

HYGROBA

Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes



CAHIER N°1 : MURS EN TERRE CRUE



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 terre crue	5
1.1. Le pisé	5
1.2. La bauge	8
1.3. L'adobe	9
2. Conditions de l'étude	10
2.1. Configurations testées	10
2.2. Critères d'analyse	11
3. Configuration de base	14
3.1. Description	14
3.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi	15
4. Isolation thermique par l'extérieur (ITE)	16
4.1. Solution E-E en ITE : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur	16
4.2. Solution E-P en ITE : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur	18
4.3. Solution P-E en ITE : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur	20
4.4. Solution P-P en ITE : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur	22
5. Isolation thermique par l'intérieur (ITI)	24
5.1. Solution E-E en ITI : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur	24
5.2. Solution E-P en ITI : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur	26
5.3. Solution P-E en ITI : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur	28
5.4. Solution P-P en ITI : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur	30
6. Tableau de synthèse et conclusions	32
7. Limites de l'étude	34

H Y G R O B A

Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

1. Caractéristiques principales des murs en terre crue

Les constructions en terre crue représentent en France environ 15% de l'ensemble du patrimoine architectural. Les bâtiments en pisé se trouvent principalement dans la Région Rhône-Alpes.

Les constructions en adobe (briques en terre crue) se concentrent dans le Sud-ouest, tandis que la bauge est surtout présente en Bretagne. Le torchis, dans les maisons en pan-de-bois, est caractéristique du Nord, de l'Alsace et de la région Midi-Pyrénées.

1.1. Le pisé

1.1.1. Répartition géographique

La France possède un riche patrimoine de constructions en pisé. De la Champagne à l'Isère, en passant par l'Auvergne, le Limousin, la Loire et la vallée de la Garonne, on peut admirer des constructions vieilles de plusieurs siècles. La plus forte concentration d'anciens bâtiments en pisé en France se trouve dans le Bas-Dauphiné dans la région Rhône-Alpes.



Grange en pisé - Source : Maisons Paysannes de France

1.1.2. Le matériau

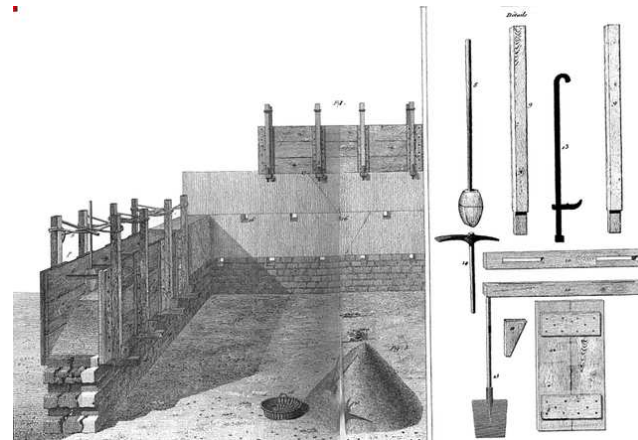
Rôle	Mini	Appellation	Maxi
Liant		Argiles	2 µm
	2 µm	Silt	20 µm
Agrégat	20 µm	Sables fins	0,2 mm
	0,2 mm	Sables grossiers	2 mm
	2 mm	Graviers	20 mm
	20 mm	Cailloux	50 mm

La terre de pisé est directement extraite du sol, sur place ou à proximité du chantier, et elle est ensuite broyée et/ou tamisée. La terre est prélevée sous la couche végétale, riche en matières organiques.

Le pisé est constitué d'une terre relativement uniforme (non stabilisée), d'une granulométrie généralement comprise entre 0 et 45 mm. Elle est composée d'une proportion variable de graviers, sables, silts (appelés aussi limons) et argiles, en allant du plus gros au plus fin. Mais on trouve aussi des terres à pisé plus caillouteuses. C'est la fraction argileuse qui fait office de liant avec les autres composants granulaires, et il n'y a donc pas de liant hydraulique ou de stabilisation avec des fibres végétales.

1.1.3. La mise en œuvre

La construction en pisé consiste schématiquement à damer de la terre entre des banches pour élever des murs. Pisé est du vieux français, « piser » signifiant broyer et par extension « battre la terre ». Cette opération peut être réalisée manuellement à l'aide d'un pisolier ou, aujourd'hui le plus souvent, mécaniquement avec un fouloir pneumatique. La mise en œuvre s'effectue en déposant entre des banches par couches successives (10 à 15 cm maximum) des lits de terre crue peu humidifiée qui sont fortement damés. Cette opération est réalisée en respectant des règles de mise en œuvre qui varient selon les régions.



