

HYGROBA

Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes



CAHIER N°4 : MURS EN PIERRE DURE



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 pierre	3
1.1.	Répartition géographique	3
1.2.	Matériau et mis en œuvre	5
1.3.	Pathologies	7
2.	Conditions de l'étude	8
2.1.	Configurations testées	8
2.2.	Critères d'analyse	9
3.	Configuration de base	12
3.1.	Description	12
3.2.	Conséquences 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

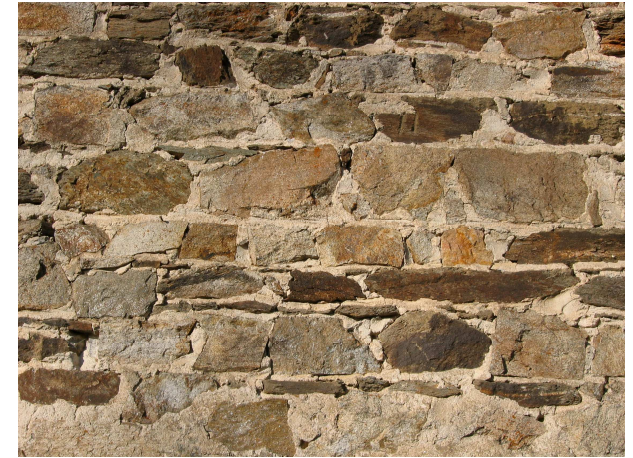
Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

1. Caractéristiques principales des murs en pierre

1.1. Répartition géographique

Il est difficile de donner une répartition régionale de la construction en pierre, parce qu'elle est présente sur tout le territoire, aussi bien dans les villes qu'à la campagne. Ces constructions sont aussi diversifiées que la provenance de la pierre et les gisements géologiques. Les différents types de murs en pierre construits à une même époque dépendent essentiellement des roches extraites dans les régions et non des techniques de construction. Ainsi, des murs construits avec des types de pierre semblables et dans différentes régions, ont généralement la même typologie constructive.

En règle générale, il existe 3 familles de pierres de construction, classées suivant l'origine géologique des rochers, soit magmatique (granits et basaltes), soit sédimentaire (calcaires et grès), soit métamorphique (ardoises et schistes). Les régions et les pays connus pour la maçonnerie en calcaire sont le Lot, la Bourgogne et la Provence. Les schistes et les granits sont beaucoup utilisés en Bretagne et dans les massifs montagneux, i.e. le Massif Central, les Alpes et les Pyrénées. La pierre tendre est très répandue dans la Vallée de la Loire, la région de Bordeaux et le pays d'Arles. L'Île-de-France connaît un grand patrimoine de maisons « meulières » construites avec ces pierres siliceuses dites « meulières ». Les murs bâtis de galets de rivière se trouvent majoritairement dans la Vallée du Rhône et de la Garonne.

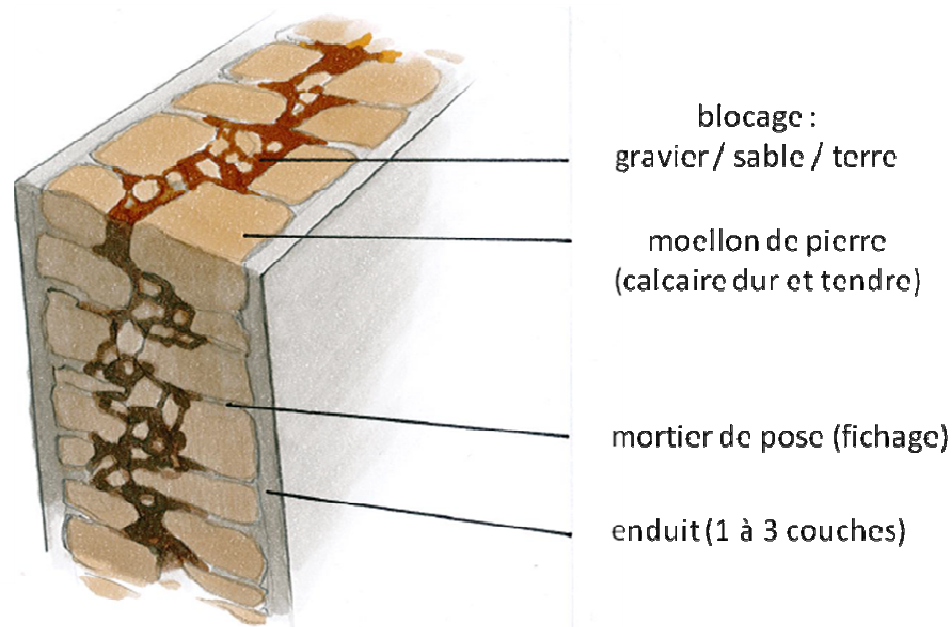


Variété types de pierre (Granit, Grès ferrugineux, Gneiss métamorphique) - Source : Maisons Paysannes de France

