



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS
« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

RAPPORT

**ÉVALUATION DES RISQUES
DE PATHOLOGIES LIÉES
À L'HUMIDITÉ**

**AU NIVEAU DES POUTRES ENCASTRÉES DANS UN MUR
EXTÉRIEUR ISOLÉ PAR L'INTÉRIEUR**

SEPTEMBRE 2013

RENOVATION

ÉDITO

Le Grenelle Environnement a fixé pour les bâtiments neufs et existants des objectifs ambitieux en matière d'économie et de production d'énergie. Le secteur du bâtiment est engagé dans une mutation de très grande ampleur qui l'oblige à une qualité de réalisation fondée sur de nouvelles règles de construction.

Le programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » a pour mission, à la demande des Pouvoirs Publics, d'accompagner les quelque 370 000 entreprises et artisans du secteur du bâtiment et l'ensemble des acteurs de la filière dans la réalisation de ces objectifs.

Sous l'impulsion de la CAPEB et de la FFB, de l'AQC, de la COPREC Construction et du CSTB, les acteurs de la construction se sont rassemblés pour définir collectivement ce programme. Financé dans le cadre du dispositif des certificats d'économies d'énergie grâce à des contributions importantes d'EDF (15 millions d'euros) et de GDF SUEZ (5 millions d'euros), ce programme vise, en particulier, à mettre à jour les règles de l'art en vigueur aujourd'hui et à en proposer de nouvelles, notamment pour ce qui concerne les travaux de rénovation. Ces nouveaux textes de référence destinés à alimenter le processus normatif classique seront opérationnels et reconnus par les assureurs dès leur approbation ; ils serviront aussi à l'établissement de manuels de formation.

Le succès du programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » repose sur un vaste effort de formation initiale et continue afin de renforcer la compétence des entreprises et artisans sur ces nouvelles techniques et ces nouvelles façons de faire. Dotées des outils nécessaires, les organisations professionnelles auront à cœur d'aider et d'inciter à la formation de tous.

Les professionnels ont besoin rapidement de ces outils et « règles du jeu » pour « réussir » le Grenelle Environnement.

Alain MAUGARD

Président du Comité de pilotage du Programme
« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »
Président de QUALIBAT



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS
« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

Ce programme est une application du Grenelle Environnement. Il vise à revoir l'ensemble des règles de construction, afin de réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

AVANT-PROPOS

Afin de répondre au besoin d'accompagnement des professionnels du bâtiment pour atteindre les objectifs ambitieux du Grenelle Environnement, le programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » a prévu d'élaborer les documents suivants :

Les **Recommandations Professionnelles** « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents techniques de référence, préfigurant un avant-projet NF DTU, sur une solution technique clé améliorant les performances énergétiques des bâtiments. Leur vocation est d'alimenter soit la révision d'un NF DTU aujourd'hui en vigueur, soit la rédaction d'un nouveau NF DTU. Ces nouveaux textes de référence seront reconnus par les assureurs dès leur approbation.

Les **Guides** « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents techniques sur une solution technique innovante améliorant les performances énergétiques des bâtiments. Leur objectif est de donner aux professionnels de la filière les règles à suivre pour assurer une bonne conception, ainsi qu'une bonne mise en œuvre et réaliser une maintenance de la solution technique considérée. Ils présentent les conditions techniques minimales à respecter.

Les **Calepins de chantier** « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des mémentos destinés aux personnels de chantier, qui illustrent les bonnes pratiques d'exécution et les dispositions essentielles des Recommandations Professionnelles et des Guides « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 ».

Les **Rapports** « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » présentent les résultats soit d'une étude conduite dans le cadre du programme, soit d'essais réalisés pour mener à bien la rédaction de Recommandations Professionnelles ou de Guides.

Les **Recommandations Pédagogiques** « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents destinés à alimenter la révision des référentiels de formation continue et initiale. Elles se basent sur les éléments nouveaux et/ou essentiels contenus dans les Recommandations Professionnelles ou Guides produits par le programme.

L'ensemble des productions du programme d'accompagnement des professionnels « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » est mis gratuitement à disposition des acteurs de la filière sur le site Internet du programme : <http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr>



Sommaire

1 - Résumé exécutif	5
2 - Problématique en isolation thermique par l'intérieur	8
2.1. • Comportement hygrothermique d'un mur extérieur isolé par l'intérieur	8
2.2. • Aperçu qualitatif de différents systèmes d'isolation par intérieur.....	9
3 - Méthodes et critères d'évaluation pour les risques de pathologies liées aux transferts d'humidité	11
3.1. • Méthodes d'évaluation	11
3.1.1. • Méthode de Glaser	11
3.1.2. • Simulations hygrothermiques	11
3.2. • Critères d'évaluation.....	12
3.2.1. • Accumulation d'humidité dans la construction.....	12
3.2.2. • Dommages causés par le gel.....	12
3.2.3. • Développement de moisissures	13
3.2.4. • Pourriture des têtes de poutre en bois.....	13
3.2.5. • Corrosion des têtes de poutre en métal.....	13
4 - Synthèse de l'étude	14
4.1. • Objectif de l'étude	14
4.1.1. • Description des 4 cas étudiés :	15
4.1.2. • Propriétés des matériaux	18
4.1.3. • Autres hypothèses de base pour les parois étudiées	18
4.2. • Conditions externes pour les simulations	19
4.2.1. • Climat extérieur.....	19
4.2.2. • Conditions hygrothermiques du climat intérieur.....	19
4.3. • Pré-études des murs courants par simulations en 1D.....	20
4.4. • Simulations en 2D des liaisons poutres – murs extérieurs.....	29
5 - Conclusions	33
6 - Discussion de la problématique au niveau européen	35
7 - Références	37
8 - Bibliographie	39

Résumé exécutif

1



A RETENIR

L'ITI des murs en brique et en pierre modifie le comportement hygrothermique des parois.

Les simulations hygrothermiques ne montrent cependant pas de situation critique : une ITI performante ($R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) est possible dans les bâtiments anciens avec façades en pierres ou briques apparentes sans créer de risque de pathologies.

Pour réaliser une ITI sans risquer de provoquer de pathologies, il faut absolument :

- Réaliser un diagnostic et une évaluation de la situation hygrothermique à l'état initial (composition, exposition, protection contre la pluie battante) ;
- Assurer une bonne protection du mur contre les infiltrations d'humidité (pluie, remontées capillaires, fuites d'eau, etc.) ;
- Assurer une bonne étanchéité à l'air grâce à une mise en œuvre soignée ;
- Avoir recours si nécessaire à un pare-vapeur bien dimensionné pour garder une possibilité de séchage du mur extérieur vers l'intérieur ;
- Assurer l'évacuation de l'humidité intérieure grâce à une ventilation opérationnelle permettant un renouvellement d'air suffisant.

POUGET *Consultants* et le Fraunhofer IBP se sont associés pour la réalisation de la présente étude sur le comportement hygrothermique des têtes de poutre au niveau des murs extérieurs notamment lors d'une intervention thermique performante par l'intérieur dans le cas des bâtiments anciens.

38% des bâtiments du parc existant ont été construits avant 1948. Pour 70% de ces bâtiments, une isolation par l'extérieur n'est pas envisageable (conservation patrimoniale, aspect architectural, complexité de la façade, etc.). Une isolation thermique par l'intérieur est alors nécessaire pour améliorer les performances thermiques de ces bâtiments. Or, lors de travaux d'isolation par l'intérieur, la gestion du



pont thermique entre le mur extérieur vertical (pierre, brique) et le plancher (bois ou métal) est complexe, notamment du fait des risques de pathologies liées à l'humidité.

L'étude montre qu'il est possible, sous certaines conditions préalables, de mettre en œuvre une isolation par intérieur très performante ($R = 5 \text{ m}^2\text{K/W}$) sans déclencher de pathologies au niveau des têtes de poutre. Étant donné que le périmètre de l'étude est restreint (nombre de cas étudiés, matériaux utilisés, données météorologique d'une station, etc.), les résultats ne sont que peu généralisables. Cette étude permet néanmoins de donner quelques premières pistes de réflexion.

La **protection du mur contre les infiltrations d'humidité** par l'extérieur, par le sol ou par des fuites au niveau des toitures ou des installations sanitaires est essentielle pour la pérennité du mur et des poutres, et ce quelle que soit la technique d'isolation retenue.

Un **diagnostic des éventuelles pathologies d'humidité et une évaluation de la protection contre l'humidité des parois** sont indispensables avant d'intervenir par l'intérieur sur un bâti ancien. Le cas échéant, il faut éliminer toute source de pathologies et réduire la porosité des surfaces extérieures afin d'assurer un coefficient d'absorption capillaire A inférieur ou égal en moyenne à $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ ¹ [$0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ pour des façades très exposées].

Il est indispensable de développer des méthodes d'évaluation simples et pragmatiques et d'accroître les compétences des acteurs de la rénovation (thermiciens, architectes, entreprises) via des formations spécifiques notamment sur la notion d'absorption capillaire des surfaces extérieures et des risques de remontés capillaires.

L'évacuation de l'humidité produite à l'intérieur des locaux s'opère via une **ventilation opérationnelle proposant un renouvellement d'air suffisant**. La présence de murs perspirants, très perméables à la diffusion de vapeur d'eau, ne suffit pas à l'évacuation de l'humidité.

Lors de la mise en œuvre d'une ITI sur des murs anciens, les points suivants doivent être étudiés :

- traiter soigneusement **l'étanchéité à l'air** entre le local et les têtes de poutre pour éviter un transport convectif d'humidité, source de condensation en hiver au niveau de ces points sensibles. Il est également important de s'assurer de la bonne étanchéité à l'air entre le local et la face extérieure de l'isolation (en contact avec le mur froid) ;
- veiller à ce que le complexe de la paroi isolée conserve sa **capacité de séchage côtés extérieur et intérieur et ce afin d'évacuer l'humidité** apportée lors de la mise en œuvre ou via des infiltrations accidentelles.

.....
¹ Le coefficient d'absorption capillaire A caractérise la capacité d'un support d'absorber l'eau. Les valeurs proposées se réfèrent à [Borsch-Laaks 2012]

Les règles de l'art doivent évoluer dans ce sens et permettre la prise en compte de nouvelles solutions comme les pare-vapeurs hygro-variables ou des matériaux avec potentiel de transport capillaire. Il n'en reste pas moins que de bonnes connaissances sur les caractéristiques hygrothermiques des matériaux utilisés sont requises pour concevoir une solution adaptée et fiable, notamment dans le cas des pare-vapeurs.

Des études complémentaires sont nécessaires pour définir les limites d'application des solutions thermiques selon les différentes zones climatiques et l'exposition des parois à la pluie.



Problématique en isolation thermique par l'intérieur

2

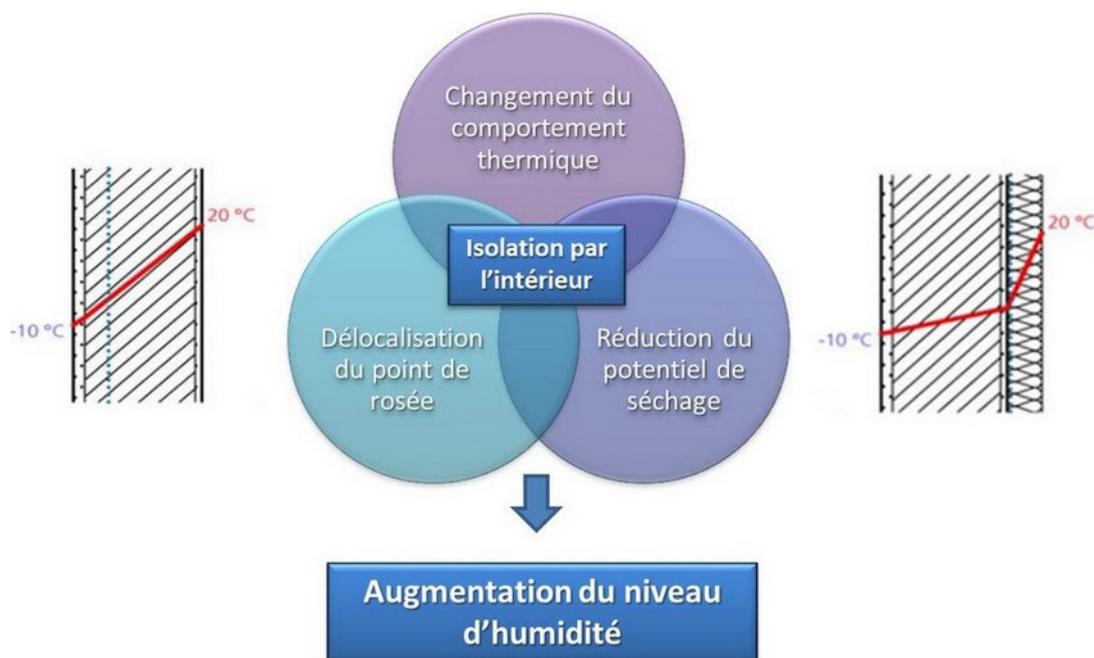


2.1. • *Comportement hygrothermique d'un mur extérieur isolé par l'intérieur*

L'isolation par l'extérieur est en général la meilleure solution pour traiter thermiquement une paroi extérieure. La paroi structurelle est mise « au chaud », ce qui résout la plupart des problématiques liées à la physique du bâtiment. Les ponts thermiques des liaisons sont convenablement traités, perdure uniquement certaines situations spécifiques – comme les balcons ou les acrotères – ou des traitements complémentaires sont à prévoir. Le mur massif agit dans la plupart des cas comme un frein à la diffusion de vapeur d'eau. Les problèmes de condensation restent rares. La nouvelle protection extérieure de l'ITE contre la pluie est alors opérante.