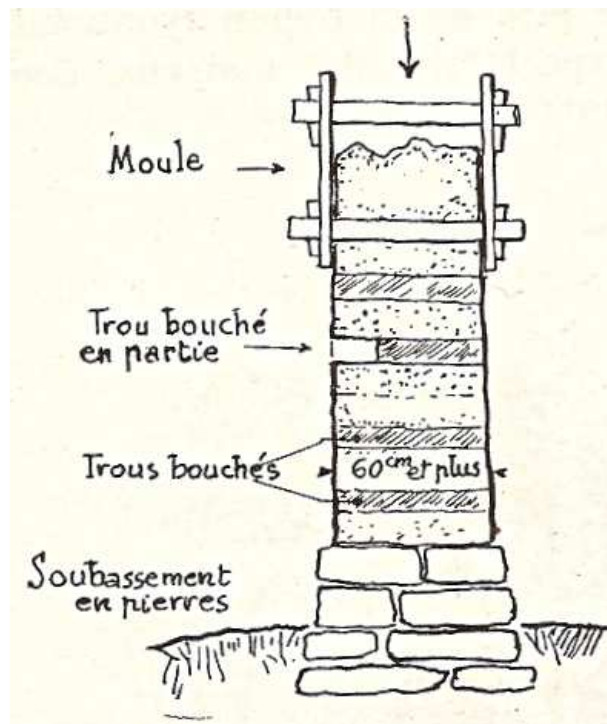
Les outils pour réaliser le pisé –

Source : Jean-Baptiste Rondelet, 1743-1829

H Y G R O B A

Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

Dans les bâtiments traditionnels, les murs sont généralement épais de 40 à 50 cm, ou plus, et s'amincissent en s'élevant afin d'économiser matériau et peine. Le soubassement des ouvrages en pisé est généralement réalisé en pierres, briques ou galets, afin de se protéger des remontées d'humidité. La hauteur du soubassement, généralement entre 25 et 60 cm, varie en fonction de la pluviométrie de la région. Une avancée de toiture permet de protéger les façades des intempéries et de l'eau de ruissellement venant du toit. Les solives et poutres des planchers d'étages s'appuient sur le mur par l'intermédiaire d'une pièce de répartition des charges. La charpente du toit repose le plus souvent sur des sablières. Les ouvertures, ainsi que les angles, sont renforcés par l'emploi de matériaux plus résistants aux chocs que le pisé (pierre, brique, bois) ou par l'intégration de mortier de chaux lors de la mise en œuvre du matériau. Les façades peuvent être enduites ou pas, de préférence par des enduits à base d'une chaux faiblement hydraulique. Les murs de pisé non recouverts d'enduit laissent souvent voir les couches de mortier de chaux qui servent à améliorer la cohésion entre les différentes banchées. On y voit aussi souvent les trous (les clefs) qui servaient à la fixation de l'échafaudage et des banches.



Structure d'un mur en pisé – Source : Maisons Paysannes de France

1.2. La bauge

La bauge est la technique la plus ancienne de construction en terre crue. En France, cette technique constructive a été très employée aux XVIIIe et XIXe siècles. Aujourd'hui les constructions en bauge sont beaucoup moins présentes en France, à part quelques petites concentrations en Bretagne, en Vendée, dans le Poitou et en Normandie. En Europe, la bauge est surtout emblématique des maisons rurales en Angleterre, sous l'appellation *cob*.

À première vue les murs en bauge ressemblent aux murs en pisé, « monolithiques », avec la différence que les murs en bauge sont généralement plus épais, allant de 50 à 80 cm. Souvent, la terre est structurée avec du sable, des agrégats et des fibres végétales, surtout la paille. Les fibres peuvent avoir une longueur jusqu'à 50cm. En Angleterre la bauge consiste en environ 80% d'agrégats et de sable pour 20% de terre argileuse, mais en France la terre était souvent utilisée telle quelle avec ses agrégats « naturels » en ajoutant de l'eau et de la paille pour arriver à un mélange relativement humide et plastique. Comme pour le pisé, les soubassements sont en général montés en pierre ou en galets. Les murs de bauge se montent par simple empilement des mottes de terre argileuse à la fourche qui sont tassés avec une « trique » en bois pour faire des levées de 60 à 90 cm. Les débords sont tassés et puis, après le premier séchage d'environ 2 à 3 semaines, dressés à la paroir (une bêche plate tranchante). Pour le dressage, le maçon monte sur la dernière levée et taille ainsi les angles et l'aplomb du mur.



Montage d'un mur en bauge – Source : Maisons Paysannes de France

1.3. L'adobe

Le patrimoine des constructions en adobe ou en briques de terre crue en France se trouve majoritairement dans le Sud-ouest de la France, dans la Champagne et en Auvergne. L'adobe est une brique de terre crue moulée, puis séchée entre 3 et 4 semaines. Par rapport aux autres techniques traditionnelles de construction en terre, la mise en œuvre de l'adobe est plus rapide et comparable à des matériaux industriels comme la brique en terre cuite. L'adobe est souvent associé à la brique de terre cuite ou à la pierre, en maçonnerie mixte. Dans une même construction, la brique crue était utilisée pour les murs de refends et les murs extérieurs non exposés aux intempéries, et la brique cuite pour les murs plus exposés aux vents dominants. Une autre utilisation « mixte » de l'adobe est le remplissage des ossatures en pan-de-bois, en lieu du torchis ou de la brique en terre cuite. Les ouvertures et les angles des parois en adobe sont généralement encadrés par des ouvrages en terre cuite avec des linteaux en bois ou en maçonnerie.