H Y G R O B A

Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

Au cours de l'évolution de la construction en pierre, la répartition des mortiers de chaux et la professionnalisation du métier de maçon et de tailleur de pierre, fait apparaître dans des villes des façades avec des appareillages plus grands et réguliers, faites de pierres taillées, le plus souvent accompagnée d'une architecture élaborée des façades embellies avec des détails et ornements importants, tels que les chaînes d'angle, corniches, bandeaux, jambages, encadrements, balcons etc. Cependant, pour notre étude, il n'est pas utile d'aborder ces éléments architecturaux.



Mur traditionnel en moellons à double appareil - *Source* : Maisons Paysannes de France

L'étude sur les bâtiments anciens du centre ancien de Grenoble (2010) montre que même dans les grandes villes les murs traditionnels à double appareil de moellons sont le plus souvent très hétérogènes et contiennent beaucoup de mortier ainsi que des pores remplis d'air. Dans le cas de murs à moellons en pierre calcaire dure, qui ne laisse pas passer de vapeur d'eau, les transferts d'humidité se font quasi-totalement à travers le mortier et les pores.

En milieu rural les bâtiments en pierre ont longtemps été réservés aux constructions coûteuses et importantes. Ce n'est qu'avec le développement des mortiers de chaux, à partir du 16^{ème} siècle, que le bâti en pierre se répandit à la campagne. D'abord dans les régions riches en calcaire, où les fours à chaux s'étaient multipliés, puis dans d'autres régions à partir du 18^{ème} siècle quand la chaux commença à être abordable. Les mortiers en terre, longtemps utilisés pour remplir les murs « à pierres sèches » ont été de plus en plus être stabilisés avec de la chaux. Progressivement la construction rurale en pierre a remplacé le pan-de-bois et le torchis, comme dans les villes auparavant.

1.2. Matériau et mis en œuvre

La qualité de la pierre de construction dépend beaucoup de l'origine rocheuse et de la technique d'extraction. La performance des murs varie en fonction des caractéristiques de la pierre : masse volumique (tendre ou dure), perméabilité et porosité, l'homogénéité (pierre pleine ou non), la gélivité, etc. En général les granites sont très durs, résistants et durables. Les basaltes, étant très denses également – ce qui rend leur taille délicate - sont imperméables à l'eau, inaltérables et résistent bien au gel. Les calcaires sont les plus utilisés parmi les roches sédimentaires. Suivant leur taux d'argile elles sont plus ou moins perméables à l'eau. Les calcaires purs, contenant peu d'argile et formés de coquilles sont très résistants. Les tufs calcaires (*travertins*) sont tendres à l'extraction mais durcissent vite. Ils ont un grain très fin et sont connus pour leurs jolies couleurs et patines.

Roches sédimentaires	Roches plutoniques – volcaniques	Roches métamorphiques
Argiles	Granite	Ardoises, schistes, gneiss
Marnes	Basalte	
Calcaires calcites et dolomites (tuf)		Marbres
Siliceuses (grès, meulières)		Quartz

Les grès tendres sont perméables et d'une qualité médiocre, mais les grès durs donnent une pierre de qualité. Les « meulières » sont des moellons de roches siliceuses relativement légères et cavernueuses avec une grande porosité fermée, qui donne une relative isolation thermique. Généralement, les schistes et ardoises ont une forte résistance à la diffusion de vapeur liées au caractère

crystallin et feuilleté des roches métamorphiques¹. Etant abondants dans beaucoup de régions ils sont très répandus dans la construction en pierre.