La situation s'inverse dans le cas d'une ITI : le mur est plus froid et plus humide en hiver suite à l'intervention. Il subit alors de grands changements de température au cours d'année et est toujours soumis aux influences des intempéries. En hiver le point de rosée est souvent atteint à l'interface entre l'isolant et le mur. Il faut en conséquence limiter l'apport d'humidité par diffusion ou par convection pour éviter la condensation à cet endroit. La possibilité de séchage du mur vers l'intérieur est également réduite par l'ITI. Elle est pourtant indispensable si le mur est soumis à des risques d'humidité.

Ces impacts sont schématisés dans le (Schéma 1).



▲ Schéma 1 : Impact de l'isolation par l'intérieur sur une paroi

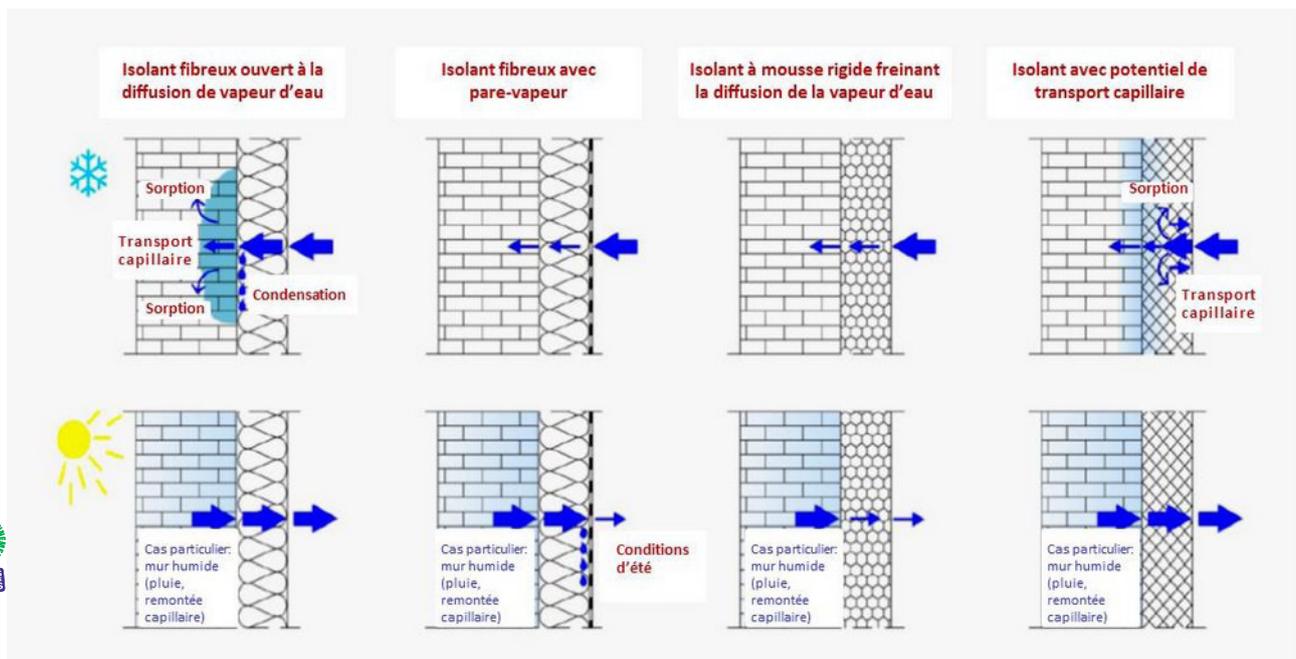
(Source : Fraunhofer IBP)

Selon l'état de l'art actuel ce n'est pas seulement l'apport d'humidité par transfert de vapeur d'eau de l'intérieur qui est considéré comme critique, mais surtout l'apport d'humidité par l'extérieur, spécialement via la pluie battante. La protection contre la pluie battante des anciennes façades n'est souvent pas suffisante. Une ITI ralentit le séchage du mur et peut occasionner des dégradations du mur par humidité et/ou par gel, des moisissures et/ou des décompositions d'éléments structurels. Il est donc indispensable de vérifier les infiltrations d'eau et de concevoir une surface extérieure étanche à la pluie mais ouverte à l'évaporation d'humidité pour limiter l'humidification et favoriser le séchage. Le même raisonnement est valable pour les remontées capillaires : réduire les sources d'humidité au minimum et améliorer les possibilités de séchage.

Si la conception et la mise en œuvre sont effectuées soigneusement, les impacts d'une ITI performante sur le mur sont ainsi très bien maîtrisables. Dans les rares cas où une réduction des apports d'humidité est impossible, l'épaisseur ou la performance de l'isolation intérieure doit être réduite pour améliorer le potentiel de séchage du mur par une température plus élevée.

2.2. • Aperçu qualitatif de différents systèmes d'isolation par intérieur

Le (Schéma 2) montre quelques exemples de systèmes d'ITI avec leur comportement hygrothermique en hiver (en haut) et en été (en bas).



▲ **Schéma 2** : Explications schématiques du fonctionnement hygrothermique de différentes solutions d'isolation par l'intérieur en hiver et en été

(Source : Fraunhofer IBP)

L'exemple de gauche représente une isolation ouverte à la vapeur d'eau sans pare-vapeur. La vapeur d'eau peut condenser entre l'isolant et la paroi en hiver. Ceci est viable si la paroi est capable d'absorber cette humidité ; néanmoins une augmentation du taux d'humidité dans la paroi est inévitable. L'humidité dans la paroi peut certes facilement sécher vers l'intérieur en été, mais la solution n'est pérenne que pour une épaisseur d'isolant limitée.

Une isolation plus performante nécessite un pare-vapeur. Celui-ci limite la diffusion de vapeur d'eau en hiver mais réduit en été le séchage du mur vers l'intérieur, ce qui est indispensable dans certains cas, même si les transferts en été sont nettement moins importants qu'en hiver car les pressions de vapeur à l'intérieur et à l'extérieur sont très proches.

Une isolation avec des mousses plastiques rigides se comporte d'une manière similaire. Elle protège en hiver la paroi d'une diffusion de vapeur d'eau de l'intérieur mais empêche un séchage en été. Ces deux systèmes peuvent avoir des performances thermiques élevées et sont favorables si l'apport d'humidité par l'extérieur ou le sol est limité (p.ex. bonne protection contre la pluie battante).

L'application d'isolants avec capacité de transport capillaire, exemple de droite dans le (Schéma 2) peut apporter des avantages si la protection contre l'humidité par l'extérieur ou le sol ne peut pas être réalisée d'une manière satisfaisante.

Méthodes et critères d'évaluation pour les risques de pathologies liées aux transferts d'humidité

3



3.1. • Méthodes d'évaluation

3.1.1. • Méthode de Glaser

Cette méthode est basée sur un calcul de diffusion de vapeur d'eau développé dans les années 50. Elle fait un bilan simplifié des flux de diffusion de vapeur d'eau sur l'année en utilisant deux périodes de référence stationnaires, une pour l'hiver et une pour l'été. Elle ne prend pas en compte ni l'humidité comprise dans les matériaux au moment de la construction (hypothèse trop favorable pour des constructions neuves) ni les apports d'humidité par pluie battante ou par remontée capillaire. Le calcul est réalisé en monodimensionnel et sous conditions stationnaires. Il ne peut pas modéliser ni les effets de stockage d'humidité ni les effets de transport capillaire dans les matériaux. L'utilisation de cette méthode est limitée à des cas où la diffusion détermine le comportement hygrothermique et où les autres effets sont négligeables.

3.1.2. • Simulations hygrothermiques

Les calculs selon Glaser sont à l'échelle mondiale de plus en plus remplacés par des simulations hygrothermiques. Leur utilisation est soumise à la norme NF EN 15026 d'avril 2008 et permet d'évaluer les conditions hygrothermiques instationnaires d'une construction sous les conditions climatiques naturelles. Les simulations prennent en compte :

- diffusion de vapeur d'eau ;
- transport liquide ;
- stockage d'humidité ;
- absorption de la pluie à la surface extérieure ;



- flux de chaleur selon humidité ;
- stockage de chaleur ;
- flux de chaleur par transport d'humidité et par changement de phases ;
- chaleur latente de fusion ;
- absorption du rayonnement sur la surface extérieure ;
- données météorologiques précises.

Les simulations se font en général en 1D pour des parties courantes et en 2D pour des ponts thermiques, des liaisons ou des parois comportant différents matériaux en parallèle dans l'épaisseur.

Les résultats des simulations sont des courbes de température et d'humidité dans les différentes couches de la construction. Il n'y a pas de résultat chiffrable, les résultats doivent être analysés et évalués selon différents critères et selon les constructions et les matériaux utilisés.

Le logiciel WUFI® est un des logiciels de simulation hygrothermique le plus utilisé en Europe.

3.2. • Critères d'évaluation

3.2.1. • Accumulation d'humidité dans la construction

Le premier critère concerne l'évolution de l'humidité dans la construction sur plusieurs années. Elle varie normalement au cours de l'année. D'une année à l'autre elle peut rester stable ou diminuer mais ne doit pas augmenter d'année en année ; ceci conduirait à un risque de pathologie.

3.2.2. • Dommages causés par le gel

Le gel peut causer des dégradations au niveau du mur ou au niveau des couches d'enduits. Les températures à la jonction entre le mur (enduit) et l'isolation intérieure n'atteignent pratiquement jamais les -5°C , même dans le Nord de la France. Un gel est exclu à cette température pour un taux d'humidité en équilibre avec 95%HR (correspondant à une pression capillaire de 6,5 MPa). Une humidité relative inférieure à 95%HR du côté extérieur de l'ITI est le critère à respecter pour éviter des risques de gel au niveau de l'ancien ou du nouvel enduit sur le mur.

Ce critère s'applique également pour le mur. Il correspond à une teneur d'eau de 30%*m* dans le matériau. Cette valeur limite est difficile à respecter près de la surface extérieure. Une analyse et une évaluation de la sensibilité de la surface envers le gel sont indispensables pour les murs anciens. La protection contre la pluie battante nécessite

d'être améliorée si des dégâts de gel sont déjà présents. Un enduit ou une protection extérieure étanche à l'eau liquide et perméable à la vapeur d'eau restent les meilleures solutions.

3.2.3. • Développement de moisissures

Le développement de moisissures est un phénomène complexe qui dépend de beaucoup de facteurs, des supports, de l'humidité, de la température... Le risque de moisissures sur le côté intérieur de l'isolation est relativement faible si l'isolation est performante et si les ponts thermiques sont traités. Mais le développement de moisissures entre l'isolation et le mur extérieur est possible si l'étanchéité à l'air n'est pas suffisamment traitée. La circulation de l'air intérieur chaud et chargé d'humidité entre l'isolation et le mur provoque pratiquement toujours des moisissures. Inévitablement il faut éviter la convection de l'air à cet endroit.