La fabrication d'adobes repose sur l'utilisation de terre argileuse, parfois mélangée à du sable et des fibres végétales dans des proportions variables selon la région et le type de terre utilisée. Tous les adobes n'étaient pas structurés avec des fibres, ils pouvaient n'être que stabilisés avec du sable et du gravier contenus dans la terre. Les briques étaient en général préparées dans les moules en bois rectangulaires et démoulées immédiatement. Dans le Sud-ouest, la dimension courante est 40x20x8,5. En Champagne, où la terre est plus calcaire, les adobes sont plus petites, souvent 29x14x12.



Maison en adobe – *Source* : Maisons Paysannes de France

Généralement la construction en adobe, réalisée selon les techniques habituelles de maçonnerie, employait un mortier de terre dont la composition était souvent identique à celle des briques. Des murs porteurs de 30 à 50 cm d'épaisseur de plusieurs étages sont ainsi réalisés avec des briques en terre crue. Les éléments de charpente, ainsi que les poutres et planchers, reposent sur les murs en adobes par l'intermédiaire d'éléments en bois qui évitent le poinçonnement. Les murs en adobes sont généralement recouverts d'un enduit à base de chaux ou de terre, mais peuvent aussi rester apparents, y compris à l'extérieur.

2. Conditions de l'étude

2.1. Configurations testées

Le présent cahier permet une analyse de différentes solutions d'isolation d'un mur en terre crue (mur en pisé banché), 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.

NB : Les conditions de simulation et les caractéristiques des matériaux considérés sont détaillés 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.

2.2.1. 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)

2.2.2. 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)

2.2.3. Condensation interne

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%)

2.2.4. Inertie thermique du mur

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

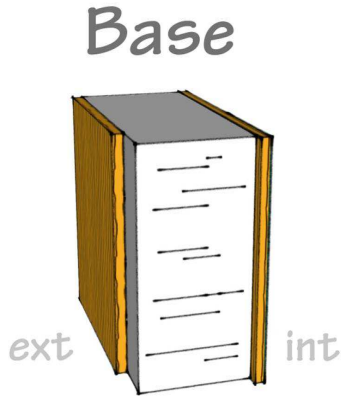
2.2.5. Résistance thermique du mur

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

3. Configuration de base

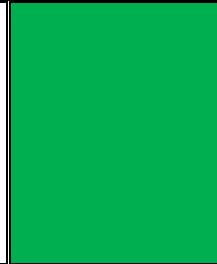
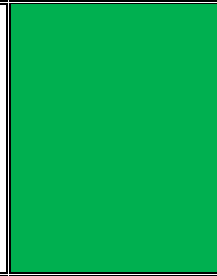

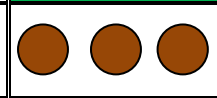

3.1. Description

La configuration de base correspond à un mur traditionnel en pisé, enduit à la chaux à l'intérieur et à l'extérieur.

		Extérieur	Paroi ancienne	Intérieur
	Matériaux retenus (*)	Enduit chaux	Pisé	Enduit chaux
	Epaisseur (mm)	20	500	20
	Hygroscopicité	Elevée	Elevée	Elevée
	Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Moyenne	Faible
	Capillarité	Moyenne	Elevée	Moyenne

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

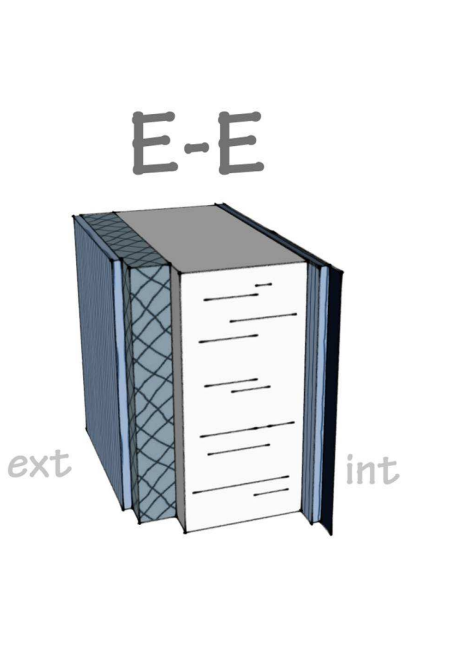
3.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

Quantité d'eau	<p>La quantité d'eau dans la configuration de base est faible : la teneur en eau du pisé 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 pisé 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>	
Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité	<p>Pour ce cas particulier, nous avons modélisé des infiltrations d'humidité entre l'enduit à la chaux extérieur et le pisé d'une part, et entre le pisé et l'enduit à la chaux intérieur d'autre part.</p> <p>Dans les deux cas, la capacité de séchage de la paroi en présence d'infiltrations d'humidité est élevée : la teneur en eau du pisé ne subit aucune augmentation.</p> <p>L'enduit à la chaux facilite le passage de l'humidité, sous forme liquide ou gazeuse, du pisé vers l'ambiance extérieure et vers l'ambiance intérieure.</p>	
Condensation	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre le pisé et l'enduit à la chaux intérieur et entre le pisé et l'enduit à la chaux extérieur.</p>	
Inertie thermique	<p>L'inertie de la paroi dans sa configuration de base est forte.</p>	
Résistance thermique	<p>La résistance thermique du mur en pisé dans sa configuration de base est inférieure aux performances attendues.</p>	