Parallèlement à la diffusion de la construction en pierre, les mortiers de chaux se sont répandus à la campagne au travers d'un réseau de maçons de village qui gérait les fours à chaux et qui exploitait de plus en plus de carrières pour y extraire des pierres. Les pierres de ramassage (épierrement de champs), de réemploi ou d'éboulis étaient le plus souvent remplacées par des moellons de meilleure qualité venant des carrières. Le tri permettait de choisir les moellons utilisées pour la construction avec peu de défauts, fissures (dits 'fils' ou 'poils'), morceaux d'argiles ('bousins') ou parties dures ('clous' ou 'rognons') qui rendaient la taille difficile.

Il existe différents types de moellons, suivant la qualité et la précision de taille :

- le moellon brut n'est pas travaillé;
- le moellon ébauché est grossièrement débité et retaillé sur chantier;
- le moellon smillé a des parements réguliers;
- le moellon piqué a des parements réguliers et des arêtes dressées;
- le moellon d'appareil ressemble à la pierre de taille.



Exemples de mises en œuvre de moellons de pierre - Source : Maisons Paysannes de France

¹ Strictement parlant, le *schiste argileux*, venant de la roche sédimentaire, devrait s'appeler *shale*

En général, les moellons et pierres taillés par les tailleurs de pierre ont été réservés à des bâtiments coûteux pour des maîtres d'ouvrage fortunés. En milieu rural, on utilisait surtout des moellons bruts et ébauchés, qui nécessitaient d'avantage de mortier.

Généralement on distingue trois formats d'appareils :

- Petit appareil : moellons \leq 20 cm de haut;
- Moyen appareil : moellons entre 20 et 35 cm de haut;
- Grand appareil : moellons \geq 35 cm de haut.

Les murs en pierre sont souvent bâtis avec un rétrécissement progressif (appelé fruit), l'épaisseur en bas du mur étant supérieure à celle du haut. Les murs traditionnels sont le plus souvent à double appareil, constitués de deux parements (intérieur et extérieur) reliés par des pierres traversantes (dits 'boutisses') de 50 à 80cm posées transversalement entre les parements. En général, les moellons ne sont ébauchés que d'un côté et posés dans des lits grossiers, la queue vers l'intérieur du mur ancrée dans la maçonnerie. Le calage des moellons est souvent amélioré par l'insertion de petits éléments (galets, éclats de pierre, morceaux de terre cuite). Les murs à simple appareil, dans lesquels la longueur des pierres donne l'épaisseur du mur, sont peu fréquents dans la maçonnerie traditionnelle.

1.3. Pathologies

Le plus souvent les désordres ou dégradations dans un bâtiment en pierre sont dus soit à des défauts ou un manque d'entretien, soit à des réparations mal faites avec des matériaux non-adaptés. La restauration et l'amélioration énergétique demandent un diagnostic complet des pathologies de l'édifice, un bon choix des matériaux ainsi que des techniques de restauration et d'isolation thermique.

Les maladies de la pierre sont multiples, mais elles touchent principalement (non pas exclusivement) les pierres calcaires. Les pierres calcaires tendres sont les plus sensibles aux dégradations environnementales, telles que les pluies acides ou la pollution automobile dans les villes, ce qui abîme la couche calcine protégeant la pierre.

2. Conditions de l'étude

2.1. Configurations testées

Le présent cahier permet une analyse de différentes solutions d'isolation d'un mur en pierre calcaire dure, 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.

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

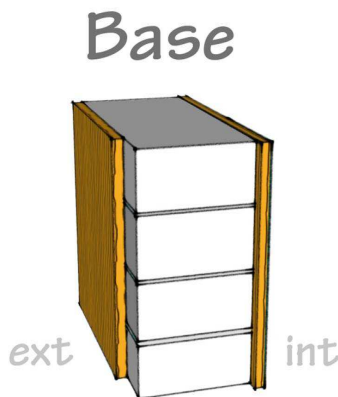
Résistance thermique de la paroi fidèle aux performances attendues	Résistance thermique de la paroi inférieure aux performances attendues

3. Configuration de base

3.1. Description

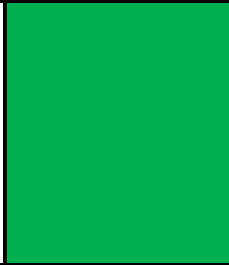
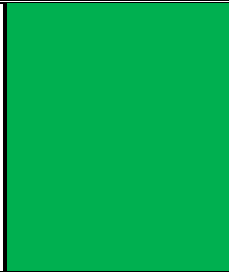
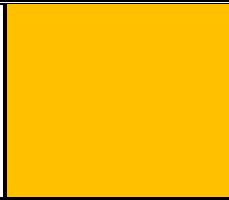
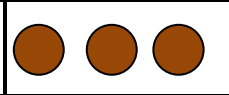

La configuration de base correspond à un mur traditionnel en moellons taillés de pierre calcaire dure, hourdé au mortier de chaux et enduit à la chaux à l'intérieur et à l'extérieur.

