

HYGROBA

Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes



CAHIER N°2 :

MURS EN BRIQUE DE TERRE CUITE



**maisons
paysannes
de france**



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.	Caractéristiques principales des murs en brique de terre cuite	5
1.1.	Répartition géographique	5
1.2.	Le matériau	6
1.3.	Mise en œuvre	7
1.4.	Pathologies et précautions	8
2.	Conditions de l'étude	9
2.1.	Configurations testées	9
2.2.	Critères d'analyse	10
3.	Configuration de base	12
3.1.	Description	12
3.2.	Conséquence sur le comportement hygrothermique de la paroi	13
4.	Isolation thermique par l'extérieur (ITE)	14
4.1.	Solution E-E en ITE : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur	14
4.2.	Solution E-P en ITE : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur	16
4.3.	Solution P-E en ITE : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur	18
4.4.	Solution P-P en ITE : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur	20
5.	Isolation thermique par l'intérieur (ITI)	22
5.1.	Solution E-E en ITI : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur	22
5.2.	Solution E-P en ITI : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur	24
5.3.	Solution P-E en ITI : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur	26
5.4.	Solution P-P en ITI : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur	28
6.	Tableau de synthèse et conclusions	30
7.	Limites de l'étude	32

H Y G R O B A

Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

1. Caractéristiques principales des murs en brique de terre cuite

1.1. Répartition géographique

Après le déclin de l'Empire romain, la construction en brique disparaît en Europe jusqu'au 11^{ème} siècle lors de la construction de la basilique Saint-Sernin à Toulouse. Cet édifice dans le style roman marque le retour de la brique dans la construction, d'abord dans le midi et un siècle plus tard dans le nord de la France. Dans des régions alluviales, où souvent il n'existe pas une bonne pierre de construction, la brique devenait de nouveau très populaire et était considérée comme le matériau local par excellence. A partir du Moyen-âge, en Flandre, Picardie, Artois et Midi-Pyrénées, la brique de parement (de façade) devient le matériau prédominant. Dans d'autres régions, comme la Normandie, la Champagne et l'Île-de-France, la brique est très présente, sans pour autant devenir dominante. Cependant, en France la construction en brique n'a jamais été aussi dominante que dans les pays autour de la mer Baltique et de la mer du Nord, comme la Belgique, les Pays-Bas et l'Angleterre.



A gauche : Construction en brique du nord de la France / A droite : construction en brique foraine

1.2. Le matériau

La brique cuite est le successeur de la brique en terre crue, l'adobe (*cf* cahier n°1 : Terre crue). Elle est faite par simple moulage et cuisson d'une argile dite « ordinaire » car plus abondante que les argiles plus « nobles » tel que le kaolin et les grès argileux, utilisées pour faire les céramiques et les porcelaines. En règle générale, la matière première consiste en un mélange d'argiles fines et grasses à partir de plusieurs couches d'extraction. Mais dans le Nord, on fabriquait des briques faites à partir des limons, une argile plus sableuse (maigre) d'origine éolienne ou alluviale, et des briques faites avec le schiste, une argile très dure située entre les couches de houille, donc un sous-produit des mines à charbon.

Pendant longtemps, la matière première était extraite en hiver car l'argile se décomposait sous l'effet du gel, tandis que le moulage, le séchage - souvent pendant quelques semaines, voir quelques mois, à l'air libre mais sous abri - et la cuisson étaient réalisés au printemps et en été. Les briques vertes contenaient jusqu'à 30% d'humidité (en poids) et après séchage, mais avant cuisson, plus que 5%. Dans les briqueteries artisanales, le séchage était l'opération la plus délicate, demandant beaucoup de temps, de place et de main d'œuvre (pour tourner les briques).

Aujourd'hui le séchage se fait de manière artificielle, mais demande en général plus d'énergie que la cuisson, elle-même très gourmande en énergie. Suivant le type d'argile, la cuisson se fait entre 850 et 1.200 °C. A ces températures, l'argile commence à « fondre » et à devenir liquide car les particules fusionnent. Il est très important d'arrêter la cuisson au bon moment, avant que l'argile se vitrifie et que la brique se déforme.

Dans les briqueteries artisanales ou dans des fours de campagne, la cuisson n'était pas très homogène, ce qui rendait le tri des briques primordial. Maintenant le tri se fait dans l'usine : il y a des briques de parement de 1^{er} choix, de 2^{ème} choix, etc. Auparavant, c'était le maçon qui sur chantier faisait le tri entre les bonnes briques pour le parement, les briques pâles et pas assez cuites pour les murs intérieurs et les briques sur-cuites pour les fondations.

La méthode de moulage la plus ancienne est le moulage à la main de l'argile humide (la pâte molle) dans des bacs ou cadres en bois, qui après moulage donne la « brique verte » qui devait sécher avant de passer au four. Un autre procédé de moulage, par pressage de limons à l'état demi sec à partir d'une argile plus maigre, se développe dans le XIX^{ème} siècle pour diminuer le temps de séchage. Ces briques pressées, étant sombres et pas très jolies, étaient le plus souvent enduites. Pendant la révolution industrielle apparaît la brique dite « filée, étirée, ou machinée ». Elle est faite avec une étireuse dans laquelle la pâte est extrudée en forme de boudin rectangulaire et coupée en briques uniformes. Cela donnait des surfaces lisses, très à la mode au début du XX^{ème} siècle. Souvent elles étaient perforées, et plus récemment elles sont rendues creuses avec des alvéoles.