4. Isolation thermique par l'extérieur (ITE)

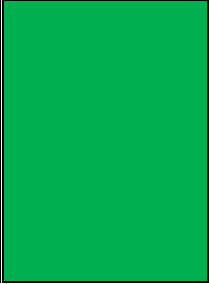
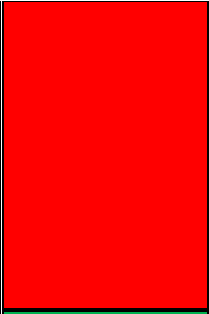

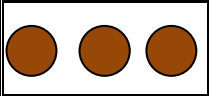

4.1. Solution E-E en ITE : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « étanche à l'humidité » côté intérieur

4.1.1. Description

	Extérieur « Etanche »		Paroi ancienne	Intérieur « Etanche »
	Matériaux retenus (*)	Enduit organique	Polystyrène	Pisé
Epaisseur (mm)	10	120	500	13
Hygroscopicité	Moyenne	Faible	Elevée	Moyenne
Résistance à la diffusion de vapeur	Elevée	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Capillarité	Faible	Faible	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

Quantité d'eau	<p>Par rapport à la configuration de base, la quantité d'eau diminue dans le pisé.</p> <p>Le pisé est en effet protégé de l'humidité :</p> <ul style="list-style-type: none"> • de l'ambiance intérieure par la plaque de plâtre et le papier peint vinyle, qui limitent son passage sous forme liquide et gazeuse, • de l'ambiance extérieure grâce au polystyrène et à l'enduit organique, qui empêchent l'humidité, qu'elle soit sous forme liquide ou gazeuse, de pénétrer plus en avant dans le pisé. 	
Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité	<p>La capacité de séchage de la paroi en présence d'infiltrations d'humidité est faible : le pisé n'atteint pas de nouvel équilibre hygrothermique.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le passage de l'humidité, sous forme liquide et gazeuse, du pisé 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 liquide et gazeuse, du pisé vers l'ambiance intérieure, du fait de leur résistance à la diffusion de vapeur et de leur capillarité moyennes. 	
Condensation	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre l'isolant et le pisé.</p>	
Inertie thermique	<p>L'inertie de la paroi ancienne isolée est forte.</p> <p>L'isolation par l'extérieur préserve l'inertie de la paroi ancienne.</p>	
Résistance thermique	<p>La résistance thermique de la paroi ancienne isolée est fidèle aux performances attendues.</p>	

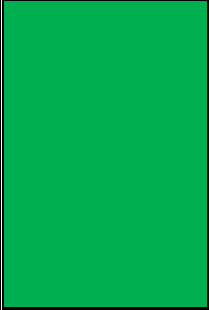
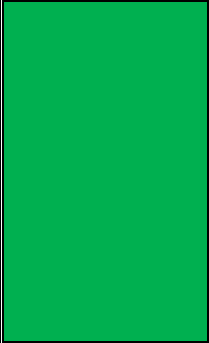

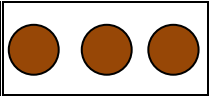

4.2. Solution E-P en ITE : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur

4.2.1. Description

	Extérieur « Etanche »		Paroi ancienne	Intérieur « Perméable »	
	Matériaux retenus (*)	Enduit organique	Polystyrène	Pisé	Enduit chaux
	Epaisseur (mm)	10	120	500	20
	Hygroscopicité	Moyenne	Faible	Elevée	Elevée
	Résistance à la diffusion de vapeur	Elevée	Moyenne	Moyenne	Faible
	Capillarité	Faible	Faible	Elevée	Moyenne

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

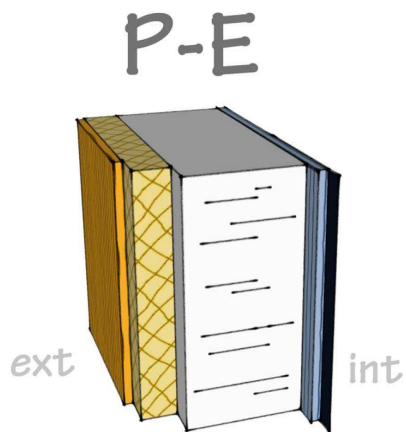
4.2.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>Par rapport à la configuration de base, la quantité d'eau diminue dans le pisé.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le pisé est en effet protégé de l'humidité de l'ambiance extérieure grâce au polystyrène et à l'enduit organique, qui empêchent l'humidité, qu'elle soit liquide ou gazeuse, de pénétrer plus en avant dans le pisé. • La quantité d'humidité provenant de l'ambiance intérieure semble pouvoir être facilement gérée par la paroi, puisque l'enduit à la chaux autorise le passage de l'humidité sous forme liquide et gazeuse de l'ambiance intérieure vers le pisé, mais également en sens inverse, ce qui favorise le séchage du pisé vers l'ambiance intérieure. 	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>La capacité de séchage de la paroi en présence d'infiltrations d'humidité est élevée : la teneur en eau du pisé ne subit aucune augmentation.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le passage de l'humidité, sous forme liquide et gazeuse, du pisé 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. • La forte capillarité et la résistance à la diffusion de vapeur moyenne du pisé permettent, par contre, à l'humidité de transiter en son sein et de se diriger vers le côté où le séchage est le plus facile, c'est-à-dire, ici, le côté intérieur. En effet, l'enduit à la chaux facilite le passage de l'humidité, sous forme liquide et gazeuse, du pisé vers l'ambiance intérieure. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre l'isolant et le pisé.</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