Base		Extérieur	Paroi ancienne		Intérieur
		Matériaux retenus (*)	Enduit chaux	Pierre calcaire dure	Mortier chaux
Epaisseur (mm)	20	420	20	20	
Hygroscopicité	Elevée	Faible	Moyenne	Elevée	
Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Elevée	Moyenne	Faible	
Capillarité	Moyenne	Faible	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

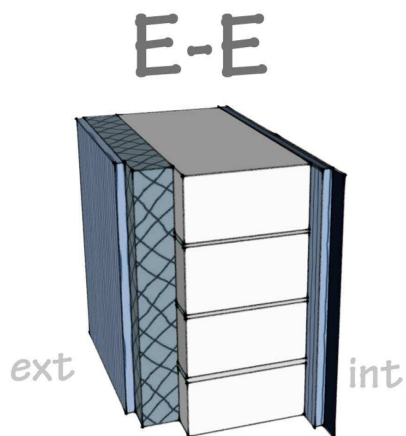
Quantité d'eau	<p>La quantité d'eau dans la configuration de base est faible : la teneur en eau de la pierre calcaire dure ne subit aucune augmentation.</p> <p>Ce résultat est cohérent avec ce que l'on peut observer de nos jours, à savoir de nombreuses constructions anciennes en pierre calcaire dure 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 la paroi ancienne d'une part, et entre la paroi ancienne 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 de la pierre calcaire dure ne subit aucune augmentation.</p> <p>L'enduit à la chaux facilite le passage de l'humidité, sous forme liquide et gazeuse, de la pierre vers l'ambiance extérieure et vers l'ambiance intérieure.</p>	
Condensation	<p>Il y a un risque modéré de condensation à l'interface entre la paroi ancienne et l'enduit intérieur. Cependant, celui-ci est faible et l'eau de condensation qui s'est éventuellement formée en hiver a la possibilité de sécher en été.</p> <p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre la paroi ancienne et l'enduit à la chaux extérieur.</p>	
Inertie thermique	L'inertie thermique de la paroi dans sa configuration de base est forte.	
Résistance thermique	La résistance thermique de la paroi dans sa configuration de base est inférieure aux performances attendues.	

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

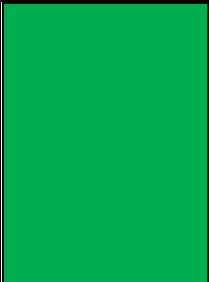
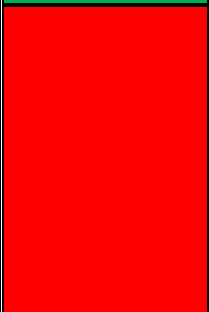

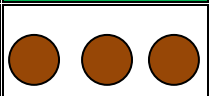

4.1.1. Description

	Extérieur « Etanche »		Paroi ancienne		Intérieur « Etanche »
	Matériaux retenus (*)	Enduit organique	Polystyrène	Pierre calcaire dure	Mortier chaux
Epaisseur (mm)	10	120	420	20	13
Hygroscopicité	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne
Résistance à la diffusion de vapeur	Elevée	Moyenne	Elevée	Moyenne	Moyenne
Capillarité	Faible	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

<p>Quantité d'eau</p>	<p>Par rapport à la configuration de base, la quantité d'eau diminue dans la pierre calcaire dure. Celle-ci est en effet protégée 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, dans une moindre mesure, son passage sous forme liquide ou gazeuse vers la pierre ; • 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 la pierre. 	
<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 : la pierre calcaire dure 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 pierre 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, de la pierre 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 la paroi ancienne.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie thermique de la paroi est forte. L'isolation par l'extérieur préserve 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>	