Un autre point critique se situe à la jonction entre une isolation ouverte à la vapeur d'eau et un éventuel pare-vapeur. Si la diffusion de vapeur d'eau vers l'intérieur – ce qui est généralement le cas en été – est trop importante par rapport à la résistance à la vapeur d'eau du pare-vapeur, l'humidité relative monte du côté extérieur du pare-vapeur jusqu'à condensation. Des moisissures peuvent se développer si l'humidité relative est supérieure à 80%HR pendant plusieurs semaines. Une humidité relative inférieure à 80%HR est le critère à respecter entre le pare-vapeur et l'ITI.

3.2.4. • Pourriture des têtes de poutre en bois

Les champignons qui détruisent le bois se développent sous les conditions suivantes :

- Humidité relative >95%HR pendant plusieurs semaines ;
- Teneur en eau du bois >25%_m ;
- Température entre -5°C et +45°C.

Pour éviter tout risque de développement de ces champignons il faut respecter les critères suivants :

- Teneur en eau du bois inférieure à 20%_{massique} pendant plusieurs semaines ;
- Humidité relative inférieure à 95%HR pendant plusieurs semaines ;
- Pas d'eau libre dans les fibres du bois.

3.2.5. • Corrosion des têtes de poutre en métal

Une humidité relative inférieure à 80%HR à la surface des poutres permet d'éviter la corrosion du métal.

4

Synthèse de l'étude



Les simulations hygrothermiques ont été réalisées par l'Institut Fraunhofer pour la physique du bâtiment (IBP) à Holzkirchen en Allemagne. La méthodologie de l'étude et les hypothèses pour les simulations ont été définies en collaboration avec le CSTB (Division Enveloppes et Matériaux Innovants).

Les simulations hygrothermiques ont été réalisées avec les logiciels WUFI®-Pro et WUFI®-2D, tous les deux développés par l'Institut Fraunhofer pour la physique du bâtiment (IBP). Les modèles de simulation calculent le transfert de chaleur et d'humidité à travers les parois. Les modèles ont été validés par des mesures expérimentales. Le logiciel et les simulations correspondent aux normes internationales [ASHRAE160], [NF EN 15026] et [DIN 4108-3] et aux fiches techniques allemandes [WTA 6-4-09/D] et [WTA E 6-5-12/D].

4.1. • Objectif de l'étude

L'objectif de l'étude de faisabilité est d'évaluer l'impact d'une isolation par intérieur sur le comportement hygrothermique des parois extérieures et des planchers à poutres en bâtiment ancien.

Pour représenter la majorité des bâtiments anciens, deux types de façades (en pierre de taille et en brique apparente) et deux matériaux pour les poutres (métal et bois) ont été sélectionnés. Deux types d'isolation par intérieur ont été sélectionnés (en polystyrène expansé et en fibre minérale) ; matériaux les plus utilisés en rénovation. La performance thermique retenue correspond à la meilleure qualité disponible sur le marché.

L'isolation peut être appliquée des deux côtés du plancher (avec ou sans retour de l'isolant en refend, plancher et plafond, appelé « Boîte dans la boîte ») ou seulement d'un côté du plancher (au-dessus ou en-dessous).

Le croisement de ces données d'entrée mène à 24 configurations (cf. tableau ci-dessous).



Le traitement de l'ensemble de ces configurations aurait dépassé le cadre de l'étude. En conséquence, 4 configurations ont été choisies pour l'étude (cas 1, 2, 6 et 8) et 6 autres cas ont été identifiés pour une éventuelle étude complémentaire.

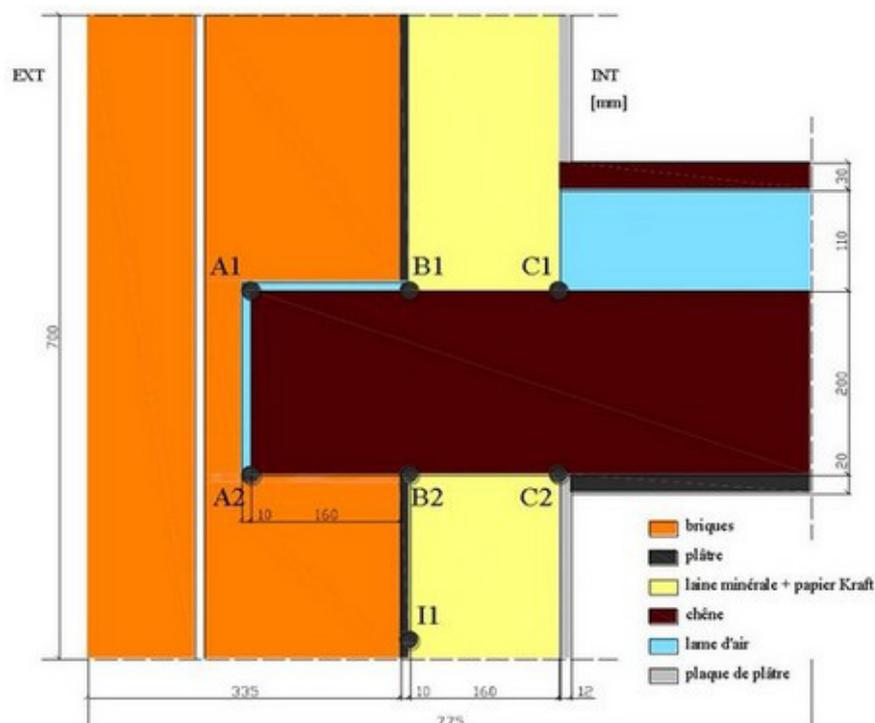
Façade		Brique		Pierre	
Plancher		Bois	Métal	Bois	Métal
Isolation	Matériau				
2 côtés	FM	1	6	8	9
	PSE	2	7		
1 côté	FM	3		10	
	PSE	4			
2 côtés BdB	FM	5			
	PSE				

	Simulations à réaliser dans un premier temps
	Simulations à réaliser dans un deuxième temps
1 côté :	Isolation qu'en dessous du plancher intermédiaire
2 côtés :	Isolation des deux côtés du plancher intermédiaire
BdB :	Traitement pont thermique par retour d'isolant
FM :	Fibres Minérales
PSE :	Polystyrène expansé

4.1.1. • Description des 4 cas étudiés :

Cas 1 (case 1) :

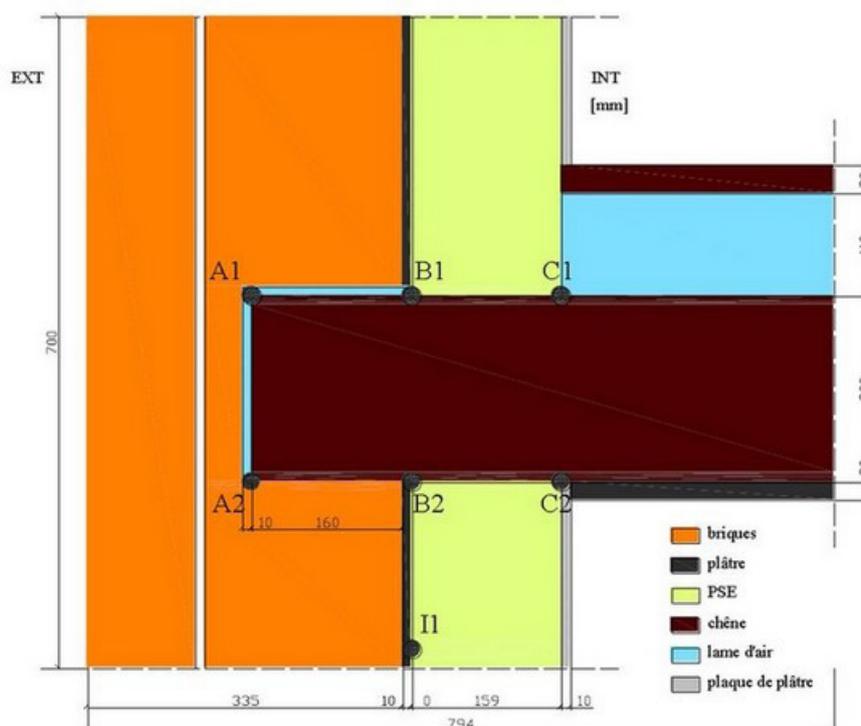
Mur en brique apparente : épaisseur 33,5 cm, avec 10 mm de plâtre côté intérieur, isolation intérieure avec de la laine minérale d'une épaisseur de 16 cm avec une conductivité thermique $\lambda = 0,032 \text{ W/(mK)}$, revêtu d'un papier Kraft, appliquée sous ossature métallique avec plaque BA13 comme revêtement intérieur. Plancher bois avec des poutres en chêne.



▲ Schéma 3 : Tête de poutre en bois dans un mur de brique avec 16 cm d'isolation par l'intérieur en laine minérale

Cas 2 (case 2) :

Mur en brique apparente : épaisseur 33,5 cm, avec 10 mm de plâtre côté intérieur, isolation intérieure avec du polystyrène expansé (PSE) d'une épaisseur de 16 cm avec une conductivité thermique $\lambda = 0,030 \text{ W/(mK)}$, collée avec du mortier adhésif selon la manière « Punktwulst » (plots au milieu et bourrelet continu tout autour) avec plaque BA13 comme revêtement intérieur. Plancher bois avec des poutres en chêne.



▲ Schéma 4 : Tête de poutre en bois dans un mur de brique avec 16 cm d'isolation par l'intérieur en PSE

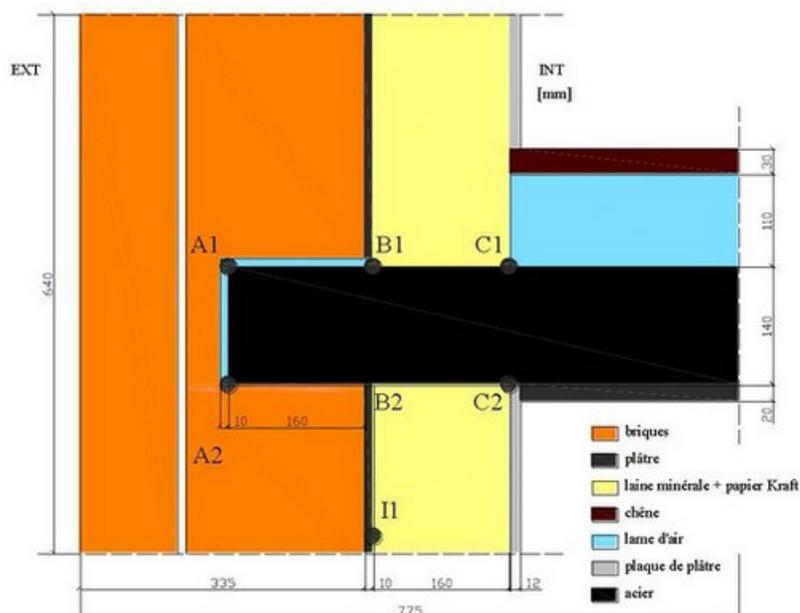
Une pré-étude a permis d'examiner trois différentes mises en œuvre pour identifier le cas critique pour les simulations en 2D :

- polystyrène en contact direct avec l'ancien plâtre ;
- faible lame d'air entre l'ancien plâtre et le polystyrène ;
- polystyrène en contact direct avec une nouvelle couche de plâtre appliquée sur l'ancien.

Étant donné que le cas a) est le cas critique, celui-ci a été utilisé pour les simulations en 2D.

