propriété de perméabilité variable. Rappelons encore que l'importance de la qualité de la mise en œuvre et le fait que la membrane de régulation de la vapeur joue aussi un rôle au niveau de l'étanchéité à l'air (qui n'est pas considérée dans les calculs utilisés par l'outil ISOLIN).



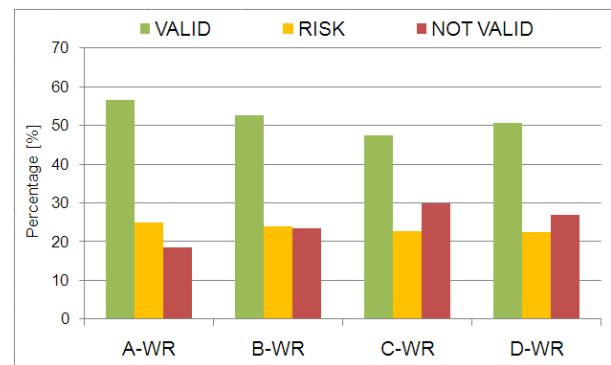
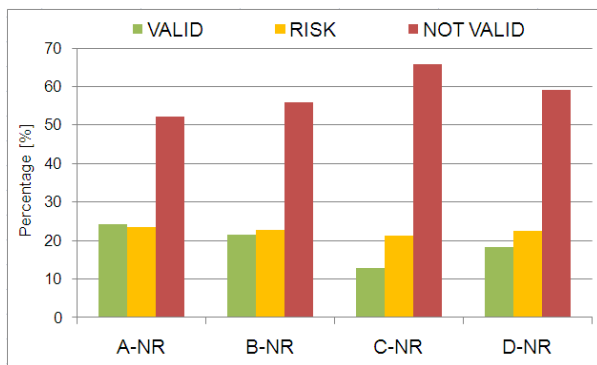
#### 4.4.4 IMPACT DU REVÊTEMENT EXTÉRIEUR ET DU TYPE DE BRIQUE

Le premier graphique montre les résultats d'ensemble selon le type de revêtement extérieur qui est appliqué sur la paroi. Il apparaît clairement que les parois non revêtues (NR) ont un taux de rejet plus élevé que les autres et que l'application d'un hydrofuge (WR) permet d'augmenter considérablement le nombre de cas valides (mais l'hydrofuge n'a qu'une durée de vie limitée). Ces tendances sont renforcées pour les cas orientés au SW.



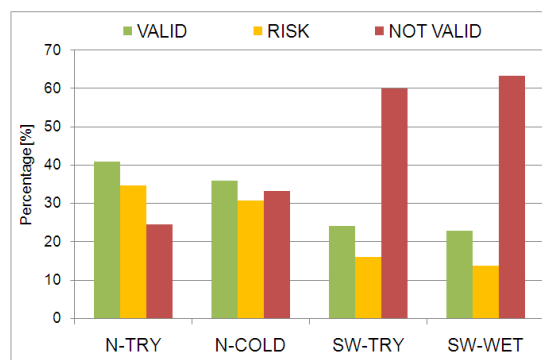
Deux remarques importantes s'imposent concernant les cas avec enduit (CL) et peinture (PA). L'enduit semble ici ne pas avoir d'effet significatif sur la protection de la façade, alors que cela ne correspond vraisemblablement pas à la réalité. Insistons sur la diversité des propriétés que peuvent avoir les enduits et sur le manque de valeurs de référence pour ceux-ci, notamment en termes de transfert d'eau liquide. L'application d'une couche de peinture ne semble ici ne pas être trop défavorable à un comportement acceptable de la paroi, néanmoins, ce comportement n'est obtenu que ces peintures ont un comportement parfait (parfaitement étanche à l'eau et à la vapeur) comme cela a été modélisé. Il est malheureusement difficile de garantir que ces propriétés soient durables dans le temps.

Les graphiques suivants montrent que les briques peu absorbantes (C) et très peu absorbantes (D) ont un taux de rejet plus important que les deux autres (A : très absorbante ; B : moyenne). Étonnamment, la brique C apparaît comme plus critique que la brique D. Rappelons que le caractère absorbant d'un matériau (coefficient d'absorption) est associé tant à son absorption d'eau liquide en tant que telle (devrait être faible pour éviter la pénétration des pluies battantes), qu'à sa faculté de redistribuer l'humidité présente dans ses pores (qui devrait être élevée pour éviter des problèmes d'accumulation locale d'humidité et le transfert vers les surfaces d'évaporation). Ces deux phénomènes ont donc effets contradictoires, ce qui explique pourquoi la brique C apparaît comme étant globalement plus risquée.