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

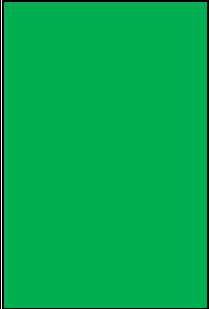
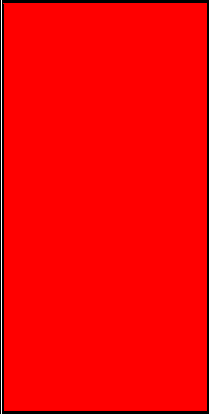

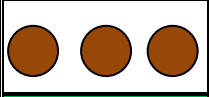

4.2.1. Description

	Extérieur « Etanche »		Paroi ancienne		Intérieur « Perméable »
	Matériaux retenus (*)	Enduit organique	Polystyrène	Pierre calcaire dure	Mortier chaux
Epaisseur (mm)	10	120	420	20	20
Hygroscopicité	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	Elevée
Résistance à la diffusion de vapeur	Elevée	Moyenne	Elevée	Moyenne	Faible
Capillarité	Faible	Faible	Faible	Elevée	Moyenne

E-P

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

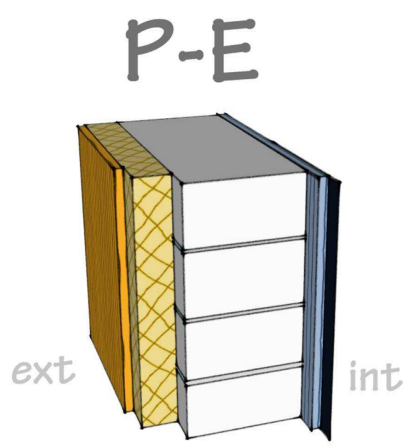
4.2.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>Par rapport à la configuration de base, la quantité d'eau diminue dans la pierre calcaire dure.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La pierre 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 ou gazeuse, de pénétrer plus en avant dans la pierre. • 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 la pierre, mais également en sens inverse, ce qui favorise le séchage de la pierre 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 : la pierre calcaire dure 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 pierre 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 faible capillarité et la résistance à la diffusion de vapeur élevée de la pierre calcaire dure ne permettent pas 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. De ce fait, et malgré ses propriétés capillaires moyennes et sa faible résistance à la diffusion de vapeur, l'enduit à la chaux ne parvient pas à évacuer l'humidité vers l'ambiance intérieure, qui s'accumule alors dans la pierre. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre l'isolant et la paroi ancienne.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie thermique de la paroi est forte. L'isolation par l'extérieur préserve 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>	

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

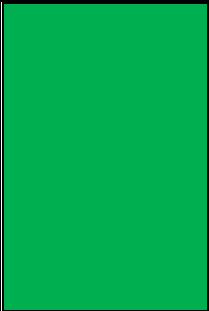
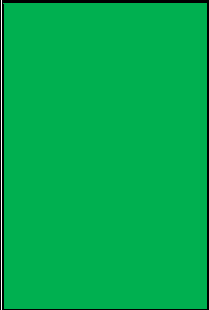



4.3.1. Description

	Extérieur « Perméable »		Paroi ancienne		Intérieur « Etanche »
	Matériaux retenus (*)	Enduit chaux	Fibre de bois	Pierre calcaire dure	Mortier chaux
Epaisseur (mm)	10	120	420	20	13
Hygroscopicité	Elevée	Elevée	Faible	Moyenne	Moyenne
Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Faible	Elevée	Moyenne	Moyenne
Capillarité	Moyenne	Faible	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 la pierre calcaire dure.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La pierre est en effet protégée de l'humidité de l'ambiance intérieure par la plaque de plâtre et le papier peint vinyle, qui limitent son passage sous forme gazeuse et sous forme liquide. • 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 la pierre, mais aussi en sens inverse, favorisant ainsi le transfert de la vapeur d'eau de la pierre 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 de la pierre calcaire dure 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 liquide ou gazeuse, de la pierre 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, de la pierre 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 la paroi ancienne.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie thermique de la paroi est forte. L'isolation par l'extérieur préserve 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>	

