

# HYGROBA

Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes



**CAHIER N°0 :**  
**GENERALITES**



MINISTÈRE  
DE L'ÉGALITÉ  
DES TERRITOIRES  
ET DU LOGEMENT

MINISTÈRE  
DE L'ÉCOLOGIE,  
DU DÉVELOPPEMENT  
DURABLE  
ET DE L'ÉNERGIE

# H Y G R O B A

Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes



## Sommaire

1. Objectif des cahiers .....	5
2. Propriétés thermiques et hygriques des matériaux étudiés .....	7
2.1. Matériaux étudiés .....	7
2.2. Caractéristiques thermiques .....	9
2.3. Caractéristiques hygriques .....	14
2.4. Synthèse .....	23
3. Présentation des configurations testées et analysées .....	25
3.1. Description de l'outil de simulation retenu .....	25
3.2. Parois anciennes .....	26
3.3. Solutions d'isolation .....	26
3.4. Conditions climatiques intérieures et extérieures .....	32
3.5. Infiltrations d'humidité .....	33
4. Critères d'analyse .....	35
4.1. Quantité d'eau .....	36
4.2. Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité .....	37
4.3. Condensation interne dans la paroi .....	38
4.4. Inertie thermique de la paroi .....	39
4.5. Résistance thermique de la paroi .....	40
5. Conclusions générales de l'étude .....	41
5.1. L'isolation d'une paroi ancienne impacte plus ou moins fortement son équilibre hygrothermique .....	41
5.2. Les solutions d'isolation par l'extérieur sont les plus performantes .....	41
5.3. Les solutions d'isolation par l'intérieur sont les plus exposées aux risques hygrothermiques .....	42
5.4. Les configurations « perméables à l'humidité » sont à privilégier pour les parois anciennes .....	42
5.5. Des alternatives à l'isolation par l'intérieur sont à envisager .....	42
6. Limites de l'étude .....	43
7. Bibliographie .....	44

# **H Y G R O B A**

Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

## 1. Objectif des cahiers

Les cahiers HYGROBA présentent les résultats d'une étude du comportement hygrothermique de plusieurs parois anciennes, soumises à diverses configurations d'isolation.

Le choix d'isoler ou non, et si oui, de quelle manière, peut être motivé par différentes raisons ou à la lumière de différents critères. On citera sans être exhaustif :

- la répartition des déperditions thermiques du bâtiment,
- l'aspect patrimonial extérieur ou intérieur,
- la perte de place suite à l'isolation,
- les contraintes urbanistiques,
- la facilité de mise en œuvre,
- le coût,
- les risques hygrothermiques.

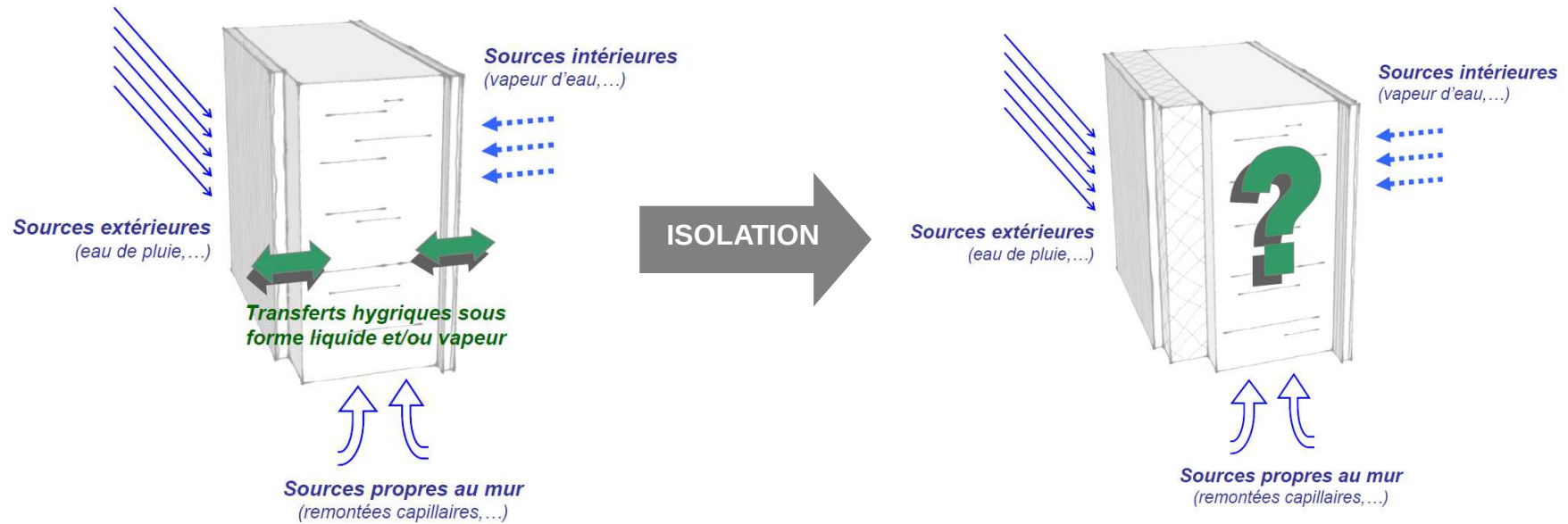
Dans le cas du bâti ancien, ce dernier critère revêt une importance toute particulière.

En effet, d'une manière générale, les parois anciennes sont composées de matériaux dits « sensibles » à l'humidité (terre crue, terre cuite, bois,...), permettant des transferts hygriques (sous forme de vapeur ou sous forme liquide) entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

# H Y G R O B A

## Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

La moindre modification (isolation, enduit,...) apportée à ces parois, soumises à différentes sources d'humidité, est susceptible a priori de modifier la teneur de ces transferts et de perturber un équilibre existant.



Cette considération doit inciter à la prudence lorsqu'un projet de réhabilitation thermique est envisagé.

Dans cette optique, les cahiers HYGROBA permettent une analyse de différentes solutions d'isolation de parois anciennes en fonction des risques hygrothermiques associés.

**Ces cahiers ne se substituent pas à un diagnostic spécifique, qui doit être adapté à la situation de chaque enveloppe et aux particularités qui peuvent être rencontrées (climat extérieur, climat intérieur, orientation,...).**

**Les conclusions ne sont donc rigoureusement valables que pour les conditions qui ont été considérées dans l'étude, en termes de climats intérieur / extérieur ou de propriétés des matériaux (cf.paragraphe 3 du cahier 0).**

## 2. Propriétés thermiques et hygriques des matériaux étudiés

Dans cette étude, l'impact de l'isolation a été évalué sur 4 typologies de parois anciennes différentes :

- Une paroi en terre crue (pisé banché)
- Une paroi en brique de terre cuite (hourdée au mortier de chaux)
- Une paroi en pierre dure (pierre calcaire dure hourdée au mortier de chaux)
- Une paroi en pan de bois et torchis

Sont présentées, dans ce chapitre, les principales caractéristiques thermiques et hygriques des matériaux considérés dans l'étude.

**Bien que ces matériaux ne couvrent pas toute la diversité des mises en œuvre possibles, ils permettent de refléter, en première approche, des gammes de propriétés hygriques variées.**

**Les caractéristiques de ces matériaux sont issues d'une recherche bibliographique (cf paragraphe 7), couplée avec des tests effectués en laboratoire sur certains échantillons de matériaux traditionnels.**

Dans les modèles de simulation utilisés par la suite, des fonctions hygrothermiques plus complexes sont utilisées.

*Exemple : la conductivité thermique donnée ici par une seule valeur, varie en fait dans le modèle en fonction de la teneur en eau du matériau.*

### 2.1. Matériaux étudiés

#### 2.1.1. Matériaux anciens

Les matériaux anciens constitutifs des parois considérées dans l'étude sont les suivants :

- Pisé
- Brique de terre cuite
- Pierre calcaire dure
- Torchis
- Bois
- Mortier de chaux (hydraulique)

### 2.1.2. Isolants et revêtements

Dans les différentes solutions d'isolation traitées dans ces cahiers, sont utilisés plusieurs isolants, revêtements et enduits, listés ci-dessous.

#### Isolants :

- Laine de roche (panneau rigide)
- Ouate de cellulose (insufflée)
- Fibre de bois (panneau rigide)
- Polystyrène expansé (panneau rigide)

#### Revêtements ou enduits :

- Enduit organique
- Enduit chaux
- Enduit ciment
- Plaque de plâtre
- Papier peint vinyle

*Remarque : L'enduit chaux considéré correspond à un enduit à la chaux naturelle, composée majoritairement de chaux aérienne avec des ajouts hydrauliques. Il n'est pas strictement représentatif des enduits utilisés en isolation extérieure à base de chaux.*

### 2.1.3. Membranes gérant l'apport de vapeur

Cette étude utilise 2 types de membranes différentes :

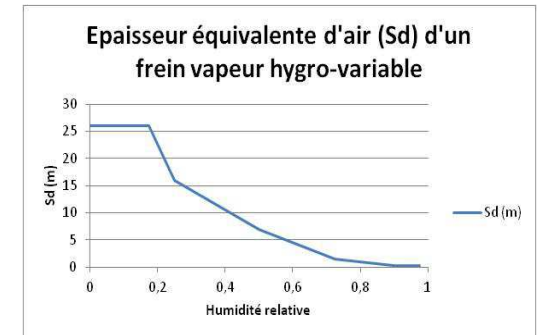
- Un frein-vapeur classique ( $S_d=20$  m)
- Un frein-vapeur hygrovariable ( $S_d$  variable)

Le coefficient  $S_d$  (exprimé en mètres) qualifie l'étanchéité à la vapeur d'eau d'un matériau et en l'occurrence, ici, du frein-vapeur. Il donne une épaisseur équivalente d'air en termes d'étanchéité à la vapeur.

Exemple : Un frein-vapeur avec un  $S_d = 20$  m est aussi étanche à la vapeur qu'une épaisseur d'air de 20 mètres.

Le frein-vapeur intelligent a la particularité de posséder un  $S_d$  variable selon les situations :

- En cas de faible humidité, le frein-vapeur est **très étanche à la vapeur** et empêche donc à l'humidité de pénétrer dans le mur.
- En cas de forte humidité, le frein-vapeur devient alors **très « ouvert »** à la vapeur d'eau permettant à celle-ci de mieux circuler vers le côté intérieur de la paroi.