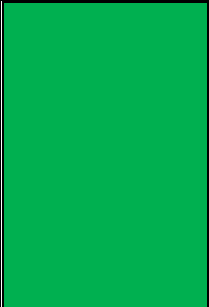
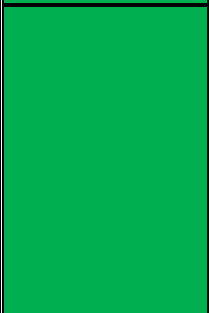

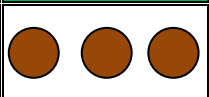

4.3.1. Description

	Extérieur « Perméable »		Paroi ancienne	Intérieur « Etanche »
	Enduit chaux	Fibre de bois		
Matériaux retenus (*)	Enduit chaux	Fibre de bois	Pisé	Plaque de plâtre et papier peint vinyle
Epaisseur (mm)	10	120	500	13
Hygroscopicité	Elevée	Elevée	Elevée	Moyenne
Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne
Capillarité	Moyenne	Faible	Elevée	Moyenne



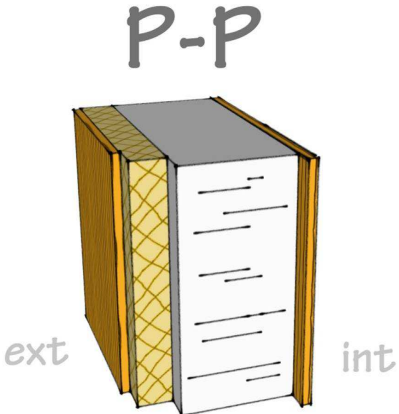
(*) Les propriétés physiques de ces matériaux sont détaillées dans le « cahier n°0 »

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 le pisé.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le pisé est en effet protégé de l'humidité de l'ambiance intérieure par la plaque de plâtre et le papier peint vinyle, qui limitent son passage sous forme liquide et gazeuse. • La quantité d'humidité provenant de l'ambiance extérieure par l'intermédiaire de l'enduit à la chaux et de la fibre de bois semble pouvoir être facilement gérée par la paroi. En effet, ces matériaux autorisent le passage de l'humidité, surtout sous forme gazeuse, de l'ambiance extérieure vers le pisé, mais aussi en sens inverse, ce qui favorise le transfert de la vapeur d'eau du pisé vers l'ambiance extérieure. 	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>La capacité de séchage de la paroi en présence d'infiltrations d'humidité est élevée : la teneur en eau du pisé diminue.</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, du pisé vers l'ambiance intérieure, du fait de leur résistance à la diffusion de vapeur et de leur capillarité moyennes. • Le passage de l'humidité, sous forme gazeuse, du pisé 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 le pisé.</p>	
<p>Inertie</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>	

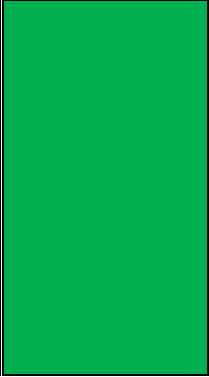
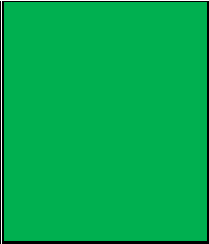

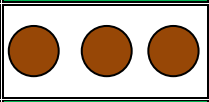

4.4. Solution P-P en ITE : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur

4.4.1. Description

	Extérieur « Perméable »		Paroi ancienne	Intérieur « Perméable »	
	Matériaux retenus (*)	Enduit chaux	Fibre de bois	Pisé	Enduit chaux
	Epaisseur (mm)	10	120	500	20
	Hygroscopicité	Elevée	Elevée	Elevée	Elevée
	Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Faible	Moyenne	Faible
	Capillarité	Moyenne	Faible	Elevée	Moyenne