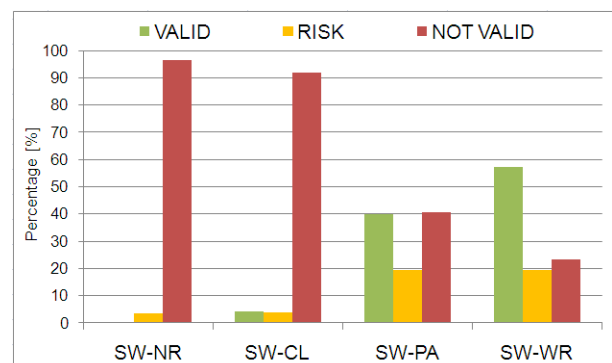
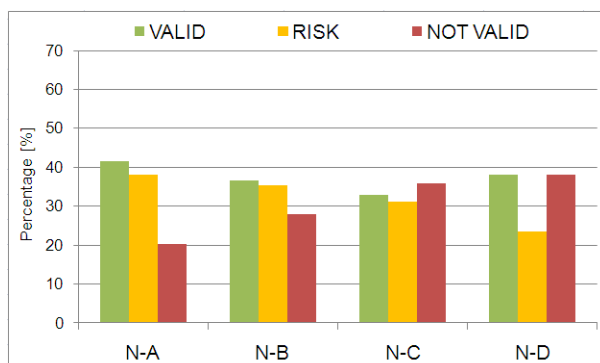


#### 4.4.5 IMPACT DU CLIMAT EXTÉRIEUR

Le graphique ci-dessous montre les résultats d'ensemble obtenus selon l'orientation et le climat extérieur choisis (N-TRY, N-COLD, SW-TRY, SW-WET). Il apparaît clairement que l'orientation sud-ouest (SW) est plus sévère que l'orientation nord (N). Pour l'orientation SW, il n'y aurait que 25 % des cas étudiés valides et près de 60 % de refus. Les différences entre un climat moyen de référence (TRY) et un climat ayant des périodes extrêmes (COLD : froid ; WET : pluvieux) sont par contre relativement faibles. Remarquons encore que les cas valides pour une orientation ne sont pas toujours les mêmes que pour l'autre, et qu'il ne faut donc pas utiliser le climat SW systématiquement sous prétexte qu'il serait plus sécuritaire.

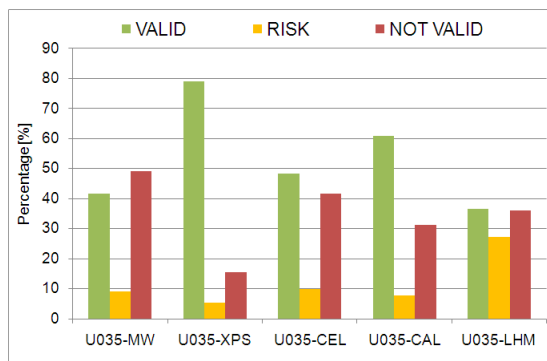


On peut affiner l'analyse de l'influence du climat extérieur en montrant par exemple que l'influence du type de brique n'est pas la même pour les murs orientés au N qu'au SW. Ci-dessous, l'image de gauche montre que pour l'orientation N, les briques très absorbantes sont globalement plus favorables que les briques peu absorbantes. L'influence du type de brique est par contre beaucoup plus faible au SW, en effet, les deux phénomènes aux effets contradictoires relevés au paragraphe 4.4.3, s'atténuent mutuellement au SW (peu de pluie au nord). L'image de droite montre par contre que le revêtement extérieur à une grande influence sur le comportement des murs au SW. Pour cette orientation, il est donc fortement conseillé de protéger le mur des pluies battantes (par exemple en appliquant un hydrofuge ou un bardage).