## 2.2. Caractéristiques thermiques

Les caractéristiques thermiques de base des matériaux sont au nombre de trois :

La conductivité thermique  $\lambda$  (W/m.K) : elle caractérise la capacité du matériau à se laisser traverser par la chaleur. Plus un matériau est isolant, plus sa conductivité thermique est faible.

La masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ ) : il s'agit de la masse du matériau par unité de volume. Plus un matériau est dit lourd (ex : maçonneries...) plus sa masse volumique est élevée. Les matériaux apportant de l'inertie thermique possèdent, en général, une forte masse volumique.

La capacité thermique massique  $C_p$  (J/kg.K) : elle caractérise l'énergie nécessaire pour élever 1kg de matériau de 1°C. Les matériaux apportant de l'inertie possèdent, en général, une forte capacité thermique massique.

L'inertie thermique : il s'agit de la capacité d'un matériau à retarder dans le temps et à atténuer en amplitude une onde de chaleur traversant un mur. Elle est caractérisée par deux grandeurs, la diffusivité thermique et la capacité thermique, qui se calculent à l'aide des trois caractéristiques thermiques présentées plus haut (à savoir la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité thermique massique) et dont les définitions sont les suivantes :

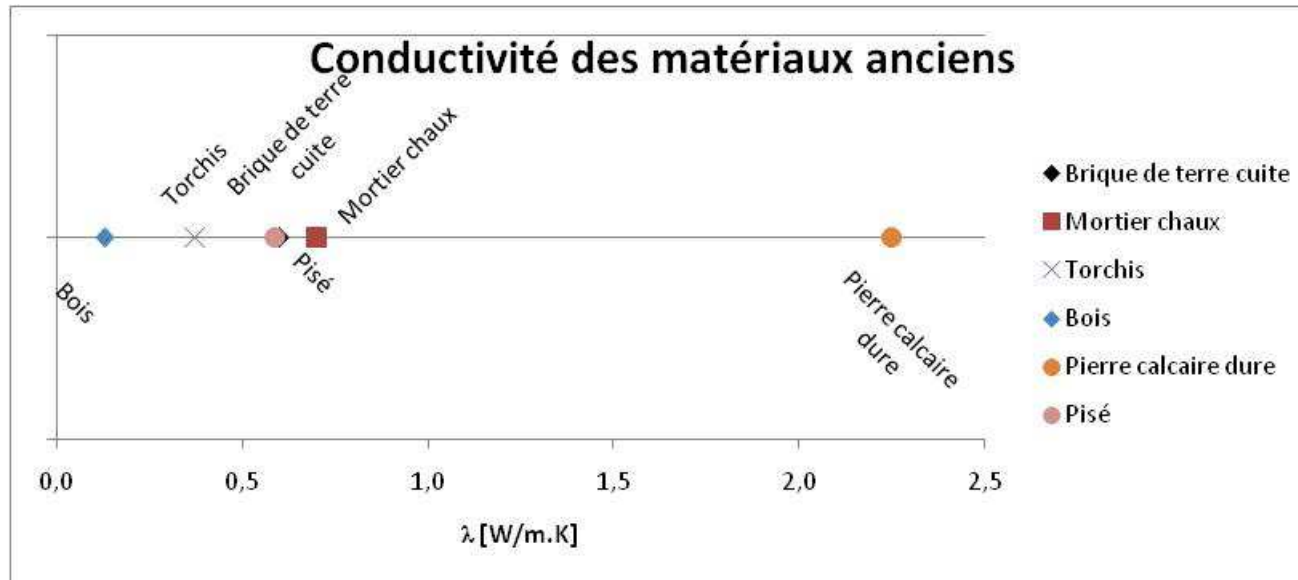
- la diffusivité thermique exprime la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur de part et d'autre de son volume. Plus la diffusivité est importante, plus le matériau transmet rapidement la chaleur.
- la capacité thermique est la capacité d'un volume de matériau à stocker de la chaleur. Plus la capacité thermique est grande, plus le matériau peut stocker de la chaleur.

Un matériau à très forte inertie est donc un matériau dont la diffusivité thermique est faible et la capacité thermique élevée.

Il est à noter que l'inertie d'une paroi n'est pas, à proprement parler, bonne ou mauvaise, mais adaptée ou non à une situation. Dans le cas d'un bâtiment à occupation intermittente (résidence secondaire par exemple), une trop forte inertie n'est pas souhaitable puisque les murs auraient à peine le temps de se réchauffer le temps de l'occupation.

### 2.2.1. Conductivité thermique

Le graphique suivant montre la répartition des matériaux anciens selon leur conductivité thermique :



Remarque : Les valeurs correspondent aux conductivités thermiques des matériaux secs (pour une teneur en eau du matériau nulle).

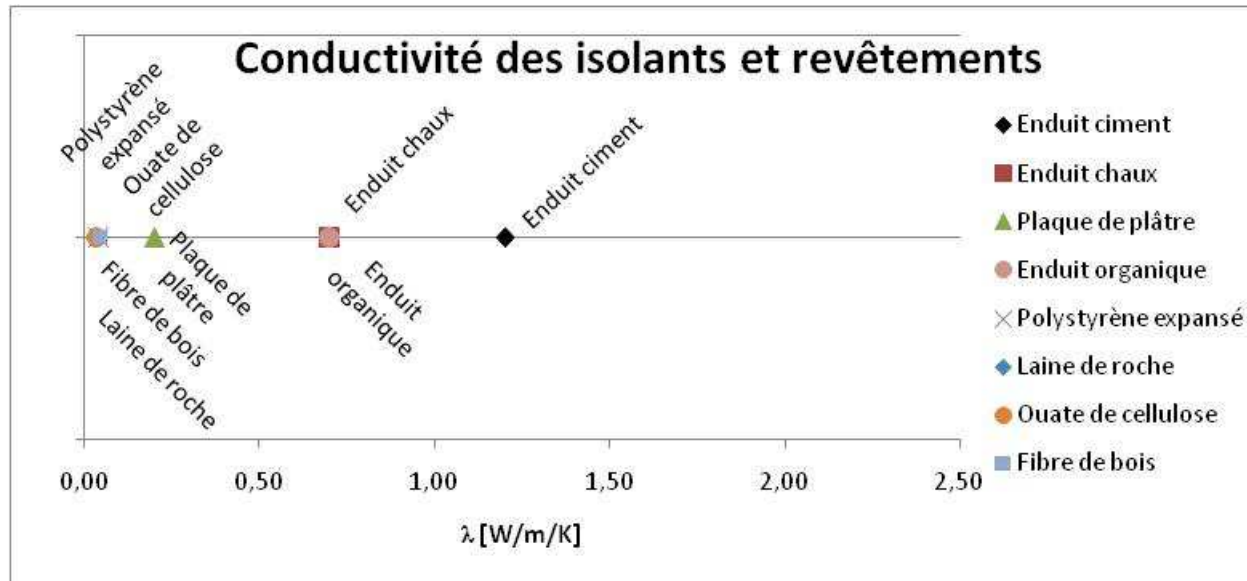
En termes de conductivité thermique, on peut classer les matériaux anciens en 3 catégories :

Peu conducteur / Très isolant	Moyennement conducteur	Très conducteur / Peu isolant
-	Bois Brique de terre cuite Pisé Mortier chaux Torchis	Pierre calcaire dure

# H Y G R O B A

## Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

Le graphique suivant montre la répartition des isolants et revêtements selon leur conductivité thermique :



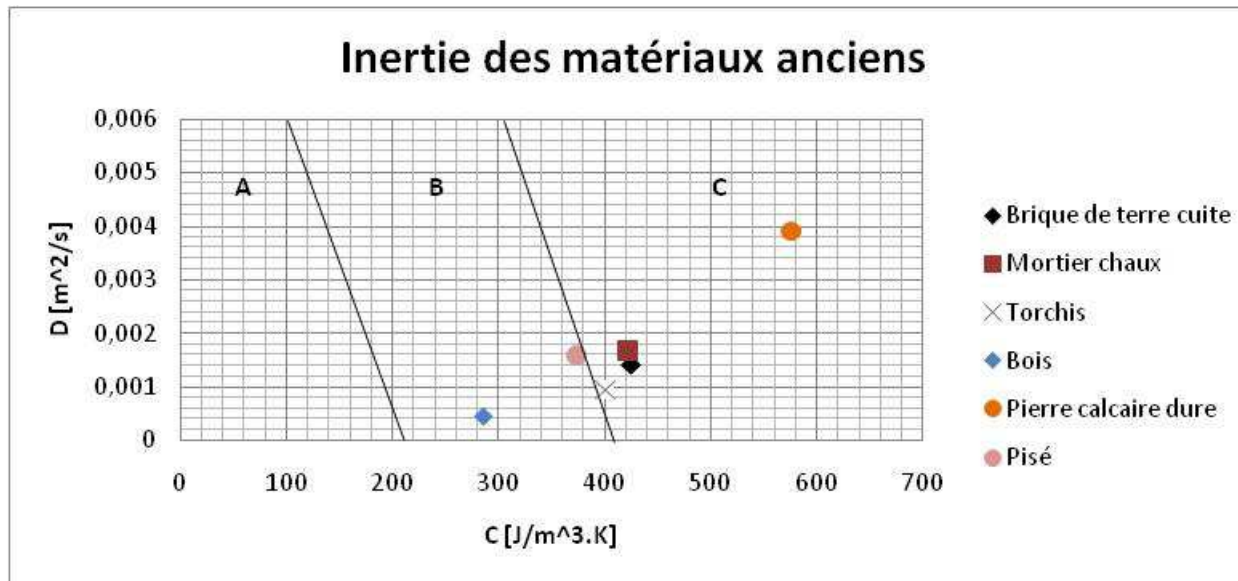
*Remarque : Les valeurs correspondent aux conductivités thermiques des matériaux secs (pour une teneur en eau du matériau nulle).*

En termes de conductivité thermique, on peut classer les isolants et revêtements en 3 catégories :

Peu conducteur / Très isolant	Moyennement conducteur	Très conducteur / Peu isolant
Polystyrène expansé Fibre de bois Laine de roche Ouate de cellulose	Plaque de plâtre Enduit chaux Enduit organique Enduit ciment	-