Bien sûr, ce sont surtout les caractéristiques de l'argile qui déterminent les qualités de la brique, tel que la porosité, la masse volumique ($\approx 1.800 \text{ kg/m}^3$), la résistance et en partie sa couleur. Les briques jaunes viennent des argiles qui contiennent de la chaux. Les briques pressées sont plus foncées. Cependant, des couleurs différentes peuvent être obtenues en changeant l'apport en oxygène à la fin de la cuisson. Un surdosage en oxygène fait oxyder le fer et donne la couleur rouge, un sous-dosage donne la couleur bleu-violet.

Normalement les briques anciennes ont une bonne résistance à la compression (autour de 10 à 20 N/mm²) mais une mauvaise résistance à la traction (1 à 2 N/mm²). La grande stabilité dimensionnelle de la brique (faible dilatation thermique, retrait et gonflement) fait que la maçonnerie en briques soit le mode de construction le plus stable. Le fait que dans les bâtiments anciens on ne trouve pas de joints de dilatations ne pose généralement aucun problème.

1.3. Mise en œuvre

Il existe des briques dans tous les formats, mais généralement en France il y en a deux dominants pour les bâtiments anciens : le format du littoral (région Mer du Nord) et le format du midi, la brique foraine (Toulousaine). Le premier format de brique du nord est de 21x10x6,5cm à un ou deux centimètres près. La brique foraine, plus ancienne, était moins standardisée et ses dimensions fluctuent entre 30 et 45 cm de long, pour 20 à 30 cm de large, avec une épaisseur d'environ 4,5 cm. Jusqu'au 20^{ème} siècle, il y avait une grande disparité et il était assez courant de trouver dans un même mur, des briques de longueurs différentes.

Suivant les habitudes et les formats des briques fabriquées dans les différentes régions, les maçons utilisaient plusieurs assemblages pour la mise en œuvre des murs, suivant un certain « appareillage ». Les appareillages sont basés sur le principe qu'horizontalement les briques doivent se chevaucher et que verticalement les joints ne doivent pas se superposer. Il y a des appareillages Flamands, Hollandais, Français, etc. La disposition « en panneresse » signifie que les briques sont posées toutes dans leurs longueurs, les joints verticaux décalés de la demi-longueur de la brique. Cela ne rentre pas dans les règles d'art d'un vrai appareillage, car un mur monté d'une telle façon n'est pas très stable. On voit cette technique pratiquée dans le cas des murs creux (ou doubles) construits d'après guerre, mais rarement dans les bâtiments anciens avant 1948.

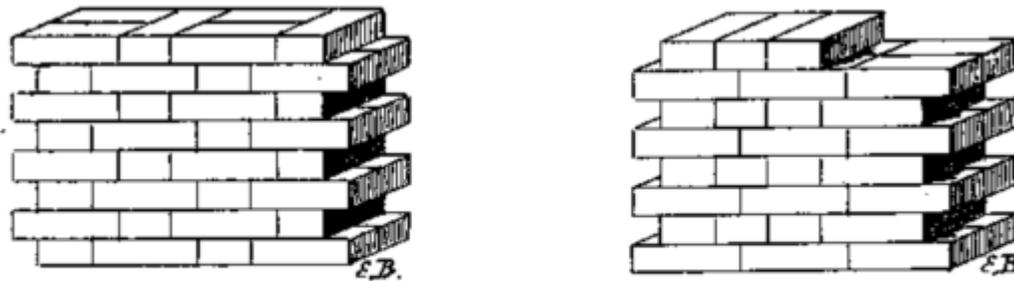


Fig. 120. — Boutisses et carreaux. Fig. 121. — Boutisses et panneresses.

Exemple d'appareils : Appareil flamand (Fig 120) et appareil français (Fig 121) / Traité de construction civil E.BARBEROT

1.4. Pathologies et précautions

La qualité la plus importante de la brique est sa porosité. Le fait que la brique soit très capillaire, assure la bonne prise du mortier et lui donne sa grande capacité d'absorption et de restitution de l'eau tout aussi vite. La pluie sur une façade en brique est immédiatement absorbée, ce qui empêche les ruissellements. Grâce à sa forte capillarité, le parement sèche très vite pour revenir rapidement à son humidité d'équilibre (environ 0,8% en poids). Cependant il sera nécessaire de veiller à ce que le mur ne se sature pas complètement, pour éviter que l'eau de pluie ne rentre trop profondément dans la paroi, risquant de provoquer des problèmes d'humidité à l'intérieur. Pour cette raison après la guerre, on voit apparaître dans le Nord des murs « creux » constitués d'un parement en briques minces (non porteur) avec à l'intérieur un mur porteur, le plus souvent en béton.



Briques soumises aux dégâts du gel - Source : A.Holm, Isolin

D'autres pathologies et déformations des parements en briques, souvent liées à des problèmes d'humidité, sont les efflorescences et les dégâts dus au gel. Les efflorescences viennent le plus souvent d'une eau chargée de sels qui migrent par capillarité de la maçonnerie vers l'extérieur où ils cristallisent. Les vecteurs de ces sels sont les sables, les mortiers et les eaux de gâchage, mais plusieurs études ont montré que le principal vecteur sont les ciments riches en alcalins¹.

¹ CTTB – Centre Technique des Tuiles et Briques

2. Conditions de l'étude

2.1. Configurations testées

Le présent cahier permet une analyse de différentes solutions d'isolation d'un mur en brique de terre cuite, en fonction des risques hygrothermiques associés.