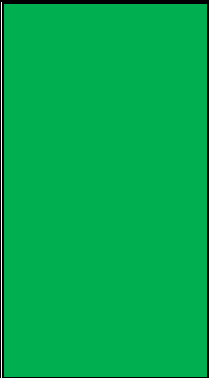
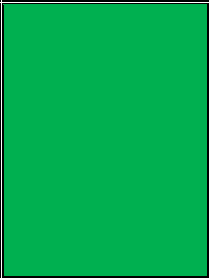

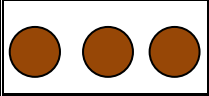

4.4. Solution P-P en ITE : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur

4.4.1. Description

<p>P-P</p> <p>ext int</p>	Extérieur « Perméable »		Paroi ancienne		Intérieur « Perméable »	
	Matériaux retenus (*)	Enduit chaux	Fibre de bois	Pierre calcaire dure	Mortier chaux	Enduit chaux
	Epaisseur (mm)	10	120	420	20	20
	Hygroscopicité	Elevée	Elevée	Faible	Moyenne	Elevée
	Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Faible	Elevée	Moyenne	Faible
	Capillarité	Moyenne	Faible	Faible	Elevée	Moyenne

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

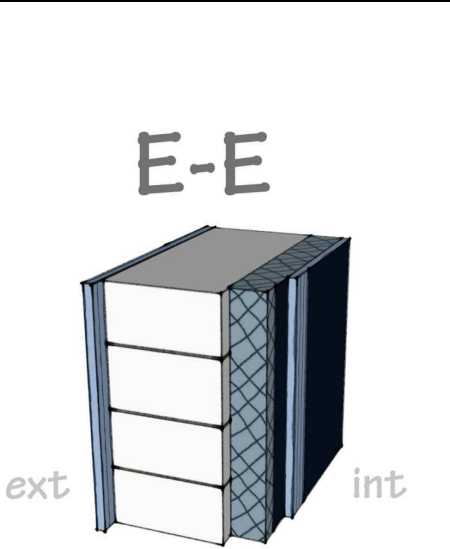
4.4.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>Par rapport à la configuration de base, la quantité d'eau diminue dans la pierre calcaire dure.</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 la pierre, mais également en sens inverse, ce qui favorise le séchage de la pierre 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 la pierre, mais aussi en sens inverse, ce qui favorise le transfert de la vapeur d'eau de la pierre 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 de la pierre calcaire dure.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le passage de l'humidité, sous forme gazeuse, de la pierre 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, de la pierre vers l'ambiance intérieure. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque faible de condensation à l'interface entre l'isolant et la paroi ancienne.</p>	
<p>Inertie thermique</p>	<p>L'inertie thermique de la paroi est forte. L'isolation par l'extérieur préserve 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. 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'. On the left, the exterior side is labeled 'ext' and on the right, the interior side is labeled 'int'. The wall consists of several layers: an exterior cement finish, a thick stone core, a mortar layer, a rock wool insulation layer, a vapor barrier, and an interior finish of plaster and vinyl paper.

	Extérieur « Etanche »	Paroi ancienne		Intérieur « Etanche »		
Matériaux retenus (*)	Enduit ciment	Pierre calcaire dure	Mortier chaux	Laine de roche	Frein-vapeur	Plaque de plâtre et papier peint vinyle
Epaisseur (mm)	20	420	20	120	1	13
Hygroscopicité	Elevée	Faible	Moyenne	Faible	-	Moyenne
Résistance à la diffusion de vapeur	Moyenne	Elevée	Moyenne	Faible	Elevée	Moyenne
Capillarité	Faible	Faible	Elevée	Faible	-	Moyenne

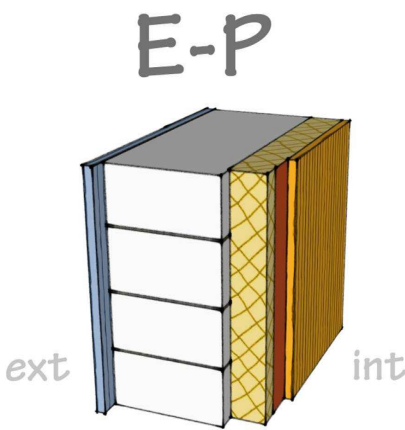
(*) Les propriétés physiques de ces matériaux sont détaillées dans le « cahier n°0 »