### 2.2.2. Inertie thermique

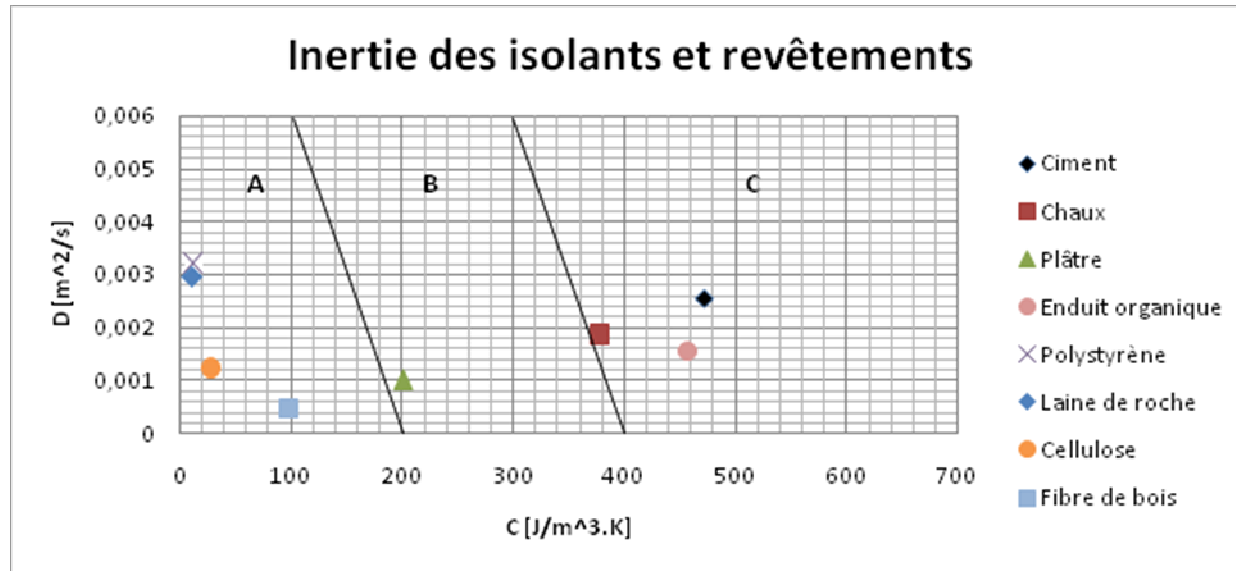
Le graphique suivant montre la répartition des matériaux anciens selon leur diffusivité et leur capacité thermique (les matériaux situés dans la zone A disposent d'une inertie faible, ceux dans la zone B, d'une inertie moyenne et ceux dans la zone C, d'une inertie élevée) :



En termes d'inertie, on peut classer les matériaux anciens en 3 catégories :

Inertie faible	Inertie moyenne	Inertie élevée
-	Pisé Bois	Pierre calcaire dure Mortier chaux Brique de terre cuite Torchis

Le graphique suivant montre la répartition des isolants et revêtements selon leur diffusivité et leur capacité thermique (les matériaux situés dans la zone A disposent d'une inertie faible, ceux dans la zone B, d'une inertie moyenne et ceux dans la zone C, d'une inertie élevée) :



En termes d'inertie, on peut classer les isolants et revêtements en 3 catégories :

Inertie faible	Inertie moyenne	Inertie élevée
Polystyrène expansé Fibre de bois Laine de roche Ouate de cellulose	Plaque de plâtre	Enduit ciment Enduit chaux Enduit organique

## 2.3. Caractéristiques hygriques

Les caractéristiques hygriques principales sont au nombre de trois :

La teneur en eau de référence  $W_{80}$  ( $\text{kg/m}^3$ ) : il s'agit de la teneur en eau d'équilibre du matériau, lorsqu'il est maintenu dans une ambiance ayant une humidité relative de 80%. Cette valeur constitue un bon moyen d'évaluer le caractère hygroscopique du matériau.

L'hygroscopicité est la capacité du matériau à pouvoir stocker de l'eau en son sein, lorsqu'il est mis en contact avec de l'air humide. Ceci est la résultante d'un phénomène physique (dit de condensation capillaire) qui fait que la vapeur d'eau contenue dans l'air peut se condenser dans les micropores des matériaux. Ce phénomène dépend de l'importance de la microporosité et de l'humidité relative de l'air. Un matériau faiblement hygroscopique, compte tenu de la nature grossière de sa porosité ne présente pas de capacité à provoquer la condensation de la vapeur d'eau de l'air, même si cet air est très humide.

Concrètement, plus un matériau est hygroscopique, plus son  $W_{80}$  est élevé. Des matériaux ayant des pores très fins favorisent la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air ce qui augmente leur  $W_{80}$ .

Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau  $\mu$  (-) et l'épaisseur de lame d'air équivalente ( $S_d$  en m) :

Le premier caractérise la capacité du matériau à empêcher son franchissement par la vapeur d'eau. Plus un matériau est étanche à la vapeur d'eau, plus le  $\mu$  est élevé. Par convention, on considère que l'air immobile possède un coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau  $\mu = 1$ . Un matériau peu résistant à la diffusion de vapeur d'eau est parfois également qualifié de « perspirant ».

En pratique, l'épaisseur de lame d'air équivalente ( $S_d$  en m) remplace le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur ( $\mu$  sans unité). Ces deux grandeurs sont reliées par la relation suivante :

**$S_d = \mu * e$**  où  $e$  est l'épaisseur (en mètres) du matériau en question.

Le  $S_d$  rend bien mieux compte de la capacité du matériau mis en œuvre à se laisser traverser par la vapeur, puisqu'il tient compte de l'épaisseur de ce dernier. Il est également plus simple à appréhender : 1 cm d'un matériau de  $\mu=10$  s'oppose au passage de la vapeur d'eau comme 10 cm d'air.

Ainsi, un matériau disposant d'un  $\mu$  élevé mais mis en œuvre en faible épaisseur peut éventuellement aussi bien résister au passage de la vapeur d'eau qu'un matériau disposant d'un  $\mu$  plus faible mais mis en œuvre en épaisseur plus importante. C'est

# H Y G R O B A

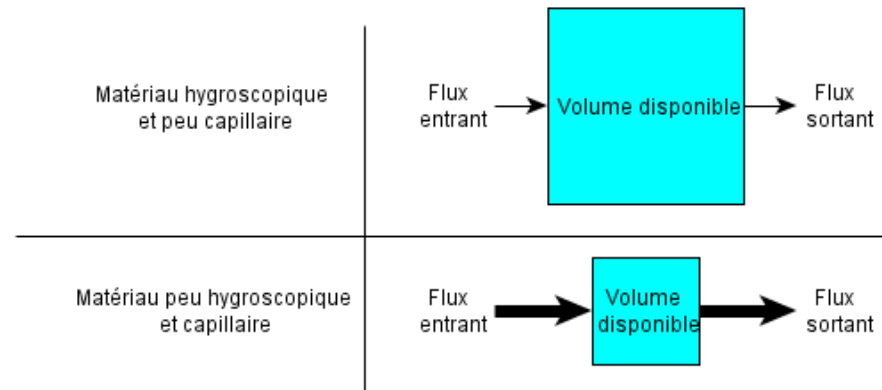
## Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

la raison pour laquelle le classement par coefficient de résistance à la diffusion de vapeur peut différer de celui par épaisseur équivalente d'air.

Le coefficient d'absorption liquide  $A$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$ ) : il caractérise la capacité du matériau à absorber de l'eau liquide par capillarité, c'est-à-dire lorsqu'il est mis en contact avec un plan d'eau. Plus un matériau est capillaire, plus son coefficient  $A$  est élevé. Ce paramètre est, lui aussi, fonction de la nature pométrique du matériau.

*Remarque : Un matériau peut être à la fois très capillaire et hygroscopique ou peu capillaire et très hygroscopique.*

D'un point de vue macroscopique, l'hygroscopicité caractérise en effet le volume disponible pour stocker de l'eau liquide, tandis que la capillarité caractérise la quantité de flux entrant et la quantité de flux sortant et donc le volume d'eau mobilisé lorsque le matériau est placé à son contact.

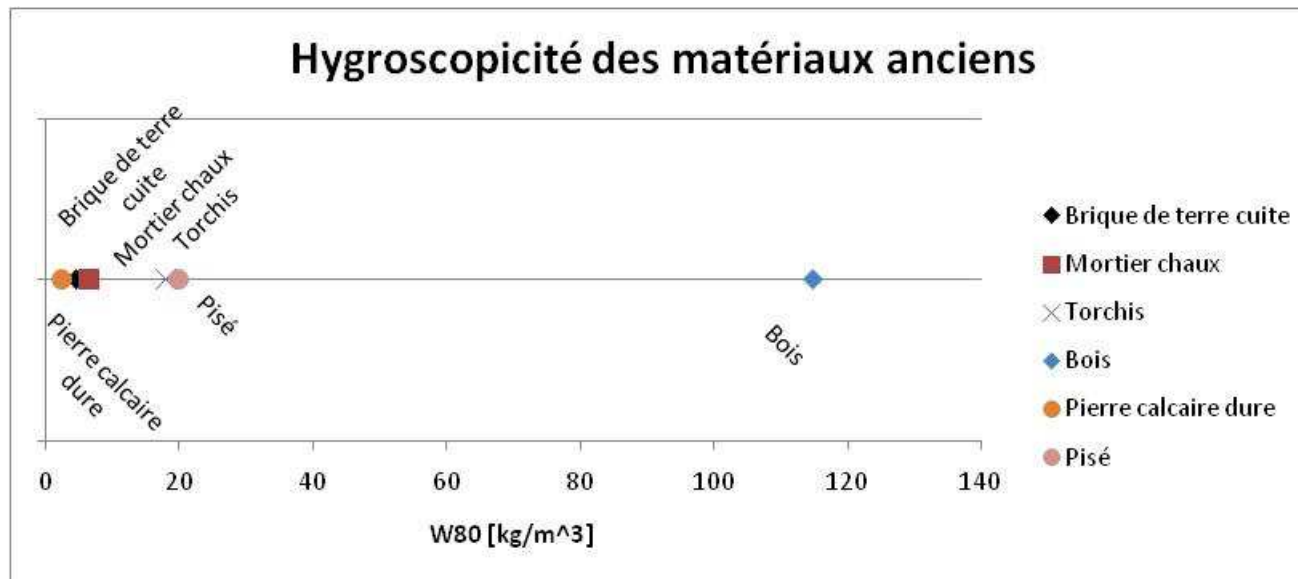


Au niveau microscopique, d'autres phénomènes plus complexes interviennent, liés à la nature pométrique du matériau.