Un ensemble de solutions d'isolation par l'intérieur (ITI) et par l'extérieur (ITE) a été simulé.

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

Remarque : Les conditions de simulation et les caractéristiques des matériaux considérés sont détaillées dans le cahier n°0.

2.2. Critères d'analyse

Chaque configuration présentée a fait l'objet d'une analyse hygrothermique, selon différents critères, qui sont rappelés ci-dessous.

1.1.1. Quantité d'eau

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

1.1.2. Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité

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

1.1.3. Condensation interne dans la paroi

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

1.1.4. Inertie thermique de la paroi

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

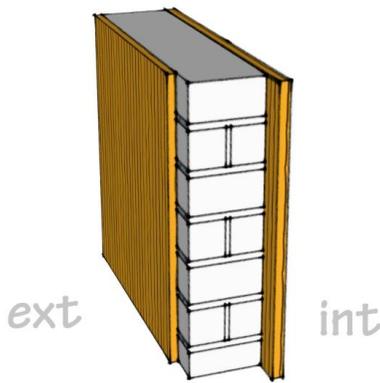
1.1.5. Résistance thermique de la paroi

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

3. Configuration de base

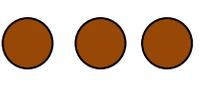
3.1. Description

La configuration de base correspond à un mur traditionnel en brique de terre cuite hourdé au mortier de chaux selon un appareillage dit « français », et enduit à la chaux côté intérieur et extérieur.

Base		Extérieur	Paroi ancienne		Intérieur
		Matériaux retenus (*)	Brique de terre cuite	Mortier chaux	Enduit chaux
	Epaisseur (mm)	20	220	15	20
	Hygroscopicité	Elevée	Moyenne	Moyenne	Elevée
	Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible
	Capillarité	Moyenne	Elevée	Elevée	Moyenne

(*) Les propriétés physiques de ces matériaux sont détaillées dans le cahier n°0

3.2. Conséquence sur le comportement hygrothermique de la paroi

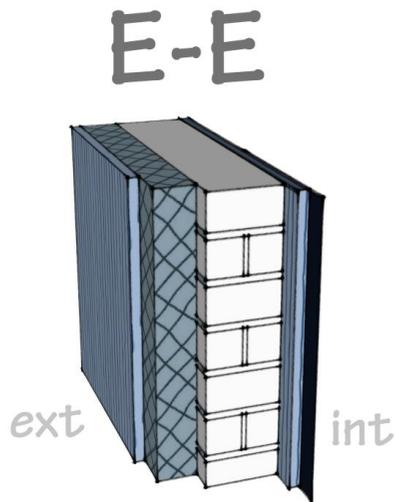
<p>Quantité d'eau</p>	<p>La quantité d'eau dans la configuration de base est faible : la teneur en eau du mur ne subit aucune augmentation.</p> <p>Ce résultat est cohérent avec ce que l'on peut observer de nos jours, à savoir de nombreuses constructions anciennes en brique sans pathologies apparentes. Ceci s'explique par le fait qu'un équilibre hygrothermique favorable a été atteint et maintenu tout au long des décennies passées, et ce, grâce aux caractéristiques propres aux matériaux employés et aux modes constructifs utilisés.</p>	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>Pour ce cas particulier, nous avons placé des infiltrations d'humidité entre l'enduit extérieur et l'ensemble formé par la brique de terre cuite et le mortier de chaux et entre l'ensemble formé par la brique de terre cuite et le mortier de chaux et l'enduit intérieur. Dans les deux cas, la capacité de séchage de la paroi est élevée : la brique de terre cuite atteint très rapidement un nouvel équilibre hygrothermique proche du niveau observé sans aucune infiltration d'humidité.</p> <p>La chaux facilite le passage de l'humidité, à l'état liquide et gazeux, de la brique de terre cuite vers l'ambiance extérieure et vers l'ambiance intérieure.</p>	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque de condensation faible à l'interface entre l'ensemble formé par la brique de terre cuite et le mortier de chaux et l'enduit intérieur, de même pour l'enduit extérieur.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie de la paroi dans sa configuration de base est forte.</p>	
<p>Résistance thermique</p>	<p>La résistance thermique du mur en brique de terre cuite dans sa configuration de base est inférieure aux performances attendues.</p>	

4. Isolation thermique par l'extérieur (ITE)

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

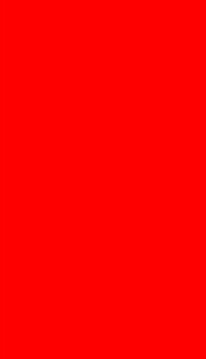
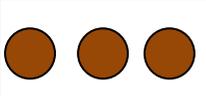
4.1.1. Description

	Extérieur « Etanche »		Paroi ancienne		Intérieur « Etanche »
	Matériaux retenus (*)	Enduit organique	Polystyrène	Brique de terre cuite	Mortier chaux
Epaisseur (mm)	10	120	220	10	13
Hygroscopicité	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Résistance à la diffusion de vapeur	Elevée	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Capillarité	Faible	Faible	Elevée	Elevée	Moyenne