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

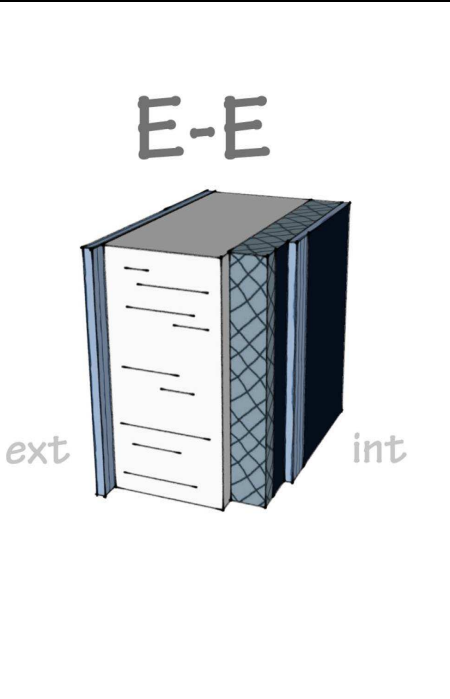
4.4.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>Par rapport à la configuration de base, la quantité d'eau diminue dans le pisé.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La quantité d'humidité provenant de l'ambiance intérieure semble pouvoir être facilement gérée par la paroi, puisque l'enduit à la chaux autorise le passage de l'humidité sous forme liquide et gazeuse de l'ambiance intérieure vers le pisé, mais également en sens inverse, ce qui favorise le séchage du pisé vers l'ambiance intérieure. • De même, la quantité d'humidité provenant de l'ambiance extérieure par l'intermédiaire de l'enduit à la chaux et de la fibre de bois semble pouvoir être facilement gérée par la paroi. En effet, ces matériaux autorisent le passage de l'humidité, surtout sous forme gazeuse, de l'ambiance extérieure vers le pisé, mais aussi en sens inverse, ce qui favorise le transfert de la vapeur d'eau du pisé vers l'ambiance extérieure. 	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>La capacité de séchage de la paroi en présence d'infiltrations d'humidité est élevée : la teneur en eau du pisé diminue.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le passage de la vapeur d'eau, du pisé 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. • De même, l'enduit à la chaux facilite le passage de l'humidité, sous forme liquide et gazeuse, du pisé vers l'ambiance intérieure. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre l'isolant et le pisé.</p>	
<p>Inertie</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

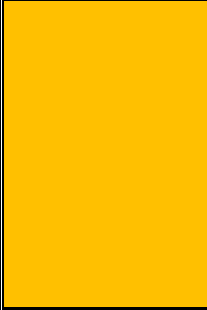
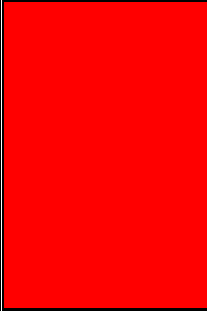

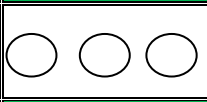



The diagram shows a cross-section of a wall labeled 'E-E'. The exterior side (ext) has a thin layer of cement render. The main wall is made of thick masonry (pisé). The interior side (int) features a layer of rock wool insulation, a vapor barrier, and a final layer of plaster with vinyl paint.

	Extérieur « Etanche »	Paroi ancienne	Intérieur « Etanche »		
Matériaux retenus (*)	Enduit ciment	Pisé	Laine de roche	Frein- vapeur	Plaque de plâtre et papier peint vinyle
Epaisseur (mm)	20	500	120	1	13
Hygroscopicité	Elevée	Elevée	Faible	-	Moyenne
Résistance à la diffusion de vapeur	Moyenne	Moyenne	Faible	Elevée	Moyenne
Capillarité	Faible	Elevée	Faible	-	Moyenne

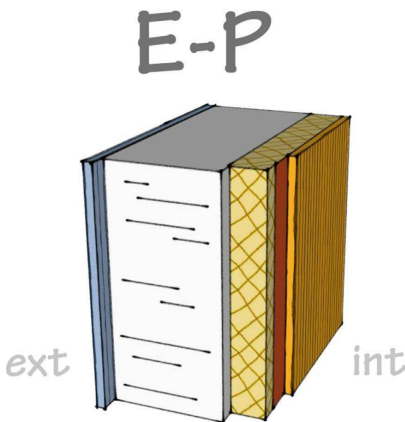
(*) Les propriétés physiques de ces matériaux sont détaillées dans le « cahier n°0 »

5.1.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>La teneur en eau dans le pisé ne parvient pas à se stabiliser et la quantité d'eau mise en jeu est légèrement plus importante que dans la configuration de base.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le séchage du pisé vers l'ambiance intérieure est faible, puisque la laine de roche, le frein-vapeur et le papier peint vinyle interdisent le passage de l'humidité sous forme liquide et gazeuse du pisé vers l'ambiance intérieure. • Mais ce séchage est également faible vers l'ambiance extérieure puisque l'enduit au ciment empêche le passage de l'humidité en provenance du pisé, 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 en présence d'infiltrations d'humidité est faible : le pisé n'atteint pas de nouvel équilibre hygrothermique.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le passage de l'humidité, sous forme liquide et gazeuse, du pisé 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, l'enduit au ciment étant faiblement capillaire et résistant à la diffusion de vapeur, il empêche également le séchage, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse, du pisé vers l'ambiance extérieure. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre le pisé et l'isolant.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie thermique de la paroi par l'intérieur est très faible. L'isolation par l'intérieur réduit considérablement l'inertie thermique de la paroi ancienne.</p>	
<p>Résistance thermique</p>	<p>La résistance thermique de la paroi est fidèle aux performances attendues.</p>	

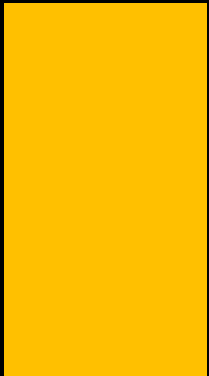
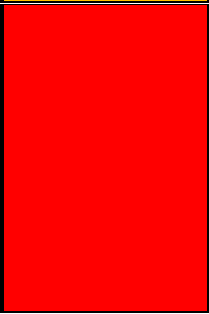