### 2.3.1. Hygroscopicité

L'hygroscopicité est la capacité du matériau à pouvoir stocker de l'eau en son sein, lorsqu'il est placé dans de l'air humide. Elle est caractérisée par la teneur en eau de référence  $W_{80}$ .

Le graphique suivant montre la répartition des matériaux anciens selon leur hygroscopicité :



En termes d'hygroscopicité, on peut classer les matériaux anciens en 3 catégories :

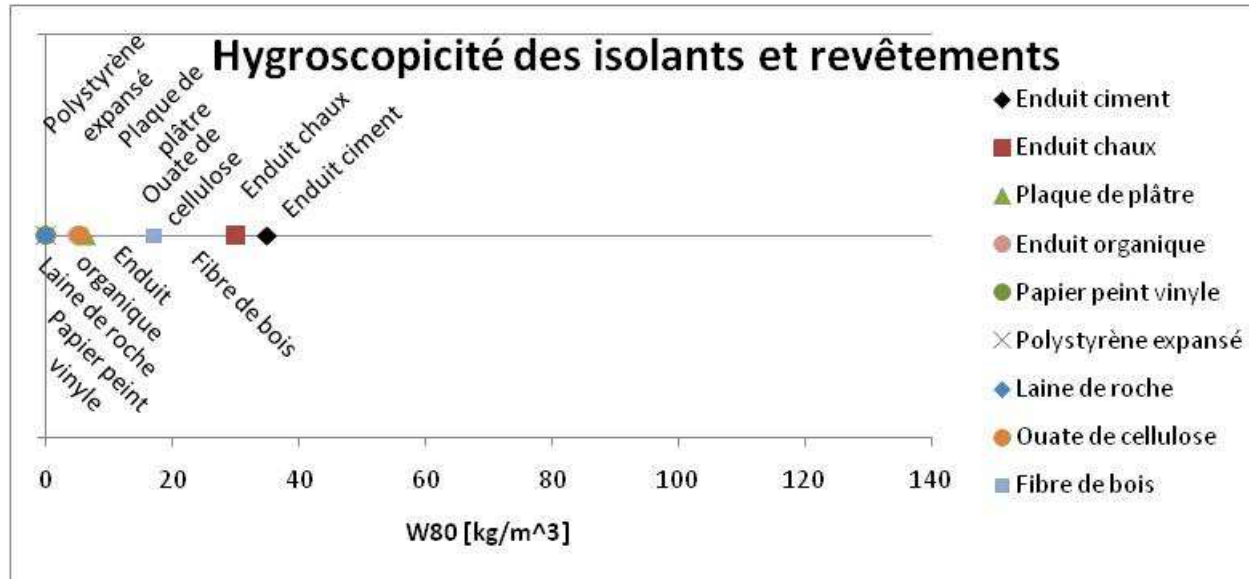
Peu hygroscopique	Hygroscopique	Très hygroscopique
Pierre calcaire dure	Mortier chaux Brique de terre cuite	Pisé Bois



# H Y G R O B A

## Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

Le graphique suivant montre la répartition des isolants et des revêtements selon leur hygroscopicité :



En termes d'hygroscopicité, on peut classer les isolants et les revêtements en 3 catégories :

Non hygroscopique	Hygroscopique	Très hygroscopique
Polystyrène expansé	Plaque de plâtre	Enduit chaux
Laine de roche	Ouate de cellulose	Enduit ciment
Papier peint vinyle	Enduit organique	Fibre de bois

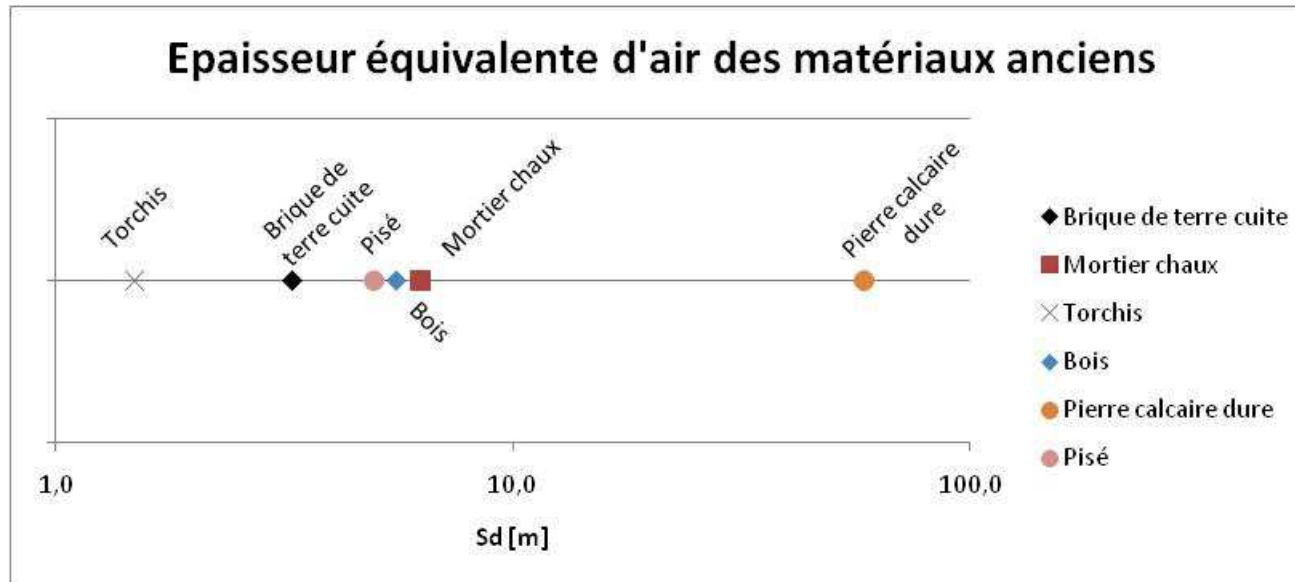
### 2.3.2. Résistance à la diffusion de vapeur

Pour mesurer la résistance à la diffusion de vapeur d'un matériau, nous disposons de deux grandeurs : le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur et l'épaisseur équivalente d'air.

Dans les cahiers suivants, la notion de résistance à la diffusion de vapeur sera évaluée au travers de l'épaisseur équivalente d'air (Sd) qui semble plus pertinente pour classer les matériaux en tenant compte de leur épaisseur de mise en œuvre.

Pour information, les coefficients de résistance à la diffusion de vapeur ( $\mu$ ) sont présentés dans le tableau du paragraphe 2.4.

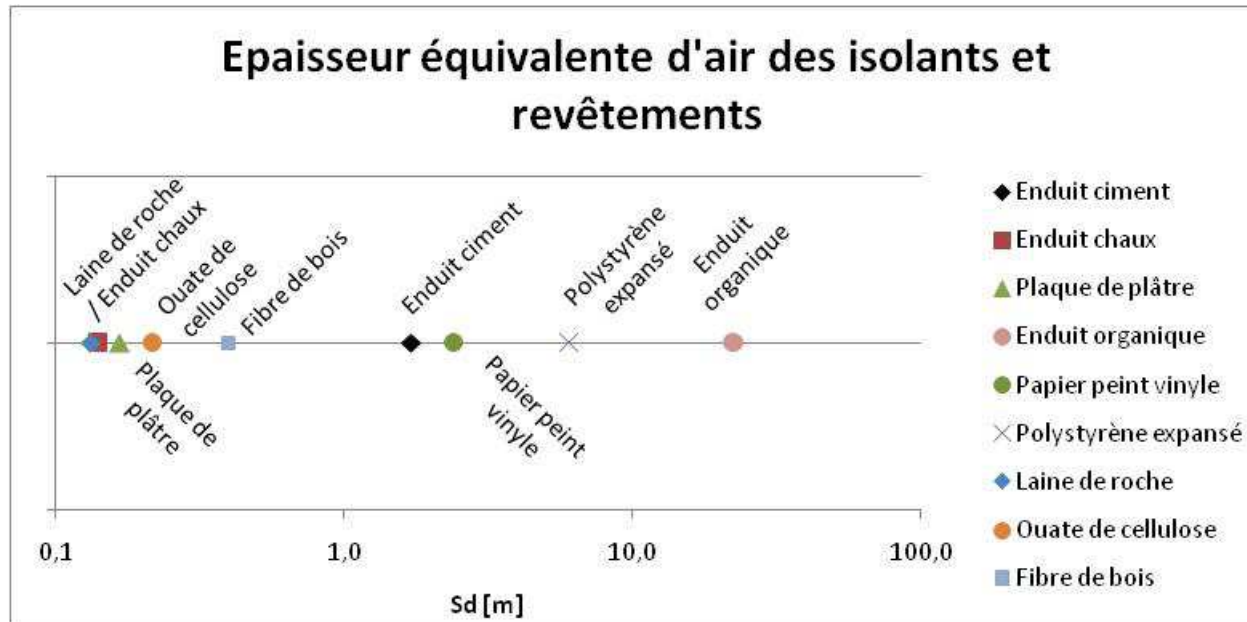
Le graphique suivant montre la répartition des matériaux anciens selon leur épaisseur équivalente d'air :



En termes d'épaisseur équivalente d'air, les matériaux utilisés peuvent être classés selon trois catégories :

Epaisseur équivalente d'air faible	Epaisseur équivalente d'air moyenne	Epaisseur équivalente d'air importante
	Brique de terre cuite Pisé Mortier chaux Bois Torchis	Pierre calcaire dure

Le graphique suivant montre la répartition des isolants et des revêtements selon leur épaisseur équivalente d'air :