#### 4.4.6 IMPACT DU MATÉRIAU ISOLANT UTILISÉ ET CRITÈRE PRÉPONDÉRANT

Pour les raisons présentées au point 4.4.2, et parce que tous les isolants n'ont pas été analysés avec les mêmes variantes de performance thermique, le graphique suivant présente les résultats obtenus pour les 5 isolants (MW : laine minérale ; XPS : polystyrène extrudé ; CEL : cellulose ; CAL : silicate de calcium, LHM : chaux-chanvre), dans le cas où la valeur U est 0,35 W/m<sup>2</sup>K.



Analysons en détail ces résultats :

- Pour MW, 94 % des cas rejetés doivent l'être (notamment) à cause d'un risque de condensation à l'interface entre la brique et l'isolant (critère C1). Le reste correspond à des murs peints, rejetés à cause d'un risque d'accumulation d'humidité dans la brique (critères A1 à A3). Remarquons qu'un tiers seulement des cas refusés sont orientés au nord. Ils sont tous refusés à cause du critère C1. Parmi ceux-ci, 80 % sont sans membrane et les autres sont avec une membrane E1. Remarquons aussi que tous les cas de murs présentant de la laine minérale refusés, alors qu'ils avaient une membrane E3 correspondent à des murs orientés au SW, sans revêtement extérieur ou avec un simple enduit ;
- Pour XPS, tous les murs rejetés sont orientés au SW et qu'ils sont tous sans revêtement extérieur (sauf un sur près de 200). L'ensemble de ces cas est refusé à cause du critère C1. Rappelons ici que la perméabilité à la vapeur du matériau considérée dans les calculs ne peut être atteinte qu'à travers une mise en œuvre parfaite (en rajoutant par exemple des bandes adhésives à la jonction entre les plaques) ;
- Pour CEL, comme pour MW, un tiers des cas rejetés sont orientés au nord. Parmi ceux-ci, plus de 40 % correspondent à des murs présentant une peinture étanche à l'extérieur, et les refus sont alors en majorité dus à de l'accumulation d'humidité (critères A1 à A3). Pour les murs orientés au SW, 74 % des cas ne présentent pas de revêtement extérieur ou ont un simple enduit. Leur rejet est dû au critère C1 pour 97 % d'entre eux ;
- L'isolant CAL affiche de très bons résultats. Moins d'un tiers des murs rejetés sont orientés au N (ceux-ci subissent tous un climat COLD et ont des briques C ou D). 70 % des cas refusés le sont à cause du critère C1 (dont 30 % présentent aussi un risque de condensation sous l'enduit intérieur, critère C2). Il est intéressant de remarquer que pour cet isolant, les briques B sont les plus risquées (30 % des cas rejetés) et les briques D sont celles qui présentent le moins de risque (20 % des cas rejetés) ;
- Pour LHM, les résultats sont peu attrayants, mais ce matériau est très particulier du point de vue de sa gestion de l'humidité, et les critères pour celui-ci devraient vraisemblablement être adaptés. Il est intéressant de remarquer que tous les murs protégés par un hydrofuge de surface sont valides. De plus, seulement 24 % des murs rejetés sont orientés au nord, et ceux-ci sont tous soumis à un climat intérieur CL3. Les murs orientés au SW sont majoritairement refusés à cause du critère C1, le reste étant des murs peints refusés à cause des critères A1 à A3.

Le critère le plus important est le critère de condensation à l'interface entre la brique et l'isolant (C1) : 75 % des cas rejetés obtiennent un « feu rouge » à ce critère. Parmi ceux-ci, plus du tiers atteignent aussi des valeurs limites dans l'isolant, au voisinage de la brique (critère C2). On peut aussi observer que les cas qui présentent des problèmes d'accumulation d'humidité sont presque tous (99 %) des cas couverts d'une peinture à l'extérieur.

#### 4.4.7 CONCLUSIONS

Les paragraphes qui précèdent démontrent que l'outil développé en parallèle du présent guide peut aider à valider un choix en termes de système d'isolation par l'intérieur. Il faudra néanmoins rester conscient que de nombreuses considérations ne sont pas couvertes par cet outil (analyse du cycle de vie complet du bâtiment, analyse des nœuds constructifs, valeur patrimoniale, notions de santé et de bien-être des occupants...) et s'assurer que les conditions rencontrées en pratique sont identiques à celles qui ont été modélisées.