5.1.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

Quantité d'eau	<p>La paroi ne parvient pas à trouver un nouvel équilibre hygrothermique.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le séchage de la pierre 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 de la pierre 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 de la pierre, qu'elle soit sous forme liquide ou gazeuse. 	
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 : la pierre calcaire dure 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 pierre 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 plutôt résistant à la diffusion de vapeur, il empêche également le séchage, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse, de la pierre vers l'ambiance extérieure. 	
Condensation	Il y a un risque modéré de condensation à l'interface entre la paroi ancienne et l'isolant.	
Inertie thermique	<p>L'inertie thermique de la paroi par l'intérieur est très faible.</p> <p>L'isolation par l'intérieur réduit considérablement l'inertie thermique de la paroi ancienne.</p>	○ ○ ○
Résistance thermique	La résistance thermique de la paroi est fidèle aux performances attendues.	


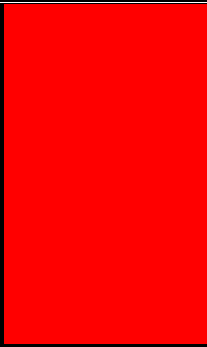

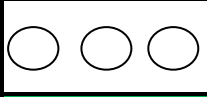

5.2. Solution E-P en ITI : « étanche à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur

5.2.1. Description

		Extérieur « Etanche »		Paroi ancienne		Intérieur « Perméable »	
	Matériaux retenus (*)	Enduit ciment	Pierre calcaire dure	Mortier chaux	Ouate de cellulose	Frein-vapeur hygro-variable	Plaque de plâtre
	Epaisseur (mm)	20	420	20	120	1	13
	Hygroscopicité	Elevée	Faible	Moyenne	Moyenne	-	Moyenne
	Résistance à la diffusion de vapeur	Moyenne	Elevée	Moyenne	Faible	Moyenne à Elevée	Faible
	Capillarité	Faible	Faible	Elevée	Elevée	-	Elevée

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

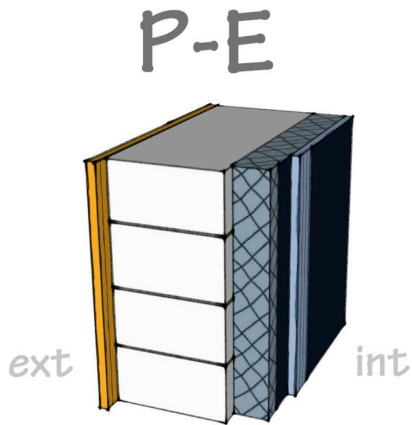
5.2.2. Conséquences sur le comportement hygrothermique de la paroi

<p>Quantité d'eau</p>	<p>La teneur en eau dans la pierre calcaire dure 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 de la pierre vers l'ambiance extérieure est faible puisque l'enduit au ciment empêche le passage de l'humidité en provenance de la pierre, 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 la pierre, 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 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 : la pierre calcaire dure n'atteint pas de nouvel équilibre hygrothermique.</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 pierre vers l'ambiance extérieure. • D'autre part, la résistance à la diffusion de vapeur plutôt élevée du frein-vapeur hygro-variable ne permet pas d'évacuer suffisamment d'humidité, bien que la ouate de cellulose et la plaque de plâtre soient, elles, très capillaires et peu résistantes à la diffusion de vapeur. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque modéré de condensation à l'interface entre la paroi ancienne 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>	

5.3. 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	Pierre calcaire dure	Mortier chaux	Laine de roche	Frein-vapeur	Plaque de plâtre et papier peint vinyle
Epaisseur (mm)	20	420	20	120	1	13	
Hygroscopicité	Elevée	Faible	Moyenne	Faible	-	Moyenne	
Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Elevée	Moyenne	Faible	Elevée	Moyenne	
Capillarité	Moyenne	Faible	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

Quantité d'eau	<p>La teneur en eau dans la pierre 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 de la pierre 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 de la pierre vers l'ambiance intérieure. • D'autre part, les quantités d'humidité en jeu sont trop importantes pour que l'enduit à la chaux puisse les évacuer correctement 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 faible : la pierre calcaire dure 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 pierre 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. • La faible capillarité et la résistance à la diffusion de vapeur élevée de la pierre calcaire dure ne permettent pas 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. De ce fait, et malgré ses propriétés capillaires moyennes et sa faible résistance à la diffusion de vapeur, l'enduit à la chaux ne parvient pas à évacuer l'humidité vers l'ambiance extérieure, qui s'accumule alors dans la pierre. 	
Condensation	Il y a un risque modéré de condensation à l'interface entre la paroi ancienne et l'isolant.	
Inertie thermique	<p>L'inertie thermique de la paroi est très faible.</p> <p>L'isolation par l'intérieur dégrade considérablement l'inertie thermique de la paroi ancienne.</p>	○ ○ ○
Résistance thermique	La résistance thermique de la paroi est fidèle aux performances attendues.	