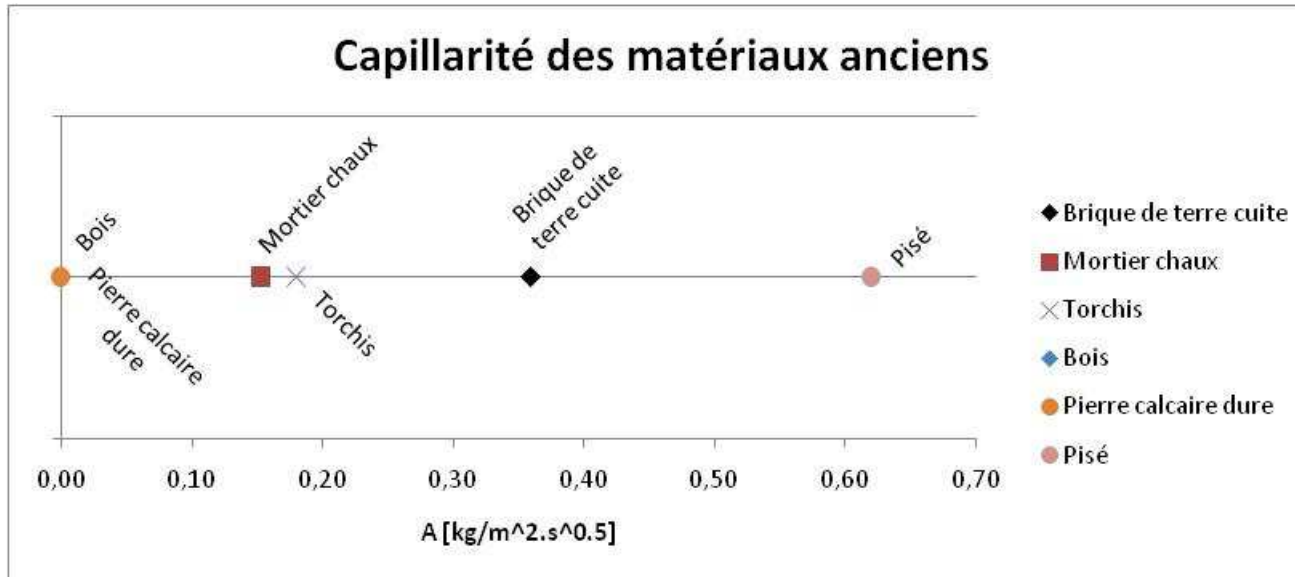


Le graphique suivant montre la répartition des isolants et des revêtements selon leur épaisseur équivalente d'air :

Epaisseur équivalente d'air faible	Epaisseur équivalente d'air moyenne	Epaisseur équivalente d'air importante
Laine de roche Ouate de cellulose Fibre de bois Plaque de plâtre Enduit chaux	Polystyrène expansé Enduit ciment Papier peint vinyle	Enduit organique

### 2.3.3. Capillarité

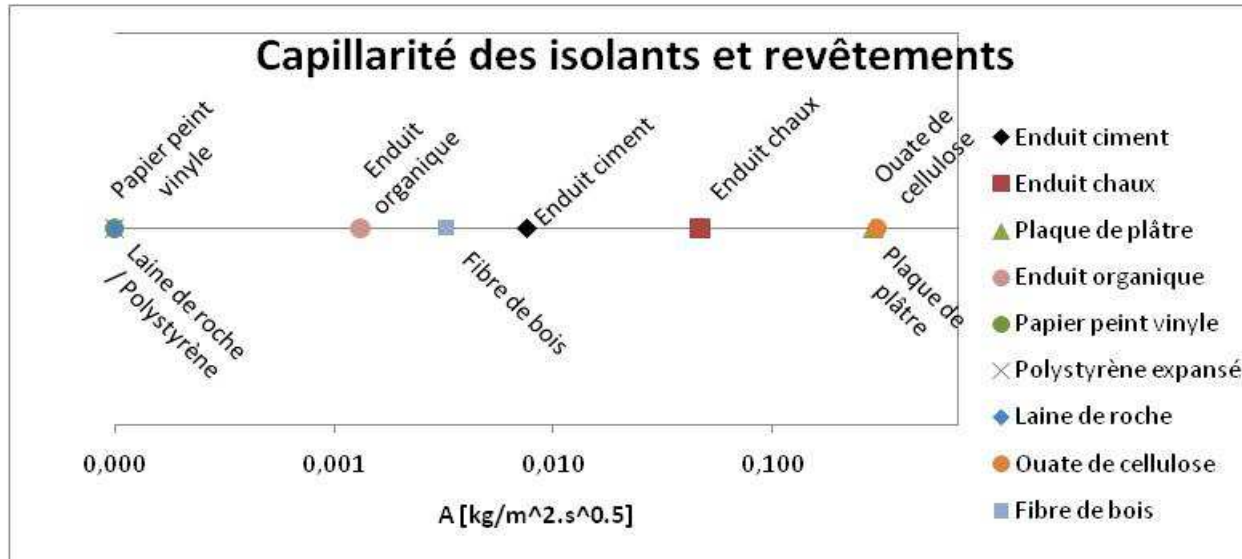
Le graphique suivant montre la répartition des matériaux selon leur coefficient d'absorption A. Plus le coefficient A est élevé, plus le matériau est capillaire :



En termes de capillarité, les matériaux anciens peuvent être classés en trois catégories :

Non capillaires	Capillaires	Très capillaires
Bois Pierre calcaire dure	-	Brique de terre cuite Pisé Mortier chaux Torchis

Le graphique suivant montre la répartition des isolants et des revêtements selon leur coefficient d'absorption A. Plus le coefficient A est élevé, plus le matériau est capillaire :



En termes de capillarité, les isolants et revêtements peuvent être classés en trois catégories :

Non capillaires	Capillaires	Très capillaires
Polystyrène expansé	Enduit chaux	Plaque de plâtre
Enduit ciment		Ouate de cellulose
Laine de roche		
Fibre de bois		
Enduit organique		
Papier peint vinyle		

*Remarque : Le matériau « Enduit ciment » considéré ici est un matériau traité par rapport à son comportement vis-à-vis de l'eau. Il ne présente pas les mêmes propriétés que les matériaux cimentaires qui, eux sont en général plus fortement capillaires.*

## 2.4. Synthèse

La classification ci-dessus permet d'établir dans les grandes lignes les caractéristiques hygriques des matériaux anciens que l'on retrouve dans cette étude. Le tableau ci-dessous synthétise ces caractéristiques :

	<b>Hygroscopicité</b>	<b>Résistance à la vapeur d'eau</b>	<b>Capillarité</b>
Pisé	Elevée	Moyenne	Elevée
Brique de terre cuite	Moyenne	Moyenne	Elevée
Pierre calcaire dure	Faible	Elevée	Faible
Mortier chaux	Moyenne	Moyenne	Elevée
Bois	Elevée	Moyenne	Faible
Torchis	Elevée	Moyenne	Elevée

# H Y G R O B A

## Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

A titre d'information, le tableau ci-dessous reprend les caractéristiques chiffrées des matériaux composant les parois anciennes et des isolants ainsi que des revêtements de cette étude :

	$\mu$ [-]	e [m]	Sd [m]	$W_{80}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	A [kg/m <sup>2</sup> .s <sup>0,5</sup> ]	Conductivité thermique [W/mK]	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	Chaleur spécifique [J/kg.K]
Matériaux anciens								
Pisé	10	0,5	5	20	0,62	0,59	1620	830
Brique de terre cuite	15	0,22	3,3	5	0,36	0,60	1800	850
Mortier chaux	15	0,42	6,3	7	0,15	0,70	1785	850
Torchis	12	0,12	1,5	18	0,18	0,37	1442	1000
Bois	140	0,04	5,6	115	0,0007	0,13	685	1500
Pierre calcaire dure	140	0,42	58,8	3	0,00	2,25	2440	850
Isolants et revêtements								
Enduit ciment	85	0,02	1,7	35	0,0076	1,2	2000	850
Enduit chaux	7	0,02	0,14	30	0,0470	0,7	1600	850
Plaque de plâtre	8	0,02	0,166	6	0,2870	0,2	850	850
Enduit organique	1118	0,02	22,36	5	0,0013	0,700	1645	10000
Polystyrène expansé	50	0,12	6	0	0	0,040	30	1500
Laine de roche	1	0,12	0,132	0	0	0,032	46	850
Fibre de bois	3	0,12	0,4	17	0,0033	0,044	168	2100
Ouate de cellulose	2	0,12	0,216	6	0,3000	0,034	50	2000
Papier peint vinyle	11970	0,0002	2,4	0	0	112	829	2300



## 3. Présentation des configurations testées et analysées

### 3.1. Description de l'outil de simulation retenu

En règle générale, afin d'étudier les risques hygriques dans une paroi, on utilise la méthode dite de GLASER.

Cette méthode a pour but de prédire les risques de condensation dans la paroi en comparant le niveau de pression de vapeur et la pression de vapeur saturante au sein de celle-ci :

- Si quelque part dans la paroi, la pression de vapeur dépasse le seuil de saturation, il y a donc un risque de condensation.
- Dans le cas contraire, il n'y a, a priori, pas de risque.

Cette méthode, couramment utilisée dans le bâtiment pour prédire le risque de condensation à l'intérieur d'une paroi, est apparue ici inappropriée, et ce, pour trois principales raisons :

- il s'agit d'une méthode statique qui ne prend donc pas en compte l'évolution de la température, de l'humidité relative, de l'intensité du rayonnement solaire et de l'intensité de la pluie battante au cours du temps. Un éventuel séchage de la paroi, consécutif à une humidification de celle-ci, ne peut donc pas être valorisé.
- elle ne prend pas en compte les phénomènes de capillarité.
- elle fait l'hypothèse d'une mise en œuvre idéale des différents matériaux et notamment d'une étanchéité à l'air parfaite de la membrane gérant l'apport de vapeur, ce qui est, en réalité, rarement le cas.

Pour cette étude, le choix s'est porté sur un outil de simulation hygrothermique dynamique : le logiciel WUFI-2D (développé par le Fraunhofer-Institut für Bauphysik « IBP Fraunhofer »).

Celui-ci permet de répondre aux limites énoncées ci-dessus puisqu'il approche les phénomènes hygrothermiques de manière dynamique, prend en compte les phénomènes de capillarité et permet éventuellement la prise en compte de certains défauts de mise en œuvre.

**Toutes les solutions d'isolation présentées ont fait l'objet de simulations hygrothermiques dynamiques, sur une période de 10 ans.**

### 3.2. Parois anciennes

Quatre types de murs traditionnels ont été considérés dans l'étude (chacun de ces types de murs faisant l'objet d'un cahier spécifique) :

- Cahier n°1 : murs en terre crue (50 cm ; pisé banché) ;
- Cahier n°2 : murs en briques de terre cuite (22 cm ; hourdée au mortier de chaux) ;
- Cahier n°3 : murs en pan de bois et torchis (12 cm) ;
- Cahier n°4 : murs en pierre dure (42 cm ; pierre calcaire dure, hourdée au mortier de chaux).

Nous considérerons que, dans leur état initial, ces murs sont sains et ne présentent donc aucune pathologie pré-existante.