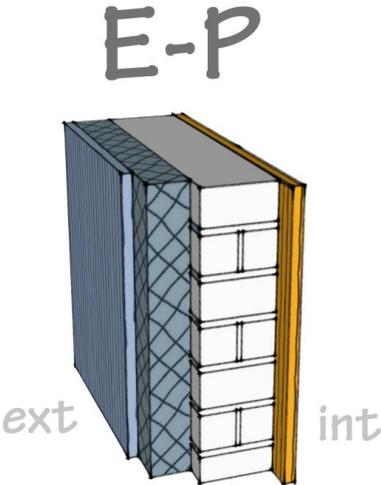
(*) Les propriétés physiques de ces matériaux sont détaillées dans le cahier n°0

4.1.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>Par rapport à la configuration de base, la quantité d'eau diminue dans la brique de terre cuite.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La brique de terre cuite est en effet protégée de l'humidité de l'ambiance intérieure grâce au papier peint vinyle qui interdit son passage sous forme gazeuse dans le plâtre. • Elle est également protégée de l'humidité de l'ambiance extérieure grâce au polystyrène et à l'enduit organique, qui empêchent l'humidité, qu'elle soit sous forme liquide (eau de pluie) ou gazeuse (transfert de vapeur dû à une ambiance plus humide à l'extérieur qu'à l'intérieur), de pénétrer plus en avant dans la brique de terre cuite. 	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>La capacité de séchage de la paroi est faible en présence d'infiltrations d'humidité : la quantité d'eau dans la brique de terre cuite augmente et n'atteint pas de nouvel équilibre hygrothermique.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le passage de l'humidité, sous forme liquide et gazeuse, de la brique de terre cuite vers l'ambiance extérieure est impossible du fait de la faible capillarité et de la résistance à la diffusion de vapeur plutôt élevée du polystyrène et de l'enduit organique. • De même, mais dans une moindre mesure, la plaque de plâtre et le papier peint vinyle limitent le passage de l'humidité, sous forme gazeuse et sous forme liquide, de la brique de terre cuite vers l'ambiance intérieure, du fait de leur résistance à la diffusion de vapeur et de leur capillarité moyennes. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre l'isolant et l'ensemble formé par la brique de terre cuite et le mortier de chaux.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie de la paroi ancienne isolée est forte. L'isolation par l'extérieur préserve l'inertie de la paroi ancienne.</p>	
<p>Résistance thermique</p>	<p>La résistance thermique de la paroi ancienne isolée est fidèle aux performances attendues.</p>	

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

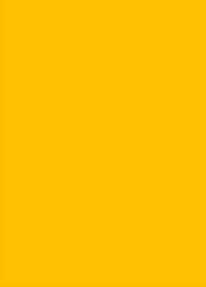
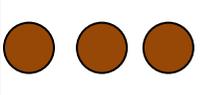
4.2.1. Description



	Extérieur « Etanche »		Paroi ancienne		Intérieur « Perméable »
Matériaux retenus (*)	Enduit organique	Polystyrène	Brique de terre cuite	Mortier chaux	Enduit chaux
Epaisseur (mm)	10	120	220	10	20
Hygroscopicité	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Elevée
Résistance à la diffusion de vapeur	Elevée	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible
Capillarité	Faible	Faible	Elevée	Elevée	Moyenne

() Les propriétés physiques de ces matériaux sont détaillées dans le cahier n°0*

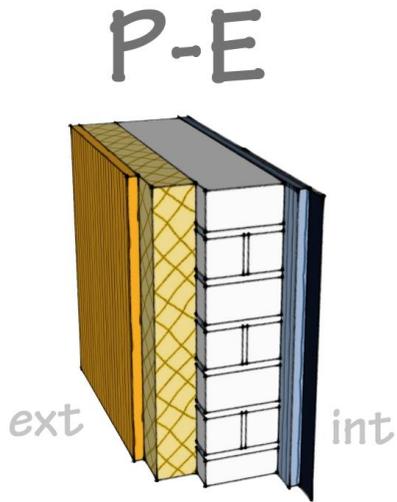
4.2.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>Par rapport à la configuration de base, la quantité d'eau diminue dans la brique de terre cuite.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La brique de terre cuite est en effet protégée de l'humidité de l'ambiance extérieure grâce au polystyrène et à l'enduit organique, qui empêchent l'humidité, qu'elle soit sous forme liquide (eau de pluie) ou gazeuse (transfert de vapeur dû à une ambiance plus humide à l'extérieur qu'à l'intérieur), de pénétrer plus en avant dans la brique de terre cuite. • La quantité d'humidité provenant de l'ambiance intérieure semble pouvoir être facilement gérée par la paroi. L'enduit de chaux, même s'il autorise le passage de l'humidité sous forme liquide et gazeuse de l'ambiance intérieure vers la brique de terre cuite, autorise également ce passage en sens inverse, favorisant ainsi le séchage de la paroi vers l'ambiance intérieure. 	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>La capacité de séchage de la paroi est moyenne en présence d'infiltrations d'humidité : la brique de terre cuite atteint un nouvel équilibre hygrothermique qui est supérieur au niveau de la paroi de base.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le passage de l'humidité, sous forme liquide et gazeuse, de la brique de terre cuite vers l'ambiance extérieure est impossible du fait de la faible capillarité et de la résistance à la diffusion de vapeur plutôt élevée du polystyrène et de l'enduit organique. • L'enduit à la chaux facilite le passage de l'humidité, sous forme liquide et gazeuse, de la brique de terre cuite vers l'ambiance intérieure. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre l'isolant et l'ensemble formé par la brique de terre cuite et le mortier de chaux.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie de la paroi ancienne isolée est forte. L'isolation par l'extérieur préserve l'inertie de la paroi ancienne.</p>	
<p>Résistance thermique</p>	<p>La résistance thermique de la paroi ancienne isolée est fidèle aux performances attendues.</p>	