Cas 6 (case 6) :

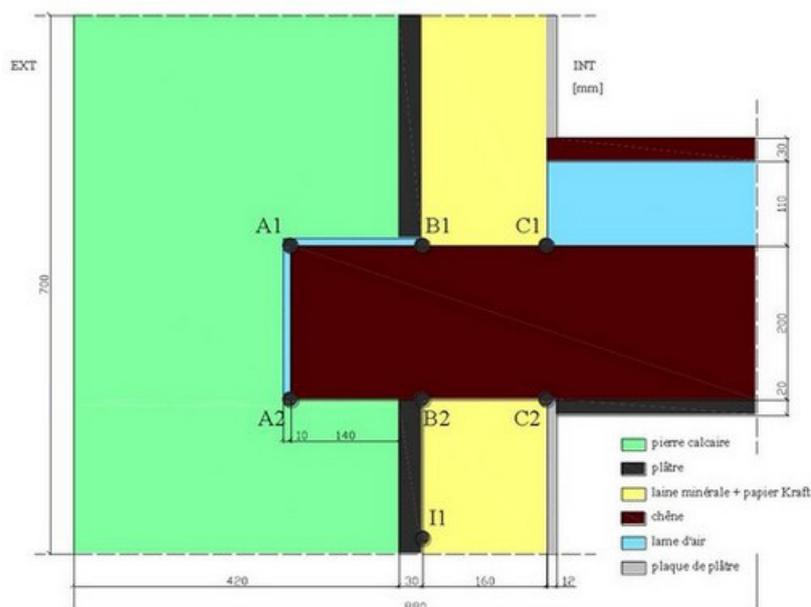
Mur en brique apparente : épaisseur 33,5 cm, avec 10 mm de plâtre côté intérieur, isolation intérieure avec de la laine minérale d'une épaisseur de 16 cm avec une conductivité thermique $\lambda = 0,032 \text{ W/(mK)}$, revêtu d'un papier Kraft, appliquée sous ossature métallique avec plaque BA13 comme revêtement intérieur. Plancher bois avec des poutres en acier IAO.



▲ Schéma 5 : Tête de poutre en métal dans un mur de brique avec 16 cm d'isolation par l'intérieur en laine minérale

Cas 8 (case 8) :

Mur en pierre de taille (pierre calcaire tendre) : épaisseur 42 cm au niveau des poutres, avec 30 mm de plâtre côté intérieur, isolation intérieure avec de la laine minérale d'une épaisseur de 16 cm avec une conductivité thermique $\lambda = 0,032 \text{ W/(mK)}$, revêtu d'un papier Kraft, appliquée sous ossature métallique avec plaque BA13 comme revêtement intérieur. Plancher bois avec des poutres en chêne.



▲ Schéma 6 : Tête de poutre en bois dans un mur de pierre avec 16 cm d'isolation par l'intérieur en laine minérale



4.1.2. • Propriétés des matériaux

Les simulations utilisent les valeurs de la bibliothèque WUFI pour les caractéristiques des différents matériaux. Celles-ci sont décrites en détail dans le rapport de l'étude en annexe.

Étant donné que l'absorption d'eau de la paroi par sa surface extérieure a un impact non négligeable sur les résultats, des études préliminaires avec différentes valeurs pour l'absorption capillaire des surfaces ont été réalisées :

Pour le mur en brique :

- $5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ correspond à une faible protection contre la pluie battante ;
- $1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ correspond à une protection moyenne contre la pluie battante ;
- $0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ correspond à une bonne protection contre la pluie battante.

Pour le mur en pierre, qui a en général une plus faible absorption capillaire que la brique :

- $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ correspond à une protection moyenne contre la pluie battante ;
- $0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ correspond à une bonne protection contre la pluie battante.

Le modèle du mur en brique prend en compte une lame de mortier verticale, couramment mise en œuvre pour créer une rupture de capillarité. La valeur de l'absorption capillaire de ce mortier chaux ciment est comprise entre $2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ dans les études préliminaires.

4.1.3. • Autres hypothèses de base pour les parois étudiées

Les simulations partent des hypothèses suivantes :

- Il n'y a pas d'autres infiltrations d'eau dans le mur, exceptées celles dues à la pluie. Les simulations ne prennent pas en compte les apports d'humidité par remontée capillaire ou par des installations sanitaires défectueuses ;
- Les simulations considèrent que l'étanchéité à l'air est bien réalisée du côté intérieur de l'isolant et qu'il n'y a ni convection entre l'isolant et le mur ni transport convectif d'humidité du local vers l'extérieur à travers le mur.

La protection contre la pluie battante ne dépend pas uniquement des caractéristiques de la surface extérieure de la paroi mais également de son exposition (orientation, débords de toiture ou d'autres éléments, protection par des bâtiments voisins, hauteur



du bâtiment, etc.). Les simulations partent de l'hypothèse la plus défavorable, c'est-à-dire une orientation Ouest de la paroi sans protection supplémentaire.

Les résultats des simulations ne sont valables que sous ces hypothèses.

4.2. • Conditions externes pour les simulations

4.2.1. • Climat extérieur

Il a été convenu avec le CSTB de ne pas utiliser un climat trop pénalisant (froid et humide comme par exemple celui de Nancy) mais d'utiliser les données météorologiques de Trappes. Elles correspondent à un climat plutôt défavorable par rapport au climat de Paris notamment vis-à-vis des températures et de la pluie battante. Les résultats des simulations peuvent ainsi donner des indications pour Paris. Ils ne sont pas généralisables pour d'autres zones climatiques, pour lesquelles des simulations supplémentaires sont nécessaires (pas incluses dans l'étude).

Les simulations sont fonction de la température, l'humidité d'air relative, le rayonnement solaire, les précipitations et la vitesse et l'orientation du vent comme données météorologiques d'entrée.

4.2.2. • Conditions hygrothermiques du climat intérieur

Le choix des conditions hygrothermiques à l'intérieur du local impacte fortement les résultats. Il a été convenu d'intégrer trois approches qui se rapprochent probablement le plus de la future actualisation de la norme EN ISO 13788 (calcul de Glaser) :

- L'approche de l'EN 15026 pour l'évolution de la température d'air intérieure : 20°C en hiver, glissante avec un maximum de 25°C en été ;
- L'approche du DTU français pour le niveau des apports d'humidité en hiver (Δx constant de +5,0 g/m³ vis-à-vis de l'humidité extérieure) ;
- L'approche de l'actuelle EN 13788 pour l'évolution des apports en humidité selon la température extérieure ($\Delta x = +5,0$ g/ m³ pour une température extérieure <0°C, et une diminution linéaire de la différence de 5 à 0 g/ m³ entre 0°C et 20°C).

Cette hypothèse se situe entre celle de la classe 2 (habitation habituelle) et la classe 3 (utilisation inconnue) de la norme EN ISO 13788 actuelle.



4.3. • *Pré-études des murs courants par simulations en 1D*

Les pré-études permettent d'analyser les différents comportements hygrothermiques dans la partie courante de la paroi. Cette analyse peut être effectuée avec des simulations 1D. Elle permet d'exclure les cas qui présentent déjà un risque de pathologie au niveau de la paroi courante, risque qui serait augmenté par la présence des têtes de poutre.

Les critères d'analyse sont :

- L'évolution du taux d'humidité dans le mur sur plusieurs années. Le taux ne doit pas augmenter d'année en année. La période analysée est de 10 ans ;
- Le taux d'humidité à l'interface entre l'isolant et le plâtre côté extérieur de l'isolant. Il doit rester inférieur à 95%HR pour éviter des risques de gel ;
- Le taux d'humidité côté intérieur de l'isolant. Il ne doit pas dépasser les 80%HR pendant plusieurs semaines pour éviter des risques de moisissure.

Les résultats de ces pré-études montrent que pour des murs en brique la pérennité du complexe dépend essentiellement du coefficient d'absorption capillaire de la surface extérieure du mur. Seulement les cas avec une bonne protection ($A = 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$) respectent les trois critères.

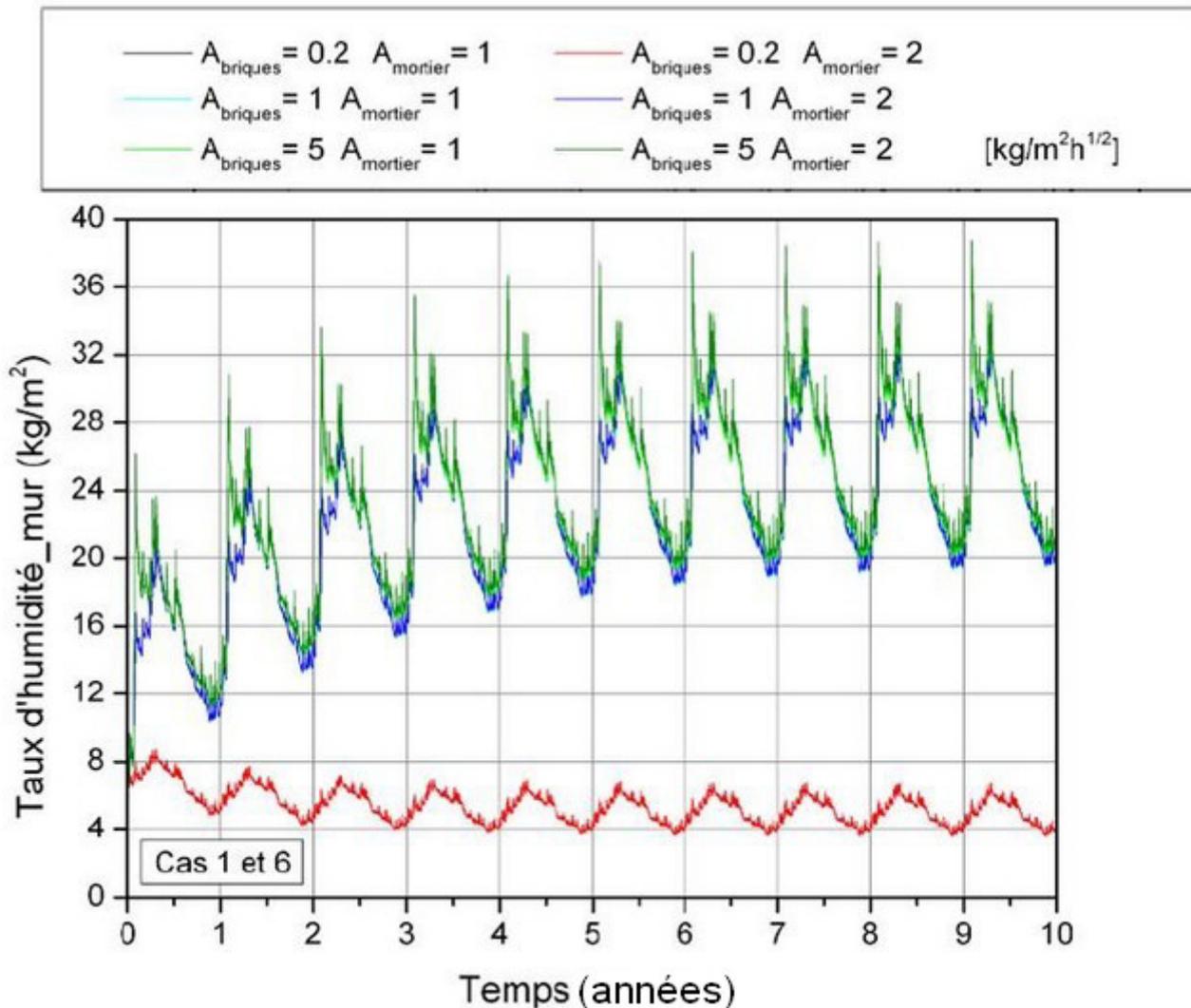
Pour les coefficients d'absorption capillaire $A = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A = 5,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$, le taux d'humidité dans le mur augmente d'année en année, voir (Graphique 7) et (Graphique 8), l'humidité relative côté extérieur de l'isolant reste constamment autour des 95%HR après la 3^{ème} année, voir (Graphique 9) et (Graphique 10) et dans le cas de l'ITI en fibres minérales l'humidité relative côté intérieur de l'isolant dépasse les 80%HR pendant une période critique, voir (Graphique 11).

La période critique est constatée en été quand l'humidité provient de l'extérieur. Elle peut traverser l'isolation en fibres minérales qui a une faible résistance à la diffusion de vapeur d'eau puis rester bloquée derrière le papier Kraft qui a une valeur s_d plus élevée ($s_d = 3,0 \text{ m}$). Ce point n'est pas critique pour l'ITI en polystyrène qui présente une résistance à la diffusion de vapeur d'eau élevée ($s_d = 4,2 \text{ m}$) sachant que l'humidité traversante vers l'intérieur peut s'évaporer (pas de pare-vapeur côté intérieur).