**Les caractéristiques de ces matériaux sont issues d'une recherche bibliographique (cf paragraphe 7), couplée avec des tests effectués en laboratoire sur certains échantillons de matériaux traditionnels.**

Les données hygrothermiques du pisé ont, quant à elles, été fournies par le LGM (ENTPE).

### 3.3. Solutions d'isolation

Sur chaque type de mur traditionnel a été testé un ensemble de solutions d'isolation par l'intérieur (ITI) et par l'extérieur (ITE).

D'un point de vue thermique, ces solutions disposent toutes d'une résistance thermique R supérieure à 2.8m<sup>2</sup>.K/W, ce qui correspond à l'un des critères d'éligibilité pour l'attribution de l'éco-prêt à taux zéro.

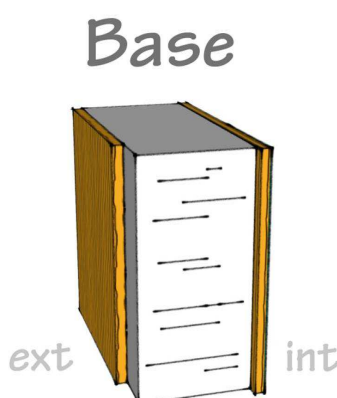
D'un point de vue hygrique, les solutions d'isolation ont été regroupées, de manière schématique, en deux grandes catégories :

- « perméable à l'humidité » d'une part : utilisant des matériaux peu résistants à la vapeur d'eau, généralement capillaires et/ou hygroscopiques
- « étanche à l'humidité » d'autre part : utilisant des matériaux résistants à la vapeur d'eau, généralement peu capillaires et/ou peu hygroscopiques

Chacune de ces 2 catégories est illustrée par des matériaux « types », présentés précédemment.

*Remarque : Des solutions alternatives, telles que les « corrections thermiques » (enduit isolant type chaux chanvre,...) n'ont pas été considérées dans le cadre de cette étude. Pour autant, elles peuvent constituer un compromis intéressant du point de vue hygrothermique.*

3.3.1. Configuration de base

<p><b>Base</b></p> 		<b>Extérieur</b>	<b>Paroi ancienne</b>	<b>Intérieur</b>
	<b>Matériaux retenus</b>	Enduit chaux		Enduit chaux
	<b>Epaisseur (mm)</b>	20		20
	<b>Hygroscopicité</b>	Elevée		Elevée
	<b>Résistance à la diffusion de vapeur</b>	Faible		Faible
	<b>Capillarité</b>	Moyenne		Moyenne

3.3.2. Isolation thermique par l'extérieur (ITE)

*Solution E-E en ITE : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur*

<p><b>E-E</b></p>	Extérieur « Etanche »		Paroi ancienne	Intérieur « Etanche »	
	<b>Matériaux retenus</b>	Enduit organique	Polystyrène		Plaque de plâtre et papier peint vinyle
	<b>Epaisseur (mm)</b>	10	120		13
	<b>Hygroscopicité</b>	Moyenne	Faible		Moyenne
	<b>Résistance à la diffusion de vapeur</b>	Elevée	Moyenne		Moyenne
	<b>Capillarité</b>	Faible	Faible		Moyenne

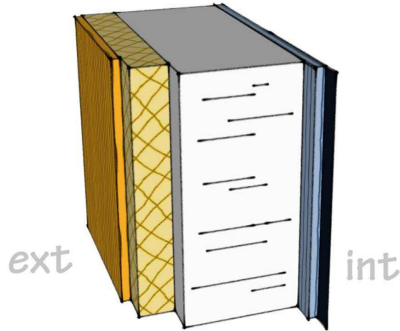
*Solution E-P en ITE : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur*

<p><b>E-P</b></p>	Extérieur « Etanche »		Paroi ancienne	Intérieur « Perméable »	
	<b>Matériaux retenus</b>	Enduit organique	Polystyrène		Enduit chaux
	<b>Epaisseur (mm)</b>	10	120		20
	<b>Hygroscopicité</b>	Moyenne	Faible		Elevée
	<b>Résistance à la diffusion de vapeur</b>	Elevée	Moyenne		Faible
	<b>Capillarité</b>	Faible	Faible		Moyenne


# H Y G R O B A

## Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

Solution P-E en ITE : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur

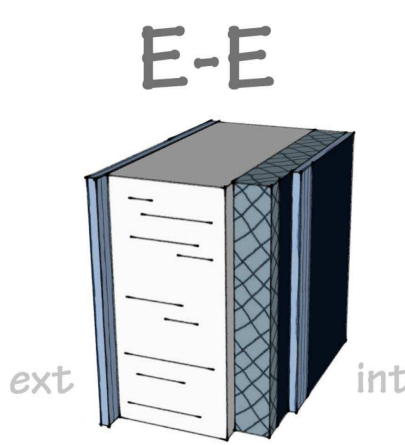
<div style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">P-E</div> 	Extérieur « Perméable »		Paroi ancienne	Intérieur « Etanche »	
	<b>Matériaux retenus</b>	Enduit chaux	Fibre de bois		Plaque de plâtre et papier peint vinyle
	<b>Epaisseur (mm)</b>	10	120		13
	<b>Hygroscopicité</b>	Elevée	Elevée		Moyenne
	<b>Résistance à la diffusion de vapeur</b>	Faible	Faible		Moyenne
	<b>Capillarité</b>	Moyenne	Faible		Moyenne

Solution P-P en ITE : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur

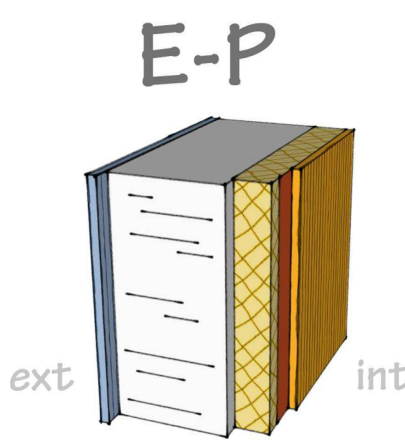
<div style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">P-P</div> 	Extérieur « Perméable »		Paroi ancienne	Intérieur « Perméable »	
	<b>Matériaux retenus</b>	Enduit chaux	Fibre de bois		Enduit chaux
	<b>Epaisseur (mm)</b>	10	120		20
	<b>Hygroscopicité</b>	Elevée	Elevée		Elevée
	<b>Résistance à la diffusion de vapeur</b>	Faible	Faible		Faible
	<b>Capillarité</b>	Moyenne	Faible		Moyenne

3.3.3. Isolation thermique par l'intérieur (ITI)

*Solution E-E en ITI : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur*

		Extérieur « Etanche »	Paroi ancienne	Intérieur « Etanche »		
	<b>Matériaux retenus</b>	Enduit ciment		Laine de roche	Frein-vapeur	Plaque de plâtre et papier peint vinyle
<b>Epaisseur (mm)</b>	20		120	1	13	
<b>Hygroscopicité</b>	Elevée		Faible	-	Moyenne	
<b>Résistance à la diffusion de vapeur</b>	Moyenne		Faible	Elevée	Moyenne	
<b>Capillarité</b>	Faible		Faible	-	Moyenne	

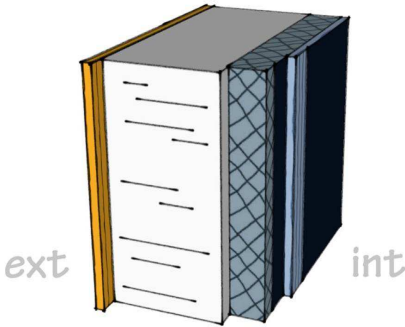
*Solution E-P en ITI : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur*

		Extérieur « Etanche »	Paroi ancienne	Intérieur « Perméable »		
	<b>Matériaux retenus</b>	Enduit ciment		Ouate de cellulose	Frein-vapeur hygro-variable	Plaque de plâtre
<b>Epaisseur (mm)</b>	20		120	1	13	
<b>Hygroscopicité</b>	Elevée		Moyenne	-	Moyenne	
<b>Résistance à la diffusion de vapeur</b>	Moyenne		Faible	Moyenne à Elevée	Faible	
<b>Capillarité</b>	Faible		Elevée	-	Elevée	


# H Y G R O B A

## Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

Solution P-E en ITI : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur

<div style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">P-E</div> 		Extérieur « Perméable »	Paroi ancienne	Intérieur « Etanche »		
	<b>Matériaux retenus</b>	Enduit chaux		Laine de roche	Frein-vapeur	Plaque de plâtre et papier peint vinyle
<b>Epaisseur (mm)</b>	20		120	1	13	
<b>Hygroscopicité</b>	Elevée		Faible	-	Moyenne	
<b>Résistance à la diffusion de vapeur</b>	Faible		Faible	Elevée	Moyenne	
<b>Capillarité</b>	Moyenne		Faible	-	Moyenne	

Solution P-P en ITI : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur

<div style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">P-P</div> 		Extérieur « Perméable »	Paroi ancienne	Intérieur « Perméable »		
	<b>Matériaux retenus</b>	Enduit chaux		Ouate de cellulose	Frein-vapeur hygro-variable	Plaque de plâtre
<b>Epaisseur (mm)</b>	20		120	1	13	
<b>Hygroscopicité</b>	Elevée		Moyenne	-	Moyenne	
<b>Résistance à la diffusion de vapeur</b>	Faible		Faible	Moyenne à Elevée	Faible	
<b>Capillarité</b>	Moyenne		Elevée	-	Elevée	

### 3.4. Conditions climatiques intérieures et extérieures

Les simulations ont été effectuées en considérant le climat extérieur (Température, Humidité relative) de la ville de Nancy.

Concernant les conditions climatiques intérieures, les données ont été évaluées selon une méthodologie développée par le CSTB (**ABELE, C. Transferts d'humidité à travers les parois. Evaluer les risques de condensation**) présentée ci dessous :

#### Température intérieure :

La température intérieure est considérée constante à 20°C pendant la période d'hiver puis s'élève progressivement jusqu'à devenir constante à 25°C en été (voir graphique ci-contre).