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

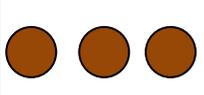
4.3.1. Description

	Extérieur « Perméable »		Paroi ancienne		Intérieur « Etanche »
	Matériaux retenus (*)	Enduit chaux	Fibre de bois	Brique de terre cuite	Mortier chaux
Epaisseur (mm)	10	120	220	10	13
Hygroscopicité	Elevée	Elevée	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Capillarité	Moyenne	Faible	Elevée	Elevée	Moyenne



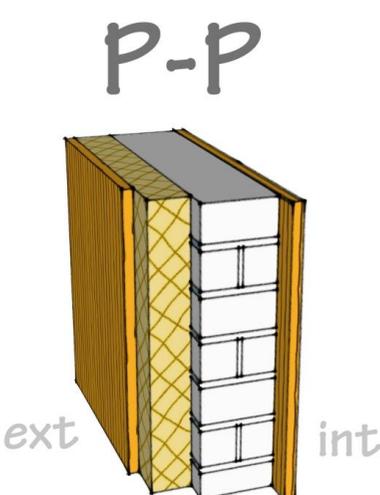
(*) Les propriétés physiques de ces matériaux sont détaillées dans le cahier n°0

4.3.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>Par rapport à la configuration de base, la quantité d'eau diminue dans la brique de terre cuite.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La brique de terre cuite est en effet protégée de l'humidité de l'ambiance intérieure grâce au papier peint vinyle qui interdit son passage sous forme gazeuse dans le plâtre. • La quantité d'humidité provenant de l'ambiance extérieure semble pouvoir être gérée par la paroi. La chaux et la fibre de bois même si elles autorisent le passage de l'humidité, surtout sous forme gazeuse, de l'ambiance extérieure vers la brique de terre cuite, autorisent également ce passage en sens inverse, favorisant ainsi le séchage de la paroi vers l'ambiance extérieure. 	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>La capacité de séchage de la paroi est élevée. La teneur en eau de la paroi ancienne reste inférieure à celle de la paroi de base malgré l'ajout d'infiltrations d'humidité :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La plaque de plâtre et le papier peint vinyle limitent le passage de l'humidité, sous forme gazeuse et sous forme liquide, de la brique de terre cuite vers l'ambiance intérieure, du fait de leur résistance à la diffusion de vapeur et de leur capillarité moyennes. • Le passage de la vapeur d'eau, de la brique de terre cuite vers l'ambiance extérieure est favorisé par la faible résistance à la diffusion de vapeur de la fibre de bois et de l'enduit à la chaux. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre l'isolant et l'ensemble formé par la brique de terre cuite et le mortier de chaux.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie de la paroi ancienne isolée est forte. L'isolation par l'extérieur préserve l'inertie de la paroi ancienne.</p>	
<p>Résistance thermique</p>	<p>La résistance thermique de la paroi ancienne isolée est fidèle aux performances attendues.</p>	

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

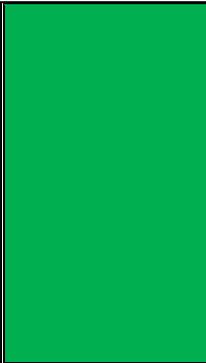
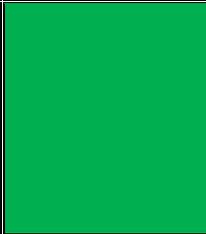
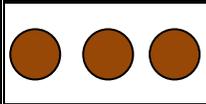
4.4.1. Description



	Extérieur « Perméable »		Paroi ancienne		Intérieur « Perméable »
	Matériaux retenus (*)				
Matériaux retenus (*)	Enduit chaux	Fibre de bois	Brique de terre cuite	Mortier chaux	Enduit chaux
Epaisseur (mm)	10	120	220	10	20
Hygroscopicité	Elevée	Elevée	Moyenne	Moyenne	Elevée
Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible
Capillarité	Moyenne	Faible	Elevée	Elevée	Moyenne

(*) Les propriétés physiques de ces matériaux sont détaillées dans le cahier n°0

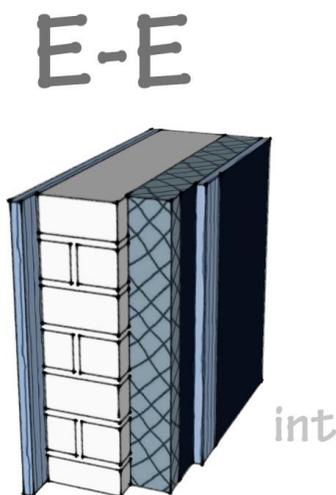
4.4.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>Par rapport à la configuration de base, la quantité d'eau diminue dans la brique de terre cuite.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La quantité d'humidité provenant de l'ambiance intérieure semble pouvoir être gérée par la paroi. La chaux, même si elle autorise le passage de l'humidité sous forme liquide et gazeuse de l'ambiance intérieure vers la brique de terre cuite, autorise également ce passage en sens inverse, favorisant ainsi le séchage de la paroi vers l'ambiance intérieure • La quantité d'humidité provenant de l'ambiance extérieure semble pouvoir être gérée par la paroi. La chaux et la fibre de bois même si elles autorisent le passage de l'humidité, surtout sous forme gazeuse, de l'ambiance extérieure vers la brique de terre cuite, autorisent également ce passage en sens inverse, favorisant ainsi le séchage de la paroi vers l'ambiance extérieure. 	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>La capacité de séchage de la paroi est élevée.</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'enduit à la chaux facilite le passage de l'humidité, sous forme liquide et gazeuse, de la brique de terre cuite vers l'ambiance intérieure. • Le passage de la vapeur d'eau, de la brique de terre cuite vers l'ambiance extérieure est favorisé par la faible résistance à la diffusion de vapeur de la fibre de bois et de l'enduit à la chaux. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre l'isolant et l'ensemble formé par la brique de terre cuite et le mortier de chaux.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie de la paroi ancienne isolée est forte. L'isolation par l'extérieur préserve l'inertie de la paroi ancienne.</p>	
<p>Résistance thermique</p>	<p>La résistance thermique de la paroi ancienne isolée est fidèle aux performances attendues.</p>	