Le (Graphique 12) montre que la situation n'est pas critique pour une ITI en fibres minérales si le coefficient d'absorption capillaire de la brique est faible ($A = 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$).

Les cas avec mur en pierre calcaire ne sont pas critiques étant donné que le coefficient d'absorption capillaire et le transport capillaire à l'intérieur de la pierre sont considérés comme par principe faibles. Les

simulations montrent d'ailleurs que de très faibles différences entre un coefficient $A = 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et un coefficient $A = 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$, voir (Graphique 13), (Graphique 14) et (Graphique 15).



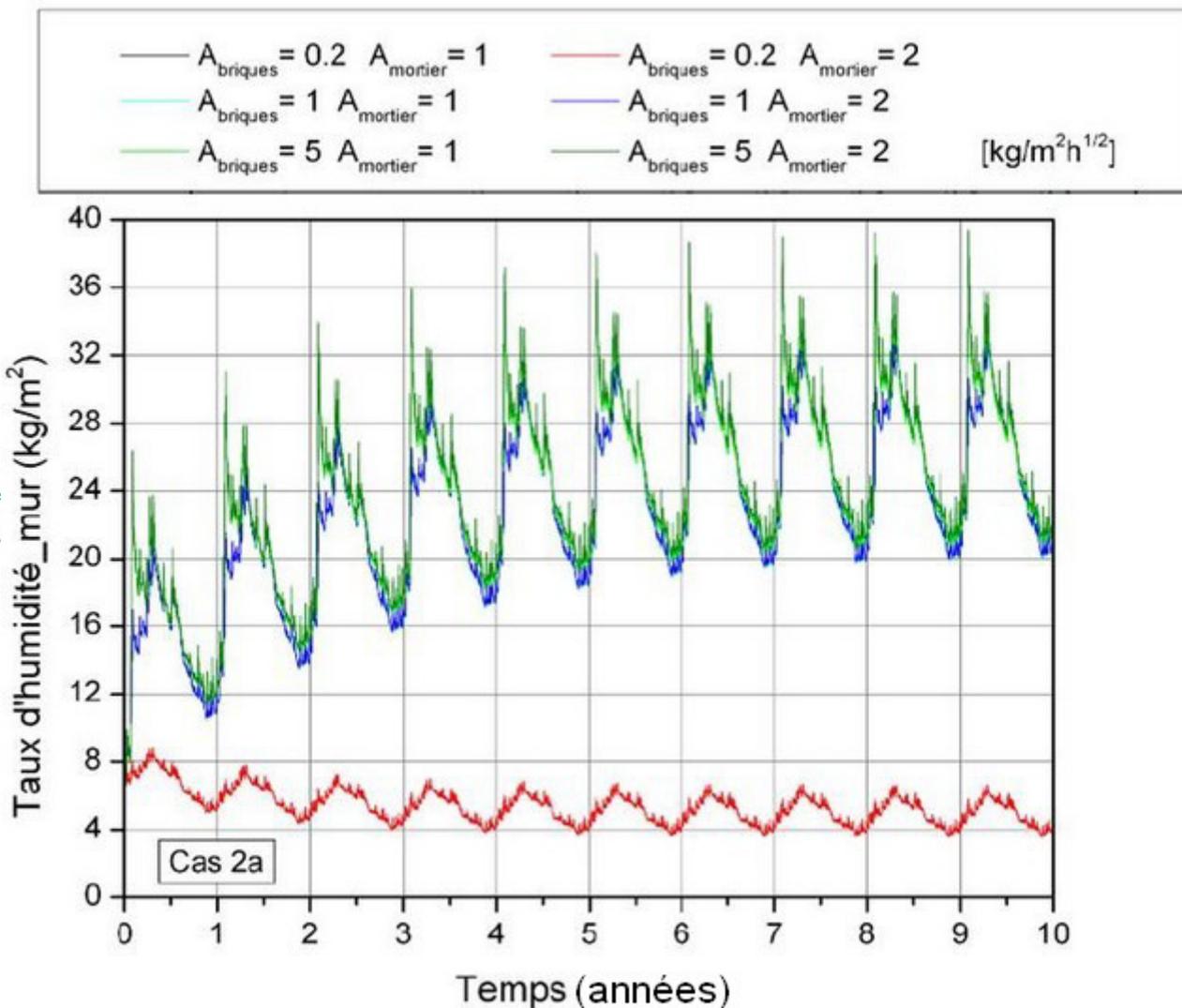
▲ **Graphique 7 :** Mur en brique avec ITI en fibres minérales (Cas 1 et 6). Évolution du taux d'humidité dans le mur sur une durée de 10 ans. Variation des coefficients d'absorption capillaire. Calcul avec modèle 1D. Diagramme 71 dans le rapport final.

Variantes :

$A_{\text{briques}} = 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Pérenne (stable en diminuant)
$A_{\text{briques}} = 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Pérenne (stable en diminuant)

Les courbes de ces deux cas sont superposées, on ne voit que la courbe rouge.

$A_{\text{briques}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Critique (pas de stabilisation)
$A_{\text{briques}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Critique (pas de stabilisation)
$A_{\text{briques}} = 5,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Critique (pas de stabilisation)
$A_{\text{briques}} = 5,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Critique (pas de stabilisation)



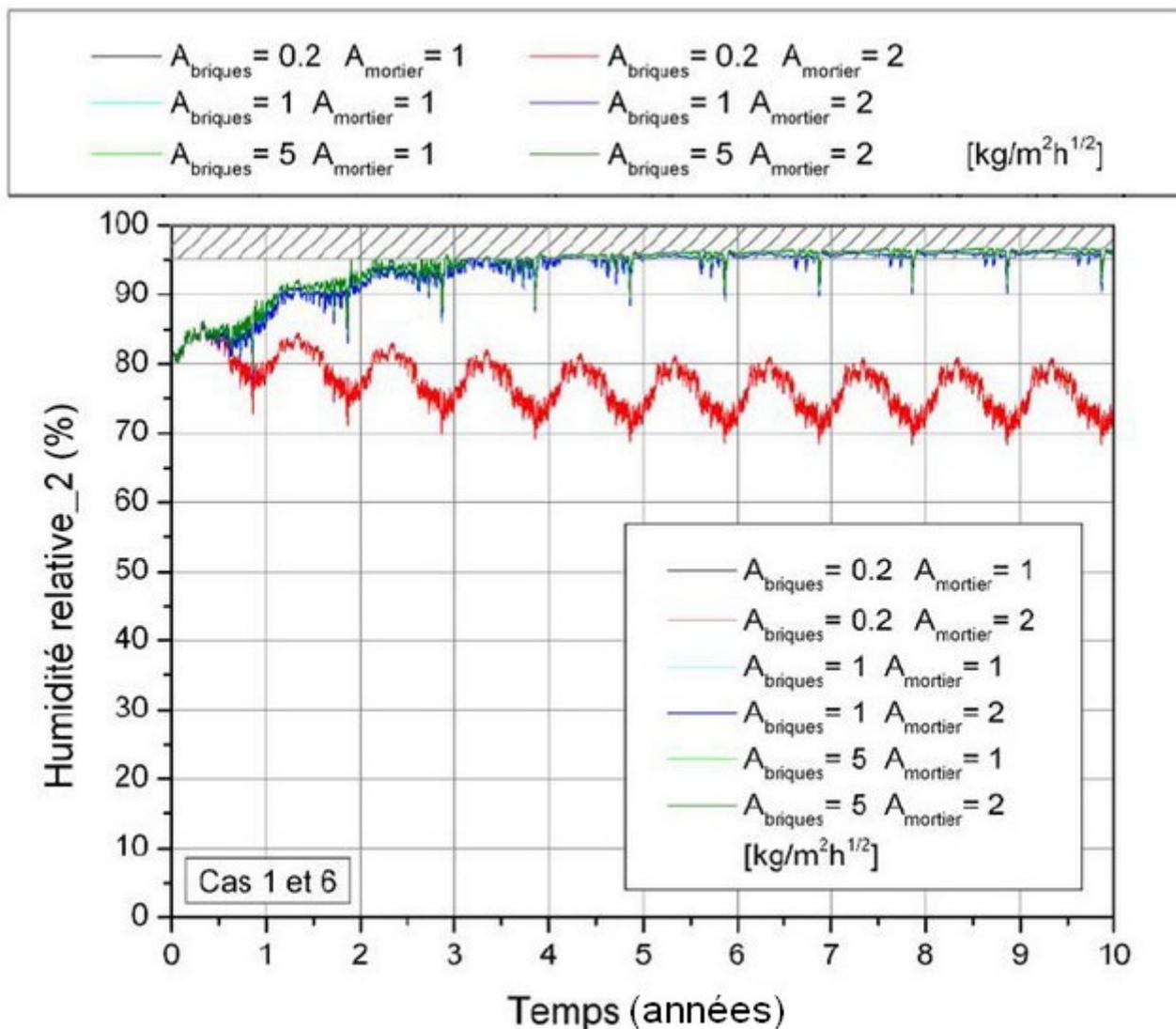
▲ **Graphique 8 :** Mur en brique avec ITI en PSE (Cas 2a). Évolution du taux d'humidité dans le mur sur une durée de 10 ans. Variation des coefficients d'absorption capillaire. Calcul avec modèle 1D. Diagramme 72 dans le rapport final.

Variantes :

A _{briques} = 0,2 kg/(m².h ^{1/2}) et A _{mortier} = 1,0 kg/ (m². h ^{1/2}) :	Pérenne (stable en diminuant)
A _{briques} = 0,2 kg/(m².h ^{1/2}) et A _{mortier} = 2,0 kg/ (m². h ^{1/2}) :	Pérenne (stable en diminuant)

Les courbes de ces deux cas sont superposées, on ne voit que la courbe rouge.

A _{briques} = 1,0 kg/(m².h ^{1/2}) et A _{mortier} = 1,0 kg/ (m². h ^{1/2}) :	Critique (pas de stabilisation)
A _{briques} = 1,0 kg/(m².h ^{1/2}) et A _{mortier} = 2,0 kg/ (m². h ^{1/2}) :	Critique (pas de stabilisation)
A _{briques} = 5,0 kg/(m².h ^{1/2}) et A _{mortier} = 1,0 kg/ (m². h ^{1/2}) :	Critique (pas de stabilisation)
A _{briques} = 5,0 kg/(m².h ^{1/2}) et A _{mortier} = 2,0 kg/ (m². h ^{1/2}) :	Critique (pas de stabilisation)