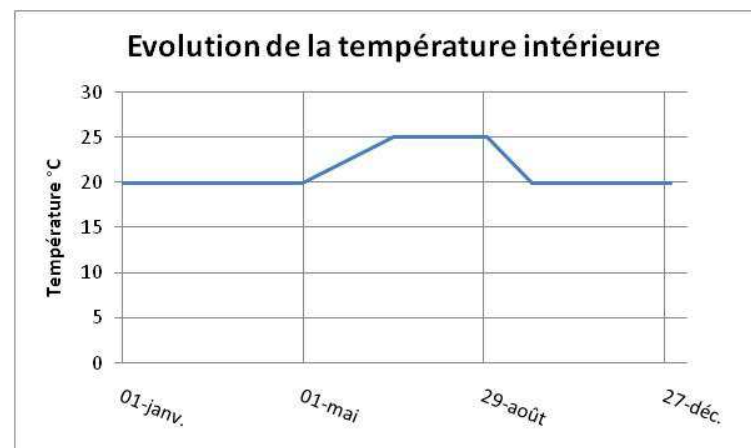
#### Hygrométrie intérieure :

La méthodologie définit la production de vapeur de l'espace intérieur  $\Delta v = W/n$

Où

W est la production de vapeur en  $\text{g/m}^3 \cdot \text{h}$

n est le taux de renouvellement d'air en  $\text{h}^{-1}$



Le ratio  $W/n$  définit la classe hygrothermique du climat intérieur. Dans le cadre du projet HYGROBA la classe hygrométrique du climat intérieur a été fixée comme étant « moyenne-forte » c'est-à-dire avec un ratio  $W/n = 5 \text{ g/m}^3$ .

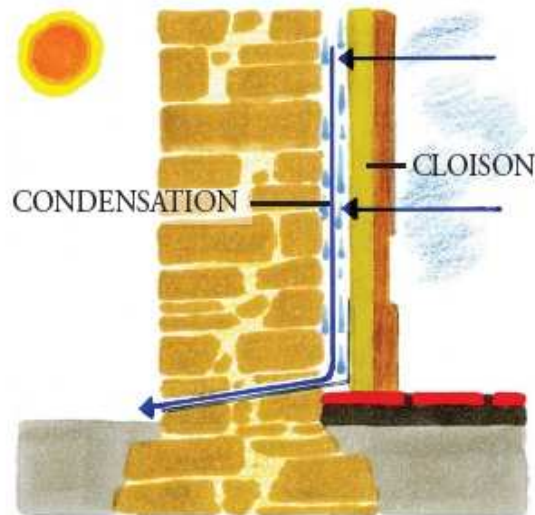
Il s'agit de conditions d'humidité comparable à une « pièce humide » d'un logement (salle de bain, cuisine).



### 3.5. Infiltrations d'humidité

Par défaut, le logiciel de simulation WUFI considère une mise en œuvre « idéale » des matériaux.

En réalité, les infiltrations d'humidité dans les parois (sous forme de vapeur ou sous forme liquide) sont potentiellement nombreuses : la condensation interne (qu'elle se fasse par diffusion ou par infiltration d'air), les infiltrations d'eau de pluie, les remontées capillaires.



CAPILLARITE

INFILTRATIONS D'EAU DE PLUIE

**L'influence de ces infiltrations sur le comportement hygrothermique de la paroi ancienne isolée n'est donc pas négligeable. Elle n'est pourtant que rarement étudiée.**

C'est pourquoi nous avons testé la réaction des parois anciennes isolées à deux types de sollicitations différentes :

- **En isolation par l'intérieur** : une source d'humidité, modélisant le phénomène de condensation interne par infiltration d'air, a été intégrée à l'interface entre l'isolant intérieur et la paroi ancienne.

Nous avons en effet considéré qu'en réhabilitation, les membranes gérant l'apport de vapeur présentent souvent des défauts d'étanchéité, liés soit à une mauvaise mise en œuvre, soit à des travaux intervenant après la mise en œuvre de

cette membrane. L'air intérieur transite alors au sein de l'isolant et la vapeur qu'elle contient condense au contact de la paroi froide.

Un modèle simplifié a été créé afin d'évaluer la quantité d'eau susceptible de condenser à l'interface entre l'isolant intérieur et la paroi ancienne en cas de défaut d'étanchéité de la membrane gérant l'apport de vapeur.

Cette quantité d'eau dépend notamment de la perméabilité à l'air du bâtiment, qui est caractérisée par le coefficient  $Q_{4Pa\_surf}$  ( $m^3/h.m^2$ ) (= débit de fuite d'air sous 4 Pa de différence de pression rapporté à l'ensemble des surfaces déperditives du bâtiment, hors plancher bas).

Les résultats ci-après ont été obtenus en considérant un  $Q_{4Pa\_surf}$  de  $1,7 m^3/h/m^2$ , ce qui correspond à la valeur par défaut de la RT 2005 pour la plupart des bâtiments.

- **En isolation par l'extérieur** : une source d'humidité a été intégrée à l'interface entre l'isolant extérieur et la paroi ancienne. Cette source a été prise égale, par défaut, à la précédente et permet donc seulement d'appréhender les conséquences d'une infiltration d'eau de pluie ou des remontées capillaires à l'interface entre l'enduit extérieur et l'isolant extérieur.

## 4. Critères d'analyse

Chaque configuration présentée a fait l'objet d'une analyse hygrothermique, selon différents critères, qui sont explicités dans les pages suivantes :

1. quantité d'eau dans la paroi ;
2. capacité de séchage de la paroi en présence d'infiltrations d'humidité ;
3. risque de condensation interne ;
4. inertie thermique de la paroi ;
5. résistance thermique de la paroi.

Il convient de préciser que les critères hygriques (1, 2 et 3) ne sont pas directement corrélés ici à l'apparition ou non de pathologies dans la paroi.

En effet, la littérature actuelle ne fournit pas, ou peu, de relations chiffrées explicites entre la quantité d'eau dans un matériau ancien et l'apparition de pathologies précises. Quelques valeurs seuils existent toutefois pour le bois ou les matériaux isolants par exemple.

Les critères proposés permettent néanmoins d'évaluer l'impact hygrothermique que peut avoir l'isolation d'une paroi ancienne.

## 4.1. Quantité d'eau

La teneur en eau d'un matériau, c'est-à-dire la quantité d'eau qu'il contient, est l'un des paramètres hydriques les plus symptomatiques.

Si au bout d'un certain nombre d'années, la valeur moyenne annuelle de la teneur en eau dans le matériau se stabilise, alors on considère qu'on a atteint un équilibre hygrothermique.

Pour les murs anciens non isolés (et bien entretenus), cet équilibre est atteint pour des valeurs moyennes de teneur en eau relativement faibles et perdure pendant des centaines d'années.

L'enjeu est d'éviter toute solution d'isolation qui entraînerait une augmentation trop importante de l'eau au sein de la paroi, et plus particulièrement au sein du matériau ancien. **Cela pourrait en effet être la cause de nombreuses pathologies : risques structurels à cause du gel/dégel, fissures d'enduit, désagrégation sableuse, moisissures...**

Le critère « quantité d'eau » a été évalué ici au regard de :

- L'accumulation d'eau dans le matériau ancien (= évolution de la teneur en eau moyenne annuelle, entre la première et la dernière année de simulation)
- La stabilisation de la quantité d'eau dans le matériau ancien (= évolution de la teneur en eau moyenne annuelle, entre la dernière et l'avant-dernière année de simulation)

On distingue les résultats en trois catégories :

Quantité d'eau faible (Peu d'accumulation et stabilisation)	Quantité d'eau moyenne	Quantité d'eau élevée (Accumulation d'eau importante ou stabilisation insuffisante)

## 4.2. Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité

Par définition, la capacité de séchage d'un matériau est sa capacité à gérer une infiltration additionnelle d'humidité en son sein.

Cette source additionnelle d'eau peut avoir des origines multiples (remontées capillaires, infiltration d'eau de pluie, condensation interne), mais a toujours pour conséquence de modifier l'équilibre hygrothermique du matériau.

Dans le pire des cas, aucun nouvel équilibre hygrothermique ne peut être trouvé et la teneur en eau du matériau augmente alors inexorablement, **avec pour conséquences possibles les pathologies énumérées plus haut.**

On s'intéresse ici à la teneur en eau dans le matériau ancien :

- Pour les configurations d'isolation par l'intérieur, une source additionnelle d'humidité correspondant à un  $Q_4$  de  $1,7\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$  a été prise (conditions considérées comme standard).
- Pour les configurations d'isolation par l'extérieur, cette même source a été prise par défaut et a été ajoutée à l'interface entre l'isolant extérieur et le matériau ancien.
- Pour la configuration de base, cette même source a été prise par défaut et a été ajoutée uniquement à l'interface entre le matériau ancien et l'enduit (intérieur ou extérieur).

On distingue à nouveau les résultats en trois catégories :

Capacité de séchage élevée (Peu d'accumulation et stabilisation)	Capacité de séchage moyenne	Capacité de séchage faible (Accumulation d'eau importante ou stabilisation insuffisante)

### 4.3. Condensation interne dans la paroi

Les différences de résistance à la vapeur d'eau des éléments composant une paroi engendrent des différences de flux de vapeur d'un matériau à l'autre.

La conséquence de ce phénomène est l'éventuelle accumulation de vapeur d'eau à une interface entre deux matériaux ayant des résistances très différentes, notamment à la jonction entre un isolant et la maçonnerie. Lorsque la vapeur d'eau augmente suffisamment, elle condense alors sur cette interface.

Cette eau de condensation peut devenir problématique si la paroi n'a pas la possibilité de sécher. **Dans le bâti ancien, elle peut par exemple être à l'origine du pourrissement des abouts de poutres supportant les planchers en bois.**

On s'intéresse ici à l'humidité relative à l'interface entre la paroi ancienne et l'isolant.

On distingue les résultats en trois catégories, selon :

<b>Risque de condensation faible</b> (HR constamment inférieur à 85%)	<b>Risque de condensation modéré</b> (HR atteignant des valeurs comprises entre 85% et 95%)	<b>Risque de condensation important</b> (HR atteignant des valeurs supérieures à 95%)

NB : nous ne considérons pas ici d'infiltrations d'humidité additionnelles, prises en compte dans le critère « capacité de séchage ».

#### 4.4. Inertie thermique de la paroi

L'inertie est un aspect important du bâti ancien car la densité des matériaux de construction permet de réguler en partie la température de l'air intérieur et d'apporter ainsi un certain confort thermique, notamment en été.

Ce critère caractérise l'accès à l'inertie thermique de la paroi ancienne isolée.