5. Isolation thermique par l'intérieur (ITI)

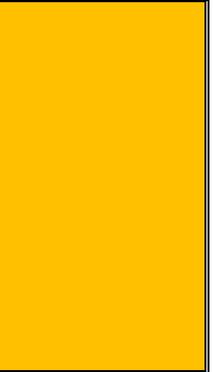
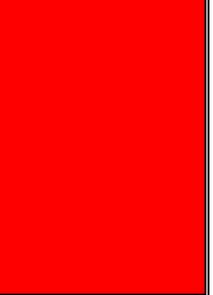
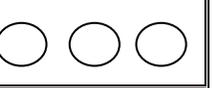
5.1. Solution E-E en ITI : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur

5.1.1. Description

		Extérieur « Etanche »		Paroi ancienne		Intérieur « Etanche »	
	Matériaux retenus (*)	Enduit ciment	Brique de terre cuite	Mortier chaux	Laine de roche	Frein-vapeur	Plaque de plâtre et papier peint vinyle
	Epaisseur (mm)	20	220	10	120	1	13
	Hygroscopicité	Elevée	Moyenne	Moyenne	Faible	-	Moyenne
	Résistance à la diffusion de vapeur	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Elevée	Moyenne
	Capillarité	Faible	Elevée	Elevée	Faible	-	Moyenne

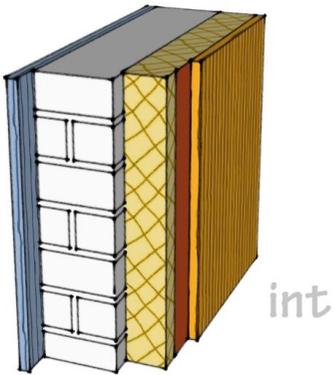
(*) Les propriétés physiques de ces matériaux sont détaillées dans le cahier n°0

5.1.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>Par rapport à la configuration de base, la quantité d'eau augmente dans la brique et le mortier. Elle atteint néanmoins rapidement un nouvel équilibre hygrothermique proche de celui de la configuration de base.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le séchage de la brique de terre cuite vers l'ambiance intérieure est faible, puisque la laine de roche interdit le passage de l'humidité sous forme liquide vers le frein-vapeur, qui lui-même limite le passage d'humidité sous forme à la fois liquide et gazeuse, tout comme le papier peint vinyle. • Mais ce séchage est également faible vers l'ambiance extérieure puisque l'enduit au ciment limite le passage de l'humidité en provenance de la brique de terre cuite, qu'elle soit sous forme liquide ou gazeuse. 	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>La capacité de séchage de la paroi est faible en présence d'infiltrations d'humidité : la brique de terre cuite n'atteint pas de nouvel équilibre hygrothermique. Cela engendre une situation critique étant donné que la brique est saturée en eau après quelques années.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le passage de l'humidité, sous forme liquide et gazeuse, de la brique vers l'ambiance intérieure est impossible du fait de la faible capillarité de la laine de roche et de la forte résistance à la diffusion de vapeur du frein-vapeur. • D'autre part, le ciment étant faiblement capillaire et résistant à la diffusion de vapeur, il empêche également le séchage, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse, de la brique vers l'extérieur. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre l'isolant et l'ensemble formé par la brique de terre cuite et le mortier de chaux.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie de la paroi ancienne isolée est très faible. L'isolation par l'intérieur dégrade considérablement l'inertie de la paroi ancienne.</p>	
<p>Résistance thermique</p>	<p>La résistance thermique de la paroi ancienne isolée est fidèle aux performances attendues.</p>	

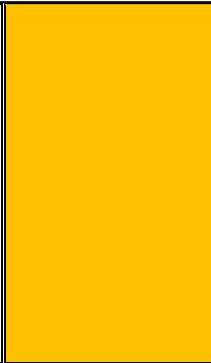
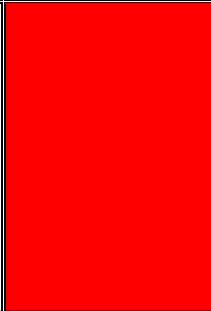
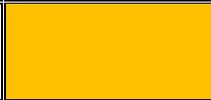
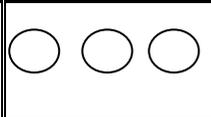
5.2. Solution E-P en ITI : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur