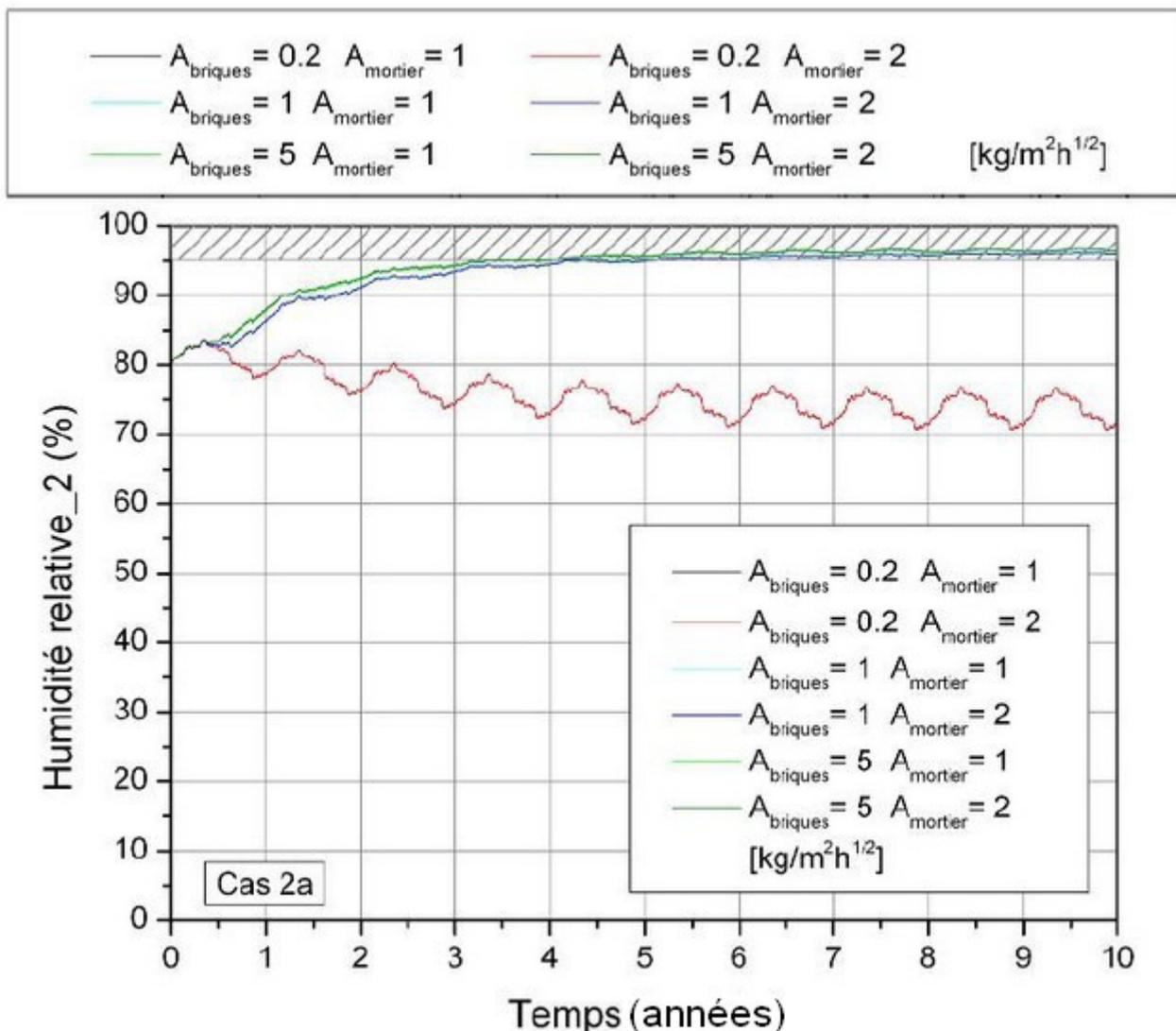
▲ **Graphique 9 :** Mur en brique avec ITI en fibres minérales (Cas 1 et 6). Évolution de l'humidité relative côté extérieur de l'isolant sur une durée de 10 ans. Variation des coefficients d'absorption capillaire. Calcul avec modèle 1D. Diagramme 77 dans le rapport final.

Variantes :

$A_{\text{briques}} = 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Pérenne (stable en diminuant)
$A_{\text{briques}} = 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Pérenne (stable en diminuant)

Les courbes de ces deux cas sont superposées, on ne voit que la courbe rouge.

$A_{\text{briques}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Critique (atteint 95%HR)
$A_{\text{briques}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Critique (atteint 95%HR)
$A_{\text{briques}} = 5,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Critique (atteint 95%HR)
$A_{\text{briques}} = 5,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Critique (atteint 95%HR)



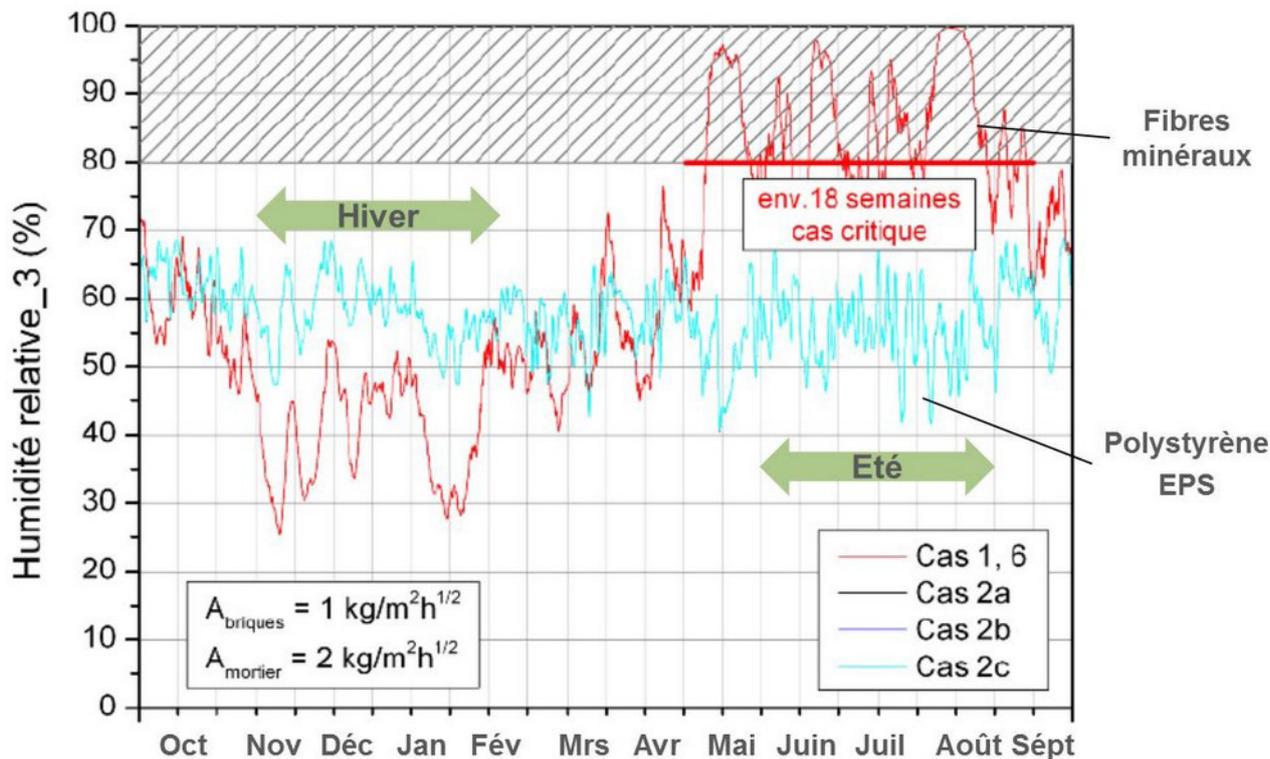
▲ **Graphique 10 :** Mur en brique avec ITI en PSE (Cas 2a). Évolution de l'humidité relative côté extérieur de l'isolant sur une durée de 10 ans. Variation des coefficients d'absorption capillaire. Calcul avec modèle 1D. Diagramme 79 dans le rapport final.

Variantes :

$A_{\text{briques}} = 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Pérenne (stable en diminuant)
$A_{\text{briques}} = 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Pérenne (stable en diminuant)

Les courbes de ces deux cas sont superposées, on ne voit que la courbe rouge.

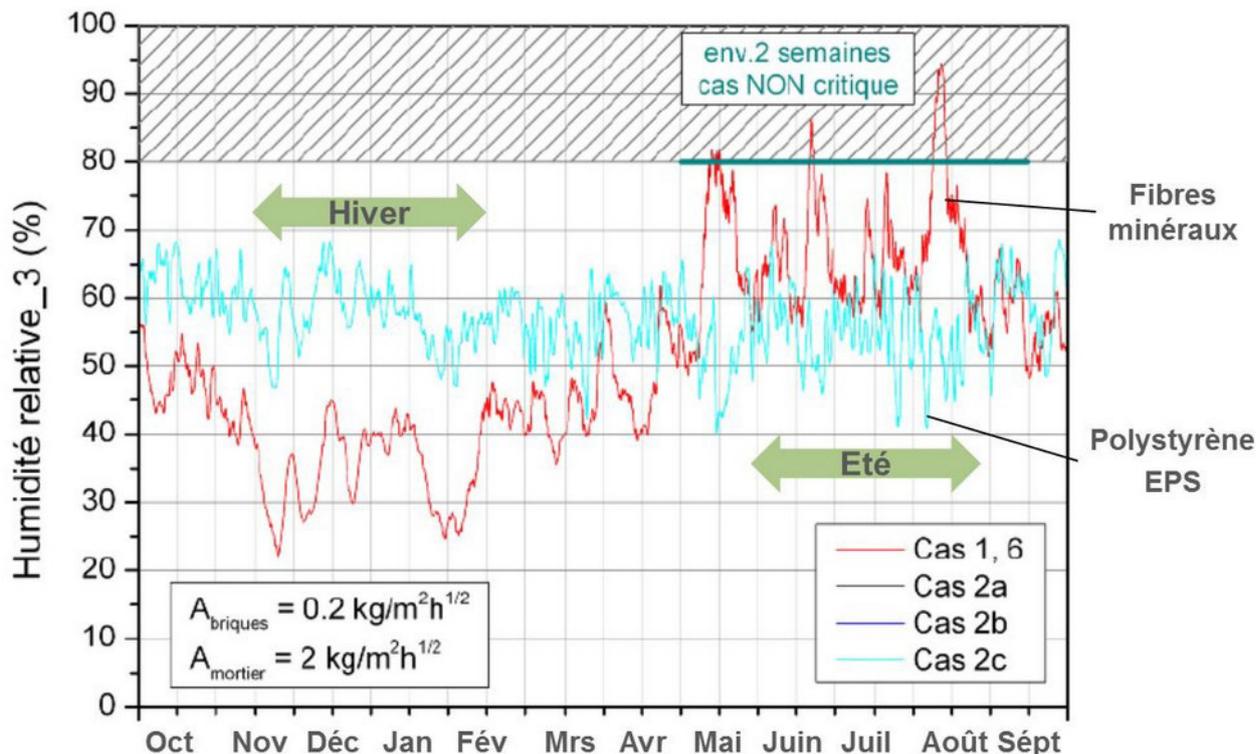
$A_{\text{briques}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Critique (atteint 95%HR)
$A_{\text{briques}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Critique (atteint 95%HR)
$A_{\text{briques}} = 5,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Critique (atteint 95%HR)
$A_{\text{briques}} = 5,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ et $A_{\text{mortier}} = 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$:	Critique (atteint 95%HR)



▲ **Graphique 11 :** Variante avec $A_{briques} = 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2.\text{h}^{1/2})$ et $A_{mortier} = 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2.\text{h}^{1/2})$ Comparaison des 5 cas avec mur en brique concernant l'humidité relative à la position 3 (côté intérieur de l'isolant, interface avec le BA13 dans le cas avec EPS et interface avec le papier Kraft dans le cas des fibres minérales). Détail de la 10^{ème} année. Calcul avec modèle 1D. Diagramme 56 dans le rapport final.

Les cas 1 et 6 (fibres minérales) sont critiques (plusieurs semaines audessus de 80%HR). Les courbes de ces deux cas sont superposées, on ne voit que la courbe rouge.