Les tendances suivantes peuvent être observées :

1. Les cas ayant une performance thermique trop faible sont à déconseiller, à cause des pertes d'énergie et de l'inconfort qu'elles provoquent (parois froides) ;
2. Pour les isolants fortement perméables à la vapeur et de faible densité, comme la cellulose ou la laine minérale, l'utilisation d'une membrane de régulation de la vapeur est vivement conseillée du côté intérieur, surtout pour un climat intérieur humide (les risques sont légèrement plus faibles pour un matériau isolant possédant un volant hygroscopique plus élevé comme la cellulose) ;
3. Pour une perméabilité moyenne équivalente, il est préférable de choisir une membrane à perméabilité variable qui donne de meilleurs résultats ;
4. Malgré un bilan environnemental discutable, le polystyrène extrudé est validé dans de nombreux cas grâce à sa faible perméabilité à la vapeur ;
5. Le silicate de calcaire est particulièrement fiable dans de nombreux cas notamment grâce à son grand pouvoir d'absorption et de redistribution de l'humidité ;
6. Malgré l'excellent bilan environnemental du chaux-chanvre, il semble ne convenir que pour des parois faiblement exposées aux intempéries, en veillant à ce qu'il ne soit pas exposé à un climat intérieur trop humide ;
7. Plus l'isolant ou la membrane sont fermés à la vapeur, plus il est conseillé de protéger le mur des intempéries ;
8. Les parois dont la surface extérieure n'est pas revêtue doivent souvent être rejetées, surtout quand elles sont orientées au sud-ouest ;
9. L'application d'un hydrofuge de surface à l'extérieur améliore, parfois considérablement, le comportement des parois ;
10. Près de 40 % des cas couverts d'une peinture étanche à l'extérieur entraînent des problèmes d'accumulation d'humidité dans la brique, si cette couche étanche ne peut être évitée, il faut s'assurer de la pérennité de son pouvoir d'étanchéité à l'eau et envisager une couche (isolant ou membrane) très peu perméable à la vapeur du côté intérieur ;
11. Une brique faiblement absorbante empêche une absorption trop importante des pluies battantes, mais cette qualité est malheureusement associée à un faible pouvoir de redistribution de l'humidité qu'elle contient vers les surfaces d'évaporation ce qui conduit à un mauvais potentiel de séchage ;
12. Une brique fortement absorbante est un atout considérable pour les parois exposées au nord (moins de pluie), car leur pouvoir de redistribution est élevé ce qui conduit à un bon potentiel de séchage.

## BIBLIOGRAPHIE

### ► Livres

*L'isolation thermique écologique*, Courgey Samuel et Oliva Jean-Pierre, Mens, terre vivante, 2010.

*Matériaux écologiques d'intérieur, Aménagement, finition, décoration*, Mengoni Jean-Claude et Mengoni Manu, Terre vivante, Mens, 2009.

*La conception bioclimatique*, Courgey Samuel et Oliva Jean-Pierre, Mens, terre vivante, 2006, 2008.

*Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*, Liébard Alain, De Herde André, Observ'ER, Paris, 2005.

### ► Travaux de recherche

*RELOSO - Etude pour le renouveau du logement social*, Architecture et Climat (Université catholique de Louvain) et Matriciel, Service Public de Wallonie Département de l'Énergie et du Bâtiment durable, octobre 2009.

*Advanced housing renovation with solar and conservation*, IEA SHC TASK 37, SUBTASK D environmental, impact, assessment, Trachte Sophie, Architecture et Climat, Université catholique de Louvain, 2009.

*Panorama of energy, Energy statistics to support EU policies and solutions*, Eurostat, Statistical books, European Communities, 2009.

*BP Statistical Review of World Energy June 2009*, Energy Academy and Centre for Economic Reform and Transformation, Heriot-Watt University, London, 2009.

*L'application de principes de la maison passive en Région de Bruxelles-Capitale*, Centre d'Etude, de Recherche et d'Action en Architecture asbl (CERAA), Juin 2008.

*Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials*, Evrard Arnaud, Thèse de doctorat en Sciences de l'Ingénieur, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, mai 2008.

*La rénovation énergétique et durable des logements wallons, Analyse du bâti existant et mise en évidence de typologies de logements prioritaires*, Kints Caroline, Architecture et Climat, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 2008.

*Réglementation sur la performance énergétique des bâtiments: du nouveau à Bruxelles et en Wallonie*, Les Dossiers du CSTC - N°4/2008 - Cahier n°1, Bruxelles, 2008.