5.2.1. Description

		Extérieur		Paroi ancienne		Intérieur	
		« Etanche »				« Perméable »	
<p>E-P</p> 	Matériaux retenus (*)	Enduit ciment	Brique de terre cuite	Mortier chaux	Ouate de cellulose	Frein-vapeur hygrovariable	Plaque de plâtre
	Epaisseur (mm)	20	220	10	120	1	13
	Hygroscopicité	Elevée	Moyenne	Moyenne	Moyenne	-	Moyenne
	Résistance à la diffusion de vapeur	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne à Elevée	Faible
	Capillarité	Faible	Elevée	Elevée	Elevée	-	Elevée

() Les propriétés physiques de ces matériaux sont détaillées dans le cahier n°0*

5.2.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>La paroi parvient à trouver un nouvel équilibre hygrothermique mais les quantités d'eau mises en jeu sont plus importantes que dans la configuration de base.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le séchage de la brique de terre cuite vers l'ambiance extérieure est peu important puisque l'enduit extérieur ciment limite le passage de l'humidité en provenance de la brique de terre cuite, qu'elle soit sous forme liquide ou gazeuse. • D'autre part, le côté intérieur de la paroi composé de ouate de cellulose, d'un frein-vapeur hygrovariable et de plâtre étant relativement perméable à la vapeur d'eau et capillaire permet d'importants échanges d'humidité entre la paroi et l'ambiance intérieure, notamment un apport d'humidité provenant de l'intérieur. 	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>La capacité de séchage de la paroi est faible en présence d'infiltrations d'humidité : la brique de terre cuite atteint un nouvel équilibre hygrothermique qui est bien supérieur au niveau de la paroi de base.</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'enduit au ciment étant peu capillaire et résistant à la diffusion de vapeur, il empêche le séchage, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse, de la brique vers l'extérieur. • Il semblerait que le passage de l'humidité, sous forme gazeuse, de la brique vers l'ambiance intérieure ne soit pas suffisant du fait de la résistance à la diffusion de vapeur plutôt moyenne du frein-vapeur hygrovariable. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque modéré de condensation à l'interface entre l'ensemble formé par la brique de terre cuite et le mortier de chaux et l'isolant.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie de la paroi ancienne isolée est très faible. L'isolation par l'intérieur dégrade considérablement l'inertie de la paroi ancienne.</p>	
<p>Résistance thermique</p>	<p>La résistance thermique de la paroi ancienne isolée est fidèle aux performances attendues.</p>	

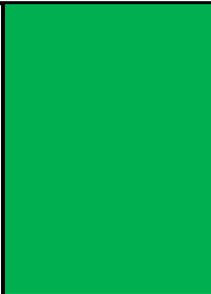
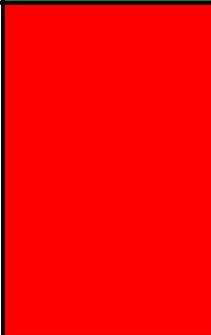
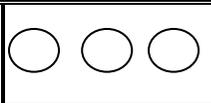
5.3. Solution P-E en ITI : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur

5.3.1. Description

		Extérieur	Paroi ancienne		Intérieur		
		« Perméable »			« Etanche »		
<p>P-E</p>	Matériaux retenus (*)	Enduit chaux	Brique de terre cuite	Mortier chaux	Laine de roche	Frein-vapeur	Plaque de plâtre et papier peint vinyle
	Epaisseur (mm)	20	220	20	120	1	13
	Hygroscopicité	Elevée	Moyenne	Moyenne	Faible	-	Moyenne
	Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Elevée	Moyenne
	Capillarité	Moyenne	Elevée	Elevée	Faible	-	Moyenne

() Les propriétés physiques de ces matériaux sont détaillées dans le cahier n°0*

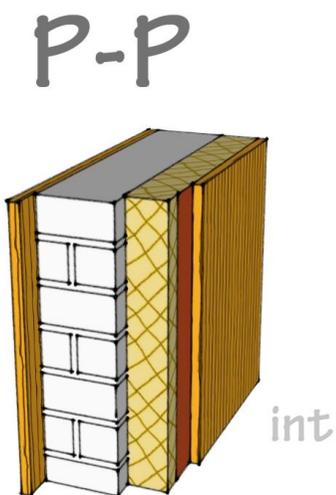
5.3.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>Par rapport à la configuration de base, la quantité d'eau moyenne est sensiblement la même.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le séchage de la brique de terre cuite vers l'ambiance intérieure est peu important, puisque la laine de roche interdit le passage de l'humidité sous forme liquide vers le frein-vapeur, qui lui-même l'interdit sous forme à la fois liquide et gazeuse, tout comme le papier peint vinyle. • Cependant, la chaux semble pouvoir gérer la quantité d'humidité provenant de l'ambiance extérieure. De plus, la chaux permet l'évacuation de l'eau contenue dans la brique de terre cuite. 	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>La capacité de séchage de la paroi est faible en présence d'infiltrations d'humidité : la brique de terre cuite atteint un nouvel équilibre hygrothermique qui est bien supérieur au niveau de la paroi de base.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le passage de l'humidité, sous forme liquide et gazeuse, de la brique vers l'ambiance intérieure est impossible du fait de la faible capillarité de la laine de roche et de la forte résistance à la diffusion de vapeur du frein-vapeur. • Malgré ses propriétés capillaires moyennes et sa faible résistance à la diffusion de vapeur, l'enduit à la chaux ne parvient pas à évacuer vers l'extérieur toute l'humidité, qui s'accumule alors dans la brique. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre l'isolant et l'ensemble formé par la brique de terre cuite et le mortier de chaux.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie de la paroi ancienne isolée est très faible. L'isolation par l'intérieur dégrade considérablement l'inertie de la paroi ancienne.</p>	
<p>Résistance thermique</p>	<p>La résistance thermique de la paroi ancienne isolée est fidèle aux performances attendues.</p>	