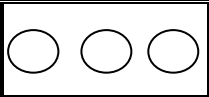

5.2. Solution E-P en ITI : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur

5.2.1. Description

		Extérieur	Paroi	Intérieur		
		« Etanche »	ancienne	« Perméable »		
 <p>E-P</p>	Matériaux retenus (*)	Enduit ciment	Pisé	Ouate de cellulose	Frein-vapeur hygro-variable	Plaque de plâtre
	Epaisseur (mm)	20	500	120	1	13
	Hygroscopicité	Elevée	Elevée	Moyenne	-	Moyenne
	Résistance à la diffusion de vapeur	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne à Elevée	Faible
	Capillarité	Faible	Elevée	Elevée	-	Elevée

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

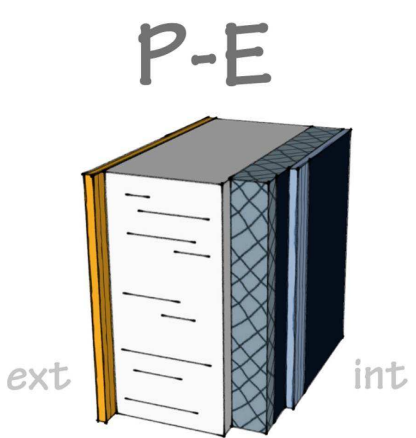
5.2.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>La teneur en eau dans le pisé ne parvient pas à se stabiliser et la quantité d'eau mise en jeu est légèrement plus importante que dans la configuration de base.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le séchage du pisé vers l'ambiance extérieure est faible puisque l'enduit au ciment empêche le passage de l'humidité en provenance du pisé, qu'elle soit sous forme liquide ou gazeuse. • D'autre part, le frein-vapeur hygro-variable, bien que plutôt résistant à la diffusion de vapeur, autorise le passage d'une quantité de vapeur non négligeable de l'ambiance intérieure vers le pisé, que la paroi a par la suite du mal à évacuer. Pourtant, la ouate de cellulose et la plaque de plâtre sont très capillaires et très peu résistantes à la diffusion de vapeur, ce qui devrait favoriser le séchage vers l'ambiance intérieure. 	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>La capacité de séchage de la paroi en présence d'infiltrations d'humidité est faible : le pisé n'atteint pas de nouvel équilibre hygrothermique.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le passage de l'humidité, sous forme gazeuse, du pisé vers l'ambiance intérieure est limité du fait de la résistance à la diffusion de vapeur plutôt élevée du frein-vapeur hygro-variable. • D'autre part, l'enduit au ciment étant peu capillaire et résistant à la diffusion de vapeur, il empêche également le séchage, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse, du pisé vers l'extérieur. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque modéré de condensation à l'interface entre le pisé et l'isolant. Cependant, et bien qu'elle n'atteigne pas, même au bout de 10 ans, une valeur de 90 %, l'humidité relative à cette interface ne cesse d'augmenter.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie thermique de la paroi par l'intérieur est très faible. L'isolation par l'intérieur réduit considérablement l'inertie thermique de la paroi ancienne.</p>	
<p>Résistance thermique</p>	<p>La résistance thermique de la paroi 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

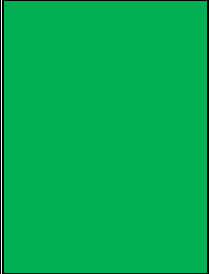
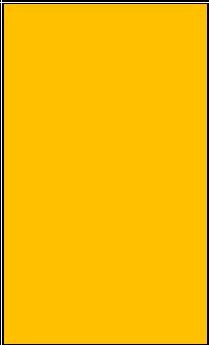

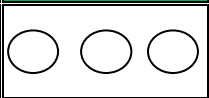
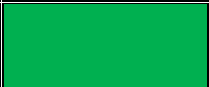
5.3.1. Description

	Extérieur « Perméable »		Paroi ancienne	Intérieur « Etanche »		
	Matériaux retenus (*)	Enduit chaux		Laine de roche	Frein- vapeur	Plaque de plâtre et papier peint vinyle
Epaisseur (mm)	20	500	120	1	13	
Hygroscopicité	Elevée	Elevée	Faible	-	Moyenne	
Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Moyenne	Faible	Elevée	Moyenne	
Capillarité	Moyenne	Elevée	Faible	-	Moyenne	



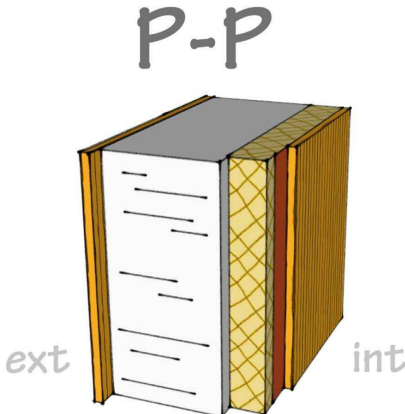
(*) Les propriétés physiques de ces matériaux sont détaillées dans le « cahier n°0 ».