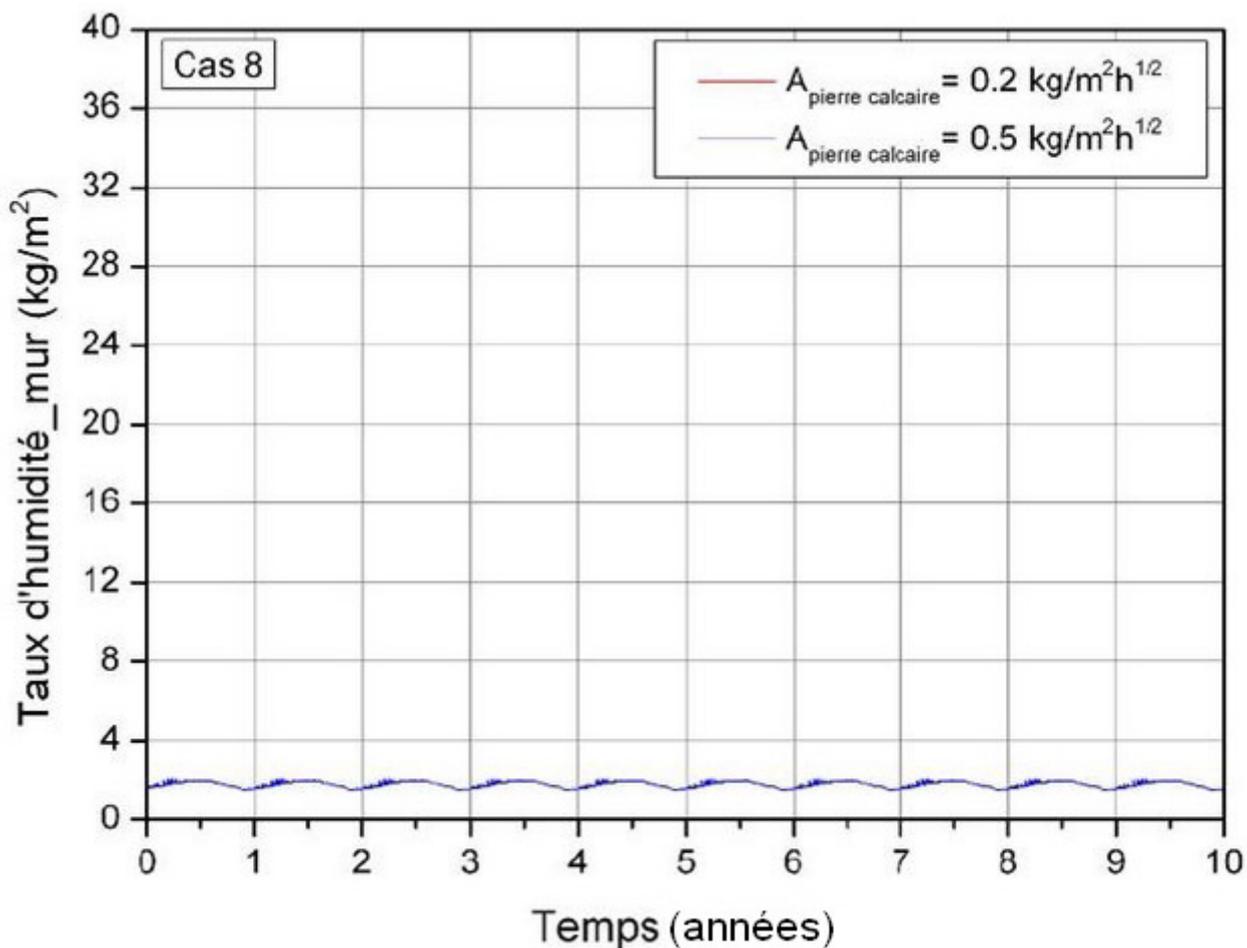
Les autres cas ne sont pas critiques. Leurs courbes sont également superposées, on ne voit que la courbe bleu clair.



▲ **Graphique 12 :** Même graphique que Graphique 11 mais avec $A_{briques} = 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2.\text{h}^{1/2})$ et $A_{mortier} = 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2.\text{h}^{1/2})$

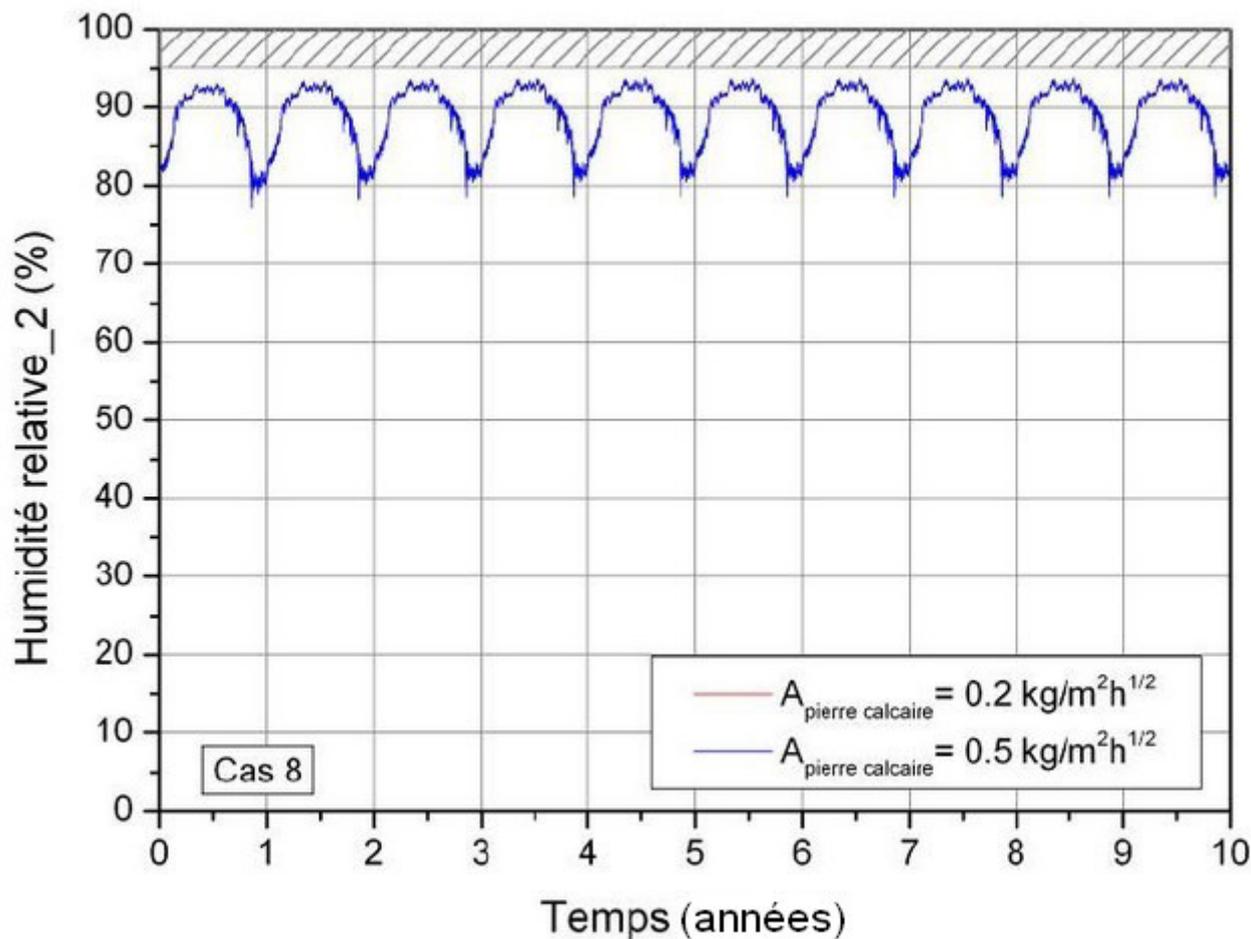


Les deux cas avec fibres minérales ne sont plus critiques même l'humidité relative dépasse ponctuellement les 80%HR, périodes trop courtes pour le développement de moisissures.



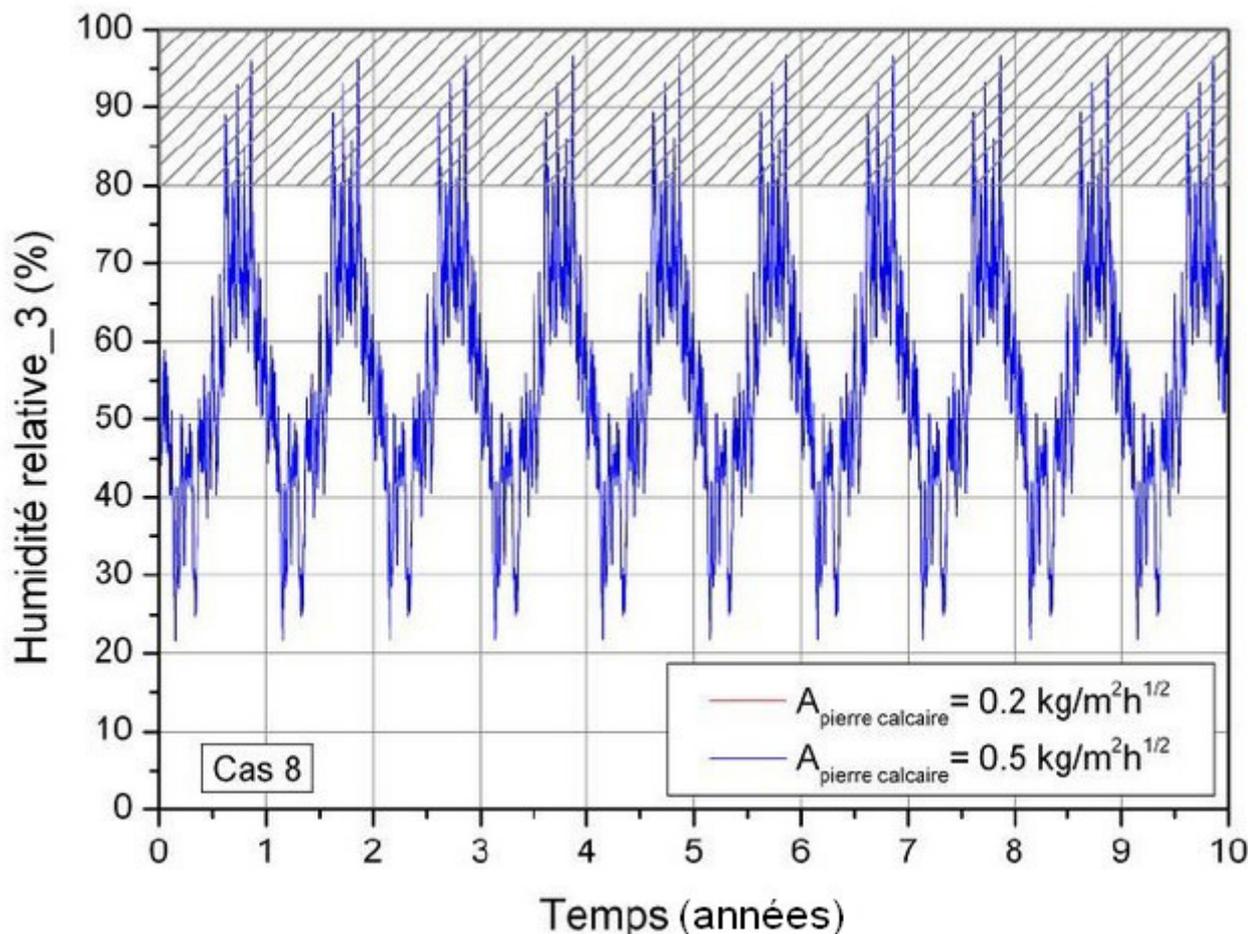
▲ Graphique 13 : Mur en pierre calcaire avec ITI en fibres minérales (Cas 8). Évolution du taux d'humidité dans le mur sur une durée de 10 ans. Variation des coefficients d'absorption capillaire. Calcul avec modèle 1D. Diagramme 75 dans le rapport final.

Les deux variantes ne sont pas critiques sans différence visible sur les résultats. Les courbes sont superposées, on ne voit que la courbe bleue.



▲ **Graphique 14 :** Mur en pierre calcaire avec ITI en fibres minérales (Cas 8). Évolution de l'humidité relative côté extérieur de l'isolant sur une durée de 10 ans. Variation des coefficients d'absorption capillaire. Calcul avec modèle 1D. Diagramme 85 dans le rapport final.

Les deux variantes ne sont pas critiques sans différence visible sur les résultats. Les courbes sont superposées, on ne voit que la courbe bleue.



▲ **Graphique 15 :** Mur en pierre calcaire avec ITI en fibres minérales (Cas 8). Évolution de l'humidité relative côté intérieur de l'isolant sur une durée de 10 ans. Variation des coefficients d'absorption capillaire. Calcul avec modèle 1D. Diagramme 95 dans le rapport final.

Les deux variantes ne sont pas critiques (malgré un dépassement ponctuel des 80%HR) sans différence visible sur les résultats. Les courbes sont superposées, on ne voit que la courbe bleue.

Si on compare ces résultats à d'autres études réalisées sur ce sujet (p.ex. [Borsch-Laaks 2012]) on s'aperçoit du palier qualitatif à partir d'un certain coefficient d'absorption capillaire (quelque part entre 0,2 et 0,5 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$). En dessous de ces valeurs, même avec des épaisseurs d'isolants très importantes, les complexes ne présentent pas de risques, alors qu'au-dessus de ces valeurs, même avec de faibles épaisseurs d'isolants, on peut observer des pathologies (cf. aussi [Borsch-Laaks 2012-2] et [Künzel et al 2012]).

L'enseignement majeur des pré-études est donc, que la protection des façades – surtout pour celle en brique apparentes – contre la pluie battante est essentielle en isolation par l'intérieur. Les risques sont sensiblement plus faibles pour les murs en pierre calcaire.