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

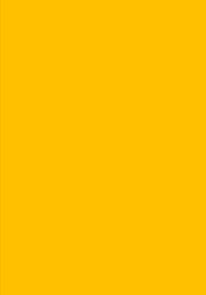
5.4.1. Description

	Extérieur « Perméable »	Paroi ancienne		Intérieur « Perméable »		
Matériaux retenus (*)	Enduit chaux	Brique de terre cuite	Mortier chaux	Ouate de cellulose	Frein-vapeur hygrovariable	Plaque de plâtre
Epaisseur (mm)	20	220	20	120	1	13
Hygroscopicité	Elevée	Moyenne	Moyenne	Moyenne	-	Moyenne
Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne à Elevée	Faible
Capillarité	Moyenne	Elevée	Elevée	Elevée	-	Elevée

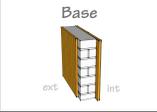
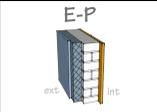
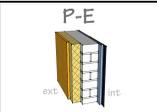
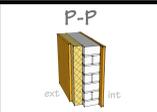
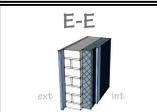
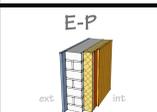
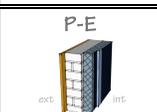
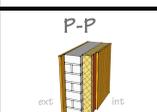


() Les propriétés physiques de ces matériaux sont détaillées dans le cahier n°0*

5.4.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique

<p>Quantité d'eau</p>	<p>Par rapport à la configuration de base, la quantité d'eau diminue sensiblement.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le frein-vapeur hygrovariable permet des échanges importants d'humidité entre la paroi et l'ambiance intérieure, amenant de l'humidité provenant de l'intérieur mais évacuant également cette humidité vers l'intérieur lorsque celle-ci est en excès. • De plus, la chaux semble pouvoir gérer la quantité d'humidité provenant de l'ambiance extérieure tout en évacuant convenablement l'éventuel excès d'eau stocké dans la brique. 	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>La capacité de séchage de la paroi est moyenne en présence d'infiltrations d'humidité : la quantité d'eau augmente sensiblement dans la brique de terre cuite pour atteindre un nouvel équilibre hygrothermique. La paroi sèche correctement chaque été mais le niveau moyen reste tout de même élevé.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le passage de l'humidité, sous forme gazeuse, de la brique vers l'ambiance intérieure est limité du fait de la résistance à la diffusion de vapeur plutôt moyenne du frein-vapeur hygrovariable. • Mais d'autre part, l'enduit à la chaux facilite le passage de l'humidité, à l'état liquide et gazeux, de la brique vers l'ambiance extérieure. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre l'isolant et l'ensemble formé par la brique de terre cuite et le mortier de chaux.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie de la paroi ancienne isolée est très faible. L'isolation par l'intérieur dégrade considérablement l'inertie de la paroi ancienne.</p>	
<p>Résistance thermique</p>	<p>La résistance thermique de la paroi ancienne isolée est fidèle aux performances attendues.</p>	

6. Tableau de synthèse et conclusions

Murs en brique de terre cuite		Quantité d'eau	Capacité de séchage	Condensation	Inertie thermique	Résistance thermique
Base					● ● ●	
Isolation par l'extérieur					● ● ●	
					● ● ●	
					● ● ●	
					● ● ●	
					○ ○ ○	
Isolation par l'intérieur					○ ○ ○	
					○ ○ ○	
					○ ○ ○	
					○ ○ ○	

De manière générale, ces résultats montrent que, du point de vue hygrothermique, **l'isolation par l'extérieur est préférable à l'isolation par l'intérieur :**

- l'inertie thermique de la paroi est mieux préservée ;
- le risque de condensation est plus faible ;
- la quantité d'eau présente dans la brique est plus faible.

Parmi les solutions d'isolation par l'extérieur, les configurations P-x, perméables à la vapeur d'eau et capillaires côté extérieur¹, sont à privilégier.

En effet, bien qu'a priori, en l'absence d'infiltrations d'humidité, toutes les solutions d'isolation par l'extérieur présentent une "quantité d'eau" faible, on observe que les configurations « étanches côté extérieur » ont du mal à évacuer l'excès d'eau dû à des infiltrations (critère "capacité de séchage").

Dans le cas d'une isolation par l'intérieur, la configuration P-P, perméable à la vapeur d'eau et capillaire côtés intérieur et extérieur², est à privilégier.

Ceci est valable si un soin particulier a été porté à la mise en œuvre afin de prévenir toute infiltration d'humidité (condensation de vapeur, infiltration d'eau de pluie, remontées capillaires...). En effet, en cas de surplus d'eau important, même les cas les plus perméables à la vapeur d'eau et les plus capillaires n'arrivent pas à évacuer ce surplus convenablement.

¹ Illustré ici par une isolation en fibre de bois et un enduit extérieur à la chaux

² Illustré ici par un enduit chaux à l'extérieur et une isolation en ouate de cellulose, un frein-vapeur hygrovariable et un enduit plâtre à l'intérieur

7. 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.

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 DEFENSE

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