5.3.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>La paroi parvient à trouver un nouvel équilibre hygrothermique mais les quantités d'eau mises en jeu sont légèrement plus importantes que dans la configuration de base.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le séchage du pisé vers l'ambiance intérieure est faible, puisque la laine de roche, le frein-vapeur et le papier peint vinyle interdisent le passage de l'humidité sous forme liquide et gazeuse du pisé vers l'ambiance intérieure. • Mais d'autre part, l'enduit à la chaux facilite le passage de l'humidité sous forme liquide et gazeuse, du pisé vers l'ambiance extérieure. 	
<p>Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité</p>	<p>La capacité de séchage de la paroi en présence d'infiltrations d'humidité est moyenne : la teneur en eau du pisé augmente légèrement mais se stabilise rapidement.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le passage de l'humidité, sous forme liquide et gazeuse, du pisé 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. • Toutefois, la forte capillarité et la résistance à la diffusion de vapeur moyenne du pisé permettent à l'humidité de transiter en son sein et de se diriger vers le côté où le séchage est le plus facile, c'est-à-dire, ici, le côté extérieur. En effet, la chaux facilite le passage de l'humidité, sous forme liquide ou gazeuse, du pisé vers l'ambiance extérieure. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre le pisé et l'isolant.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie thermique de la paroi est très faible. L'isolation par l'intérieur dégrade considérablement l'inertie thermique de la paroi ancienne.</p>	
<p>Résistance thermique</p>	<p>La résistance thermique de la paroi est fidèle aux performances attendues.</p>	

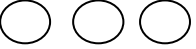
5.4. Solution P-P en ITI : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur

5.4.1. Description

 <p>P-P</p>		Extérieur « Perméable »	Paroi ancienne	Intérieur « Perméable »		
	Matériaux retenus (*)	Enduit chaux	Pisé	Ouate de cellulose	Frein-vapeur hygro-variable	Plaque de plâtre
	Epaisseur (mm)	20	500	120	1	13
	Hygroscopicité	Elevée	Elevée	Moyenne	-	Moyenne
	Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Moyenne	Faible	Moyenne à Elevée	Faible
	Capillarité	Moyenne	Elevée	Elevée	-	Elevée

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

5.4.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

Quantité d'eau	<p>La paroi parvient à trouver un nouvel équilibre hygrothermique mais les quantités d'eau mises en jeu sont légèrement plus importantes que dans la configuration de base.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La ouate de cellulose et la plaque de plâtre, très capillaires et peu résistantes à la diffusion de vapeur, favorise le séchage de l'humidité vers l'ambiance intérieure, et ce malgré la présence du frein-vapeur hygro-variable, plutôt résistant à la diffusion de vapeur. • L'enduit à la chaux facilite le passage de l'humidité, sous forme liquide ou gazeuse, du pisé vers l'ambiance extérieure. 	
Capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité	<p>La capacité de séchage de la paroi en présence d'infiltrations d'humidité est moyenne : la teneur en eau du pisé augmente légèrement mais se stabilise rapidement.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le passage de l'humidité, sous forme gazeuse, du pisé vers l'ambiance intérieure est limité du fait de la résistance à la diffusion de vapeur plutôt moyenne du frein-vapeur hygro-variable. • Mais d'autre part, l'enduit à la chaux facilite le passage de l'humidité, sous forme liquide ou gazeuse, du pisé vers l'ambiance extérieure. 	
Condensation	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre le pisé et l'isolant.</p>	
Inertie thermique	<p>L'inertie thermique de la paroi est très faible. L'isolation par l'intérieur dégrade considérablement l'inertie thermique de la paroi ancienne.</p>	
Résistance thermique	<p>La résistance thermique de la paroi est fidèle aux performances attendues.</p>	

6. Tableau de synthèse et conclusions

Murs en terre crue		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 de la paroi est mieux préservée ;
- le risque de condensation est plus faible ;
- la quantité d'eau présente dans le pisé est plus faible ;
- la capacité de séchage en présence d'infiltrations d'humidité est plus importante.

Parmi les solutions d'isolation par l'extérieur, les configurations x-P ou P-x, perméables à la vapeur d'eau et capillaires côté intérieur¹ ou côté extérieur² sont à privilégier.

Elles semblent nécessaires à la préservation de l'équilibre hygrothermique de la paroi ancienne, notamment en présence d'infiltrations d'humidité (critère « capacité de séchage »).

Dans le cas d'une isolation par l'intérieur, les configurations P-x, perméables à la vapeur d'eau et capillaires côté extérieur³ sont à privilégier.

Elles limitent en effet le risque de condensation et garantissent une meilleure préservation de l'équilibre hygrothermique de la paroi ancienne (critères « quantité d'eau » et « capacité de séchage »).

¹ Illustré dans l'étude par un enduit intérieur à la chaux.

² Illustré dans l'étude par une isolation extérieure en fibre de bois, avec enduit extérieur à la chaux.

³ Illustré dans l'étude par un enduit extérieur à la chaux.

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 des 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-t-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 : quels 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

Maitrise 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 Ranguéil - 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