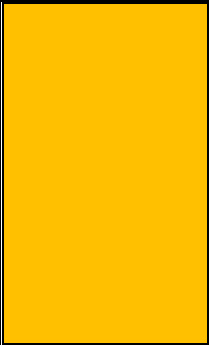
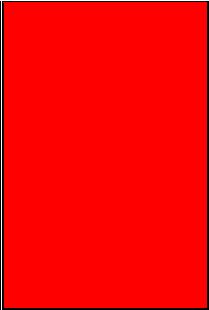

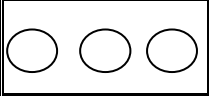

5.4. Solution P-P en ITI : « perméable à l'humidité » côté extérieur + « perméable à l'humidité » côté intérieur

5.4.1. Description

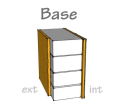
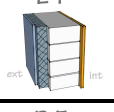
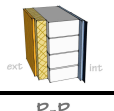
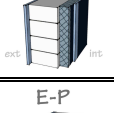
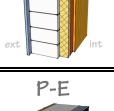
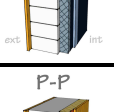
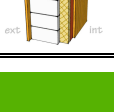

<p>P-P</p>	Extérieur « Perméable »		Paroi ancienne		Intérieur « Perméable »		
	Matériaux retenus (*)	Enduit chaux	Pierre calcaire dure	Mortier chaux	Ouate de cellulose	Frein-vapeur hygro-variable	Plaque de plâtre
	Epaisseur (mm)	20	420	20	120	1	13
	Hygroscopicité	Elevée	Faible	Moyenne	Moyenne	-	Moyenne
	Résistance à la diffusion de vapeur	Faible	Elevée	Moyenne	Faible	Moyenne à Elevée	Faible
	Capillarité	Moyenne	Faible	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

<p>Quantité d'eau</p>	<p>La teneur en eau dans la pierre 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 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 la pierre, 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. • D'autre part, les quantités d'humidité en jeu sont trop importantes pour que l'enduit à la chaux puisse les évacuer correctement 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 faible : la pierre calcaire dure n'atteint pas de nouvel équilibre hygrothermique.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Malgré ses propriétés capillaires moyennes et sa faible résistance à la diffusion de vapeur, l'enduit à la chaux ne parvient pas à évacuer l'humidité vers l'ambiance extérieure, qui s'accumule alors dans la pierre. • D'autre part, la quantité de vapeur pénétrant dans la paroi par l'intermédiaire du frein-vapeur hygro-variable ne peut être évacuée en quantité suffisante par la ouate de cellulose et la plaque de plâtre, pourtant très capillaires et peu résistantes à la diffusion de vapeur. 	
<p>Condensation</p>	<p>Il y a un risque modéré de condensation à l'interface entre la paroi ancienne 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>	

6. Tableau de synthèse et conclusions

Murs en pierre calcaire dure		Quantité d'eau	Capacité de séchage	Condensation	Inertie	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 pierre calcaire dure 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.

Elles permettent en effet au mur de mieux gérer la présence d'infiltrations d'humidité (critère "capacité de séchage").

Concernant les solutions d'isolation par l'intérieur, les configurations x-P ou P-x, perméables à la vapeur d'eau et capillaires côté intérieur² ou extérieur³ sont préférables à la configuration E-E au regard du critère « quantité d'eau ».

Néanmoins, les configurations testées présentent toutes une capacité de séchage faible, en présence d'infiltrations d'humidité.

Il convient donc d'apporter un soin particulier 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 dans l'étude par une isolation extérieure en fibre de bois, avec enduit extérieur à la chaux.

² Illustré dans l'étude par une isolation intérieure en ouate de cellulose, avec frein vapeur hygro-variable

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 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