*Enquête socio-économique générale 2001*, Institut national de Statistiques (INS), Service public fédéral Economie, P.M.E, Classes moyennes et Energie, Direction générale Statistique et Information économique, Bruxelles, 2007.

*Le logement en Belgique, Enquête socio-économique générale 2001*, Monographies, Vanneste Dominique, Thomas Isabelle et Goossens Luc, SPF Economie, P.M.E, Classes moyennes et Energie, Direction générale Statistique et Information économique, Bruxelles, 2007.

*Guide pratique pour la construction et rénovation durables de petits bâtiments*, Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE), Bruxelles, janvier 2007.

*Emissions de gaz à effet de serre en Belgique, Tendances, projections, progrès par rapport à l'objectif de Kyoto*, Commission Nationale Climat, Bruxelles, 2007.

*Enquête sur la qualité de l'habitat en Région Wallonne*, Ministère de la région wallonne (MRW), Direction générale opérationnelle - Aménagement du territoire, Logement, Patrimoine et Energie(DGATLP), Namur, 2007.

*La rénovation et l'énergie, Guide pratique pour les architectes*, sous la dir. de Hauhustaine Jean-Marie et Simon Francy, Université de Liège, Université Catholique de Louvain, Ministère de la Région Wallonne, Février 2006.

*L'isolation thermique par l'intérieur, Techniques pour maîtriser l'énergie*, Merlet Jean-Daniel et Sarre Maryse, Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), Agence française pour la maîtrise de l'énergie, Cahors, 1991.

*L'isolation thermique dans les bâtiments d'habitation existants, Techniques pour maîtriser l'énergie*, Auteurs multiples, Agence française pour la maîtrise de l'énergie, Cahors, 1990.

#### ► Normes:

NBN EN 62-002, Calcul des coefficients de transmission thermique des parois des bâtiments, norme belge, 1987, 2001, 2008.

NBN B 62-002, *Annexe A - Tableaux de valeurs de calcul pour la conductivité thermique des matériaux de construction*, 2008.

NBN EN 12524, *Matériaux et produits pour le bâtiment - Propriétés hygrothermiques - Valeurs utiles tabulées*, 2000.

BS 5250 :2002, Code of practice for control of control of condensation in building, Incorporating Amendment No. 1, British standard, 2002.

DIN 4108-3, Protection thermique et économique d'énergie dans la construction immobilière – Partie 3: Protection contre l'humidité conditionnée par le climat – Exigences et directions pour le calcul et l'exécution, Deutsches Institut für Normung, 2001.

Isolation thermique par l'intérieur selon WTA I : Guide de planification, Fiche 6-4, Association internationale pour la science et la technologie de la maintenance des bâtiments et la préservation du patrimoine (WTA), Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2009.

#### ► Sites Internet

Europa (synthèses de la législation dans l'Union européenne): <http://europa.eu>

Service Public Fédéral Belge: <https://portal.health.fgov.be>

Service fédéral changements climatiques : <http://www.climat.be>

Organisme mondial de la santé (OMS) : <http://www.who.int>

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) : <http://www.ademe.fr>

Habitat santé : <http://www.habitat-sante.org>

Portail de l'énergie en Région wallonne: <http://energie.wallonie.be>

PEB : <http://energie.wallonie.be> > Professionnels - Outils et logiciels > Logiciel PEB

Plate-Forme Maison Passive (Belgique) : <http://www.maisonpassive.be>



Architecture et Climat : <http://www-climat.arch.ucl.ac.be/>

Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement (IBGE) : <http://www.ibgebim.be>

Le Centre Urbain - l'Agence Bruxelloise de l'Energie: <http://www.curbain.be/fr>

Centre scientifique et technique de la construction (CSTC) <http://www.cstc.be>

Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) : <http://www.cstb.fr>

Association pour la certification des matériaux isolants (ACERMI) : <http://acermi.cstb.fr>

Energie + (UCL, Architecture et Climat), Conception et rénovation des bâtiments tertiaires : <http://www.energieplus-lesite.be>

Logiciel WUFI® : <http://www.wufi-pro.com/>

Infolabel.be, Guide des labels pour une consommation responsable : <http://www.infolabel.be>

Base de données Ecosoft : <http://www.ibo.at/de/oekokennzahlen.htm>

Projet LEHR (Low Energy Housing Retrofit) : <http://www.lehr.be>