Les solutions d'isolation sont classées en 4 classes selon que l'inertie est « forte », « moyenne », « faible » ou « très faible ».

La classe d'inertie a été évaluée au moyen du logiciel COCON (basé sur la Norme ISO 13786) :

Inertie thermique très faible	Inertie thermique faible	Inertie thermique moyenne	Inertie thermique forte
○ ○ ○	● ○ ○	● ● ○	● ● ●

## 4.5. Résistance thermique de la paroi

Ce critère permet de prendre en compte l'impact de la quantité d'eau sur la performance thermique des matériaux, notamment sur celle de l'isolant. En effet, la résistance thermique des isolants a tendance à diminuer avec l'augmentation de l'humidité en leur sein.

On calcule le coefficient de déperditions thermiques  $U$  ( $W/m^2K$ ) à partir des conductivités thermiques  $\lambda$  moyennes annuelles de chaque matériau.

Les solutions d'isolation sont classées en deux catégories selon que la valeur de la résistance thermique est proche de la valeur attendue ou non ( $R$  supérieure à  $2.8m^2.K/W$ , ce qui correspond à l'un des critères d'éligibilité pour l'attribution de l'éco-prêt à taux zéro).

Résistance thermique de la paroi fidèle aux performances attendues	Résistance thermique de la paroi inférieure aux performances attendues

NB : nous ne considérons pas ici d'infiltrations d'humidité additionnelles, prises en compte dans le critère « capacité de séchage ».



## 5. Conclusions générales de l'étude

Les résultats détaillés par type de paroi (terre crue, brique de terre cuite, pierre dure et pan de bois – torchis) sont présentés dans les cahiers respectivement numérotés de 1 à 4. Des conclusions propres à chaque paroi y sont exposées, sous forme notamment d'un tableau synthétique.

Des conclusions plus générales, qui apparaissent sur l'ensemble des configurations considérées, peuvent néanmoins être formulées. Elles sont détaillées ci-dessous, en 4 points.

### 5.1. L'isolation d'une paroi ancienne impacte plus ou moins fortement son équilibre hygrothermique

Les simulations réalisées dans le cadre du projet montrent que toute isolation sur les parois anciennes perturbe plus ou moins fortement l'équilibre hygrothermique initial.

Les cas où l'on n'observe pas d'altération des critères étudiés sont en effet rares : il s'agit presque uniquement des configurations d'isolation par l'extérieur « P-x », perméables à la vapeur d'eau et capillaires côté extérieur, illustrées ici par un isolant type fibre de bois, avec enduit chaux.

### 5.2. Les solutions d'isolation par l'extérieur sont les plus performantes

Les résultats obtenus ont mis en évidence le fait que l'isolation par l'extérieur était préférable à l'isolation par l'intérieur, et ce, pour plusieurs raisons :

- L'inertie de la paroi ancienne est mieux préservée ;
- Le risque de condensation est bien plus faible ;
- Les quantités d'eau présentes dans les matériaux anciens (en présence ou en l'absence d'infiltrations d'humidité) sont plus faibles.

D'un point de vue hygrothermique, l'ITE constitue donc la solution la plus intéressante pour les parois anciennes, même si elle est souvent difficile à mettre en œuvre pour des raisons patrimoniales.

### 5.3. Les solutions d'isolation par l'intérieur sont les plus exposées aux risques hygrothermiques

Concernant les solutions d'ITI d'une paroi ancienne, nous avons pu constater une certaine variabilité des résultats selon les configurations.

Il ressort néanmoins que, sur les quatre parois considérées, les solutions d'ITI sont globalement les plus exposées aux risques hygrothermiques :

- les quantités d'eau mises en jeu sont, en moyenne, plus élevées ;
- les capacités de séchages sont, en moyenne, plus faibles.

A noter que les risques les plus importants se retrouvent sur les murs en pierre dure considérés dans l'étude.

### 5.4. Les configurations « perméables à l'humidité » sont à privilégier pour les parois anciennes

Quel que soit le mode d'isolation (ITI ou ITE), les résultats obtenus montrent que les configurations « P-P », perméables à la vapeur d'eau et capillaires, côté extérieur et intérieur, sont globalement les plus favorables.

Elles présentent en effet des capacités de séchage plus élevées, permettant ainsi de mieux gérer des infiltrations d'humidité potentielles dans la paroi (condensation de vapeur, infiltration d'eau de pluie, remontées capillaires...).

### 5.5. Des alternatives à l'isolation par l'intérieur sont à envisager

Considérant le fait que l'isolation par l'extérieur est souvent difficile à mettre en œuvre pour des raisons patrimoniales, et que l'isolation par l'intérieur présente globalement davantage de risques hygrothermiques, une troisième voie serait à considérer.

Il s'agit de solution du type « correction thermique », sous forme d'enduit isolant, de faible épaisseur, tels que les enduits chaux-chaivre par exemple.

Leur impact réel conviendrait d'être étudié dans le cadre d'une suite à ce projet.

## 6. Limites de l'étude

**Ces cahiers ne se substituent pas à un diagnostic spécifique, qui doit être adapté à la situation de chaque enveloppe et aux particularités qui peuvent être rencontrées (climat extérieur, climat intérieur, orientation,...).**

**Les conclusions ne sont donc rigoureusement valables que pour les conditions qui ont été considérées dans l'étude, en termes de climats intérieur / extérieur ou de propriétés des matériaux (cf.paragraphe 3 du cahier 0).**

Par ailleurs, au-delà des critères hygrothermiques, d'autres aspects sont naturellement à intégrer dans le cadre d'un projet de réhabilitation. Il s'agit bien de réaliser, au cas par cas, un diagnostic global du bâti. Celui-ci devra permettre de répondre notamment aux questions suivantes :

- Sur les aspects énergétiques : les murs et façades représentent-ils un poste de déperditions prioritaire ?
- Sur les aspects techniques : les murs présentent ils des remontées capillaires ? Des défauts d'infiltrations ? Des problèmes structurels ? D'autres pathologies ?  
Auxquels cas, il faudra les résoudre avant de procéder à toute isolation.
- Sur les aspects patrimoniaux : quelles sont les qualités et contraintes architecturales ? Côté intérieur, côté extérieur ?

Le choix final du mode et du type d'isolation se fera en intégrant toutes ces questions.

## 7. Bibliographie

- ABELE, C.** *Transferts d'humidité à travers les paroi. Evaluer les risques de condensation.* CSTB. Septembre 2009
- BARBEROT, E.** *Traité de constructions civiles.* Editions Jean-Cyrille Godefroy. 1912 (réimpression).
- CAUE de l'Ain.** *Fiches-Conseils : réhabilitation de l'architecture Bresse - Val-de-Saône.* np. 2003.
- COIGNET, J. et L.** *Maçonnerie de pierre.* Editions Eyrolles. 2007.
- COIGNET J.** *La maison ancienne.* Editions Eyrolles. 2006.
- COLLOMBET, R.** *L'Humidité des bâtiments anciens: causes et effets, diagnostic et remèdes.* Editions du Moniteur. 1986.
- DE MAISONNEUVE, P. et al.** *Le bâti brique.* Collection : Techniques d'amélioration de l'habitat existant, éditions EDF. 1993.
- DE MAISONNEUVE, P.** *Le bâti pierre.* Collection : Techniques d'amélioration de l'habitat existant, éditions EDF. 1994.
- DEWULF, M.** *Le torchis, mode d'emploi.* Editions Eyrolles. 2007.
- EVRARD, A.** *Betons de chaux et de chanvre : phénomènes de transferts de chaleur et de masse & comportement sous des sollicitations dynamiques.* UCL. 2005.
- FONTAINE, L. et ANGER, R.** *Bâtir en terre.* Editions Belin. 2009.
- HOUBEN, H. et GUILLAUD, H.** *Traité de construction en terre de CRAterre.* Edition Parenthèse. 1989.
- Fraunhofer-Institute für Bauphysik.** *WUFI 2-D.* Logiciel. Version 3.3.
- Fraunhofer-Institute für Bauphysik.** *Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung (MASEA).* Base de données hygrothermiques en ligne : <http://www.masea-ensan.de/>
- KÜNZEL, H. M.** *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components - One- and two-dimensional calculation using simple parameters.* Fraunhofer IBP. 1995.
- MARCOM, A.** *Construire en terre-paille.* Editions Terre Vivante. 2011.

**MINKE, G.** *Building with Earth*. Editions Birkhäuser. 2006.

**OLIVA, J.-P. et COURGEY, S.** *L'isolation thermique écologique - conception, matériaux, mise en oeuvre - neuf et réhabilitation*. Editions Terre Vivante. 2010.

**PEIRS, G.** *La brique : fabrication et traditions constructives*. Editions Eyrolles. 2005.

**PIGNAL, B.** *Terre crue*. Editions Eyrolles. 2005.

**PIOT, A.** *Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique*. INSA de Lyon. 2009.

**ROBERT, C. et THILLARD, H.** *Maçonnerie traditionnelle*. Cahiers techniques, éditions Rempart. 2008.

**SAMRI, D.** *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique*. ENTPE. 2008.

**UCL - Architecture et climat / Service public de Wallonie.** *Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines*. np. 2010.

**Ville de Grenoble.** *Audits énergétiques et architecturaux des bâtiments anciens – Rapport final*. np. 2010.

**WEISMANN, A. et BRYCE, K.** *Construire en terre facilement*. Editions La Plage. 2010.

# H Y G R O B A

## Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

### Maîtrise d'ouvrage :



**Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN)**

**Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages (DHUP)**

**Sous direction de la qualité et du développement durable dans la construction (QC)**

Grande Arche de la Défense - Paroi Sud - 92055 La Défense

Tél : (33) 01 40 81 92 95

### Réalisation :



**CETE de l'Est – groupe construction – pôle « spécificités thermiques du bâti ancien »**

11, rue Jean Mentelin - BP9 – 67035 Strasbourg cedex 2

Tél : (33) 03 88 77 46 00



**Ecole Nationale Supérieure d'Architecture (ENSA) de Toulouse - Laboratoire de recherche en architecture (LRA)**

83 rue Aristide Maillol – BP 10629 – 31106 Toulouse cedex 1

Tél : (33) 05 62 11 50 40



**Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC)**

135, Avenue de Ranguel - 31077 Toulouse cedex 4

Tél : (33) 05 61 55 99 16



**Maisons Paysannes de France (MPF)**

8, passage des deux sœurs - 75009 Paris

Tél : (33) 01 44 83 63 63