Etant donné que c'est le seul cas qui ne présente pas de risque au niveau des parois courantes, une absorption capillaire de 0,2 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ a été retenue pour les simulations en 2D.

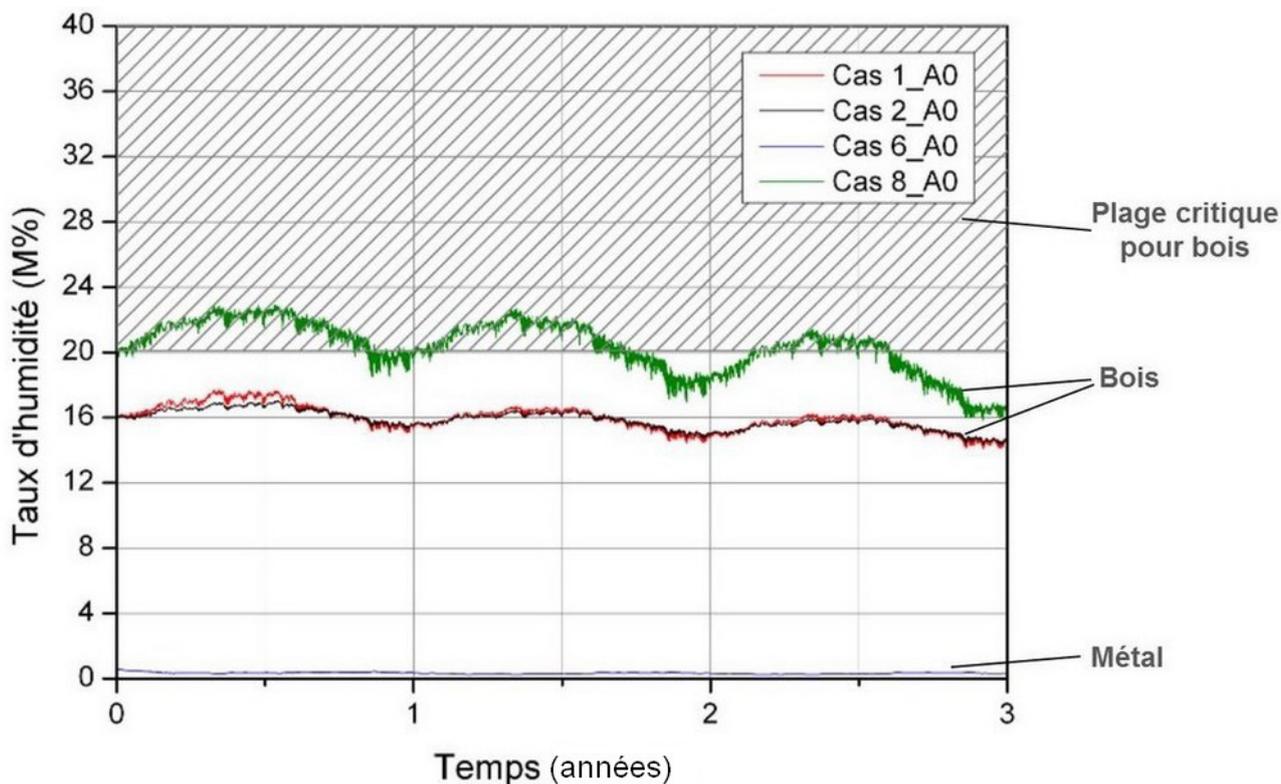
4.4. • Simulations en 2D des liaisons poutres – murs extérieurs

Les résultats des simulations sont représentés pour différents points autour de la tête de poutre, voir (Schéma 3), (Schéma 4), (Schéma 5) et (Schéma 6). Ces derniers sont déterminés par la combinaison d'une lettre (position du point le long de la poutre) et un chiffre (position radiale autour de la poutre) :

- La position A se situe à l'extrémité de la poutre dans le mur ;
- la position B se situe au percement de la surface **extérieure** de l'isolant par la poutre ;
- la position C se situe au percement de la surface **intérieure** de l'isolant par la poutre ;
- la position 0 se trouve sur le côté de la poutre dans un modèle avec symétrie radiale ;
- la position 1 se trouve au-dessus de la poutre (plancher) ;
- la position 2 se trouve en-dessous de la poutre (plafond) ;
- les positions I0 et I1 se trouvent à une certaine distance de la poutre sur la surface extérieure de l'isolant.

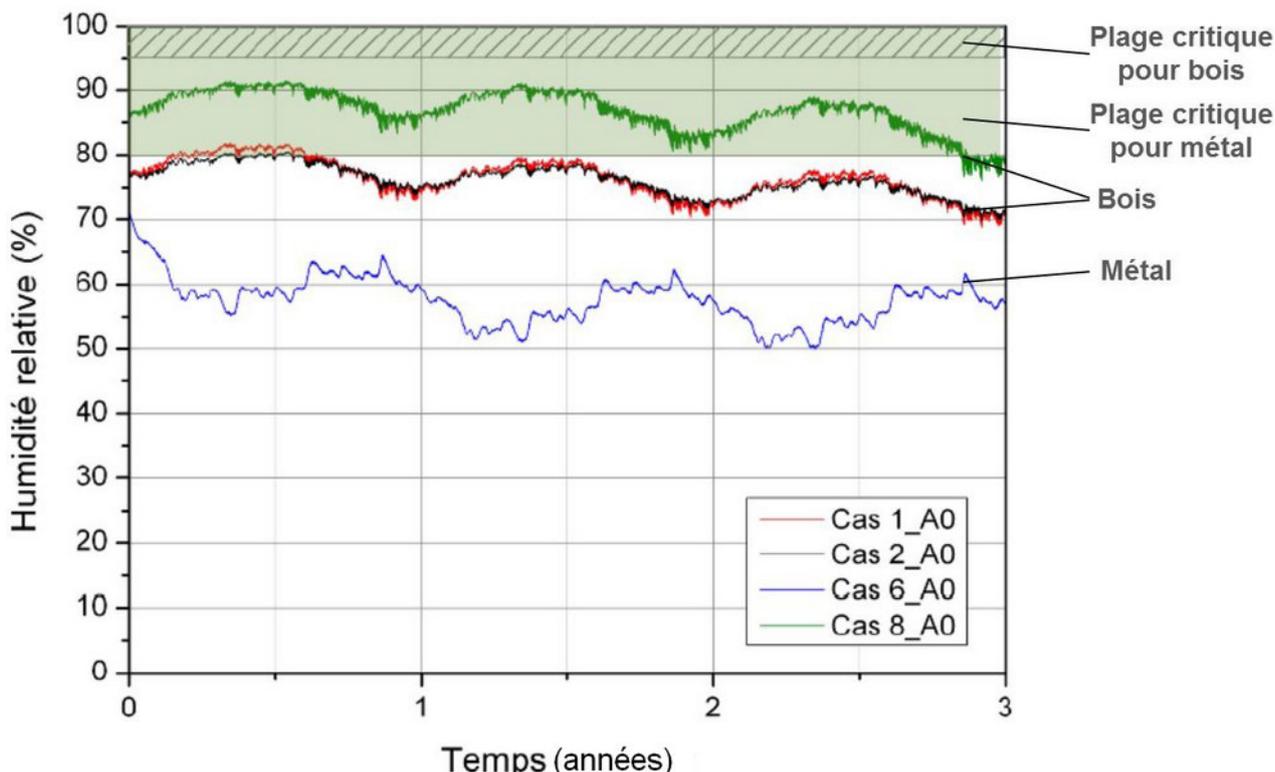
Les critères d'analyse sont :

- L'évolution du taux d'humidité à la surface de la poutre sur plusieurs années. Le taux ne doit pas augmenter d'année en année et doit rester en dessous de 20% pour le bois. La durée de l'analyse est de 3 ans ;
- le taux d'humidité relative de l'air près de la surface de la poutre. Il doit être inférieur à 80%HR pour éviter le développement de rouille dans le cas du métal et inférieur à 95%HR pour éviter de développement de moisissures dans le cas du bois. Du côté extérieur de l'isolant (les positions B et I) l'humidité relative doit rester inférieure à 95%HR pour éviter les risques de gel au niveau du plâtre.



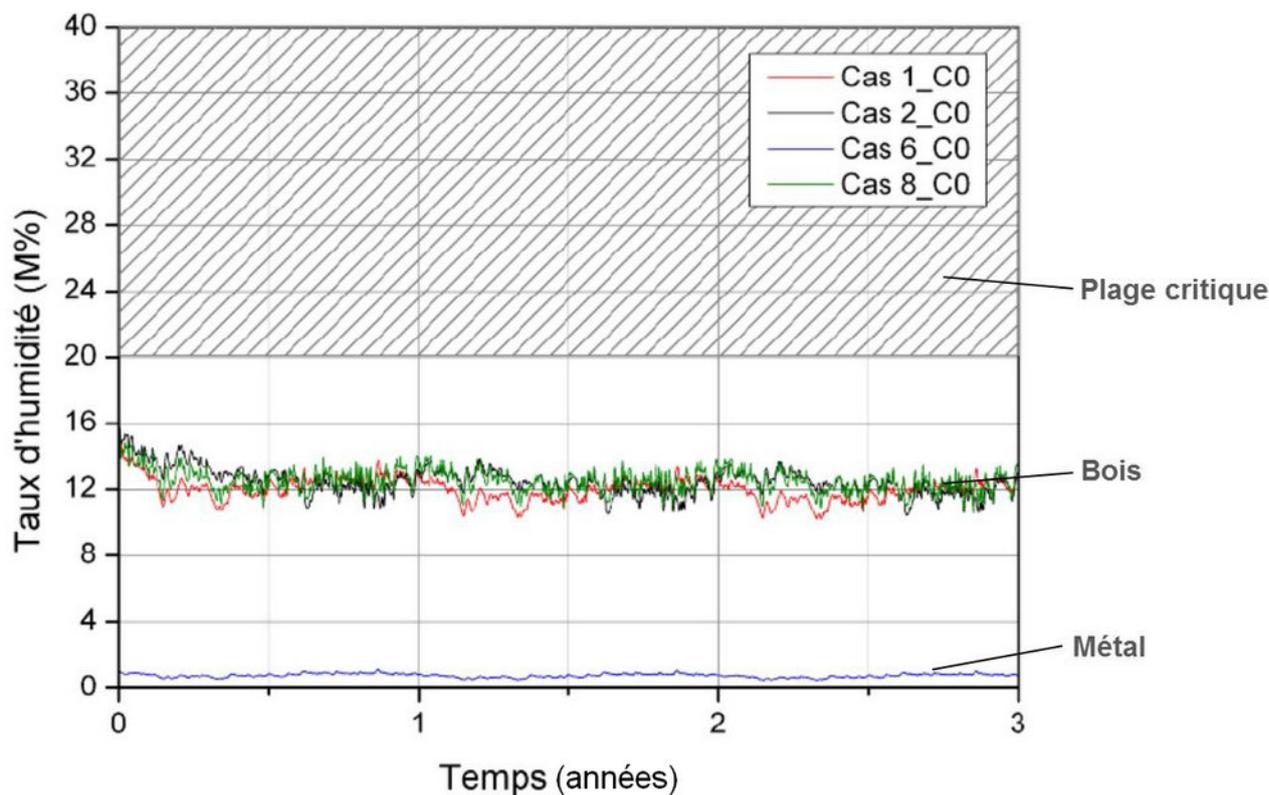
▲ **Graphique16 :** Évolution du taux d'humidité massique dans le matériau à l'extrémité de la tête de poutre (Position A0, symétrie radiale) sur une durée de 3 ans. Comparaison des 4 cas étudiés. Comme le métal n'est pas hygroscopique, le taux d'humidité est nul.

Aucun des cas étudiés ne présente une situation critique au niveau des têtes de poutre. Les taux d'humidité restent en-dessous des seuils critiques. Dans le cas du mur en pierre avec poutre bois, la teneur en eau massique dans le bois à l'extrémité de la tête de poutre monte au début légèrement au-dessus des 20%_m (Graphique 16). Mais ce taux diminue dans le temps et reste inférieur à 20%_m après deux ans et demi. Étant donné que le seuil de 20%_m dispose d'une grande plage de sécurité, ce cas peut être considéré comme non-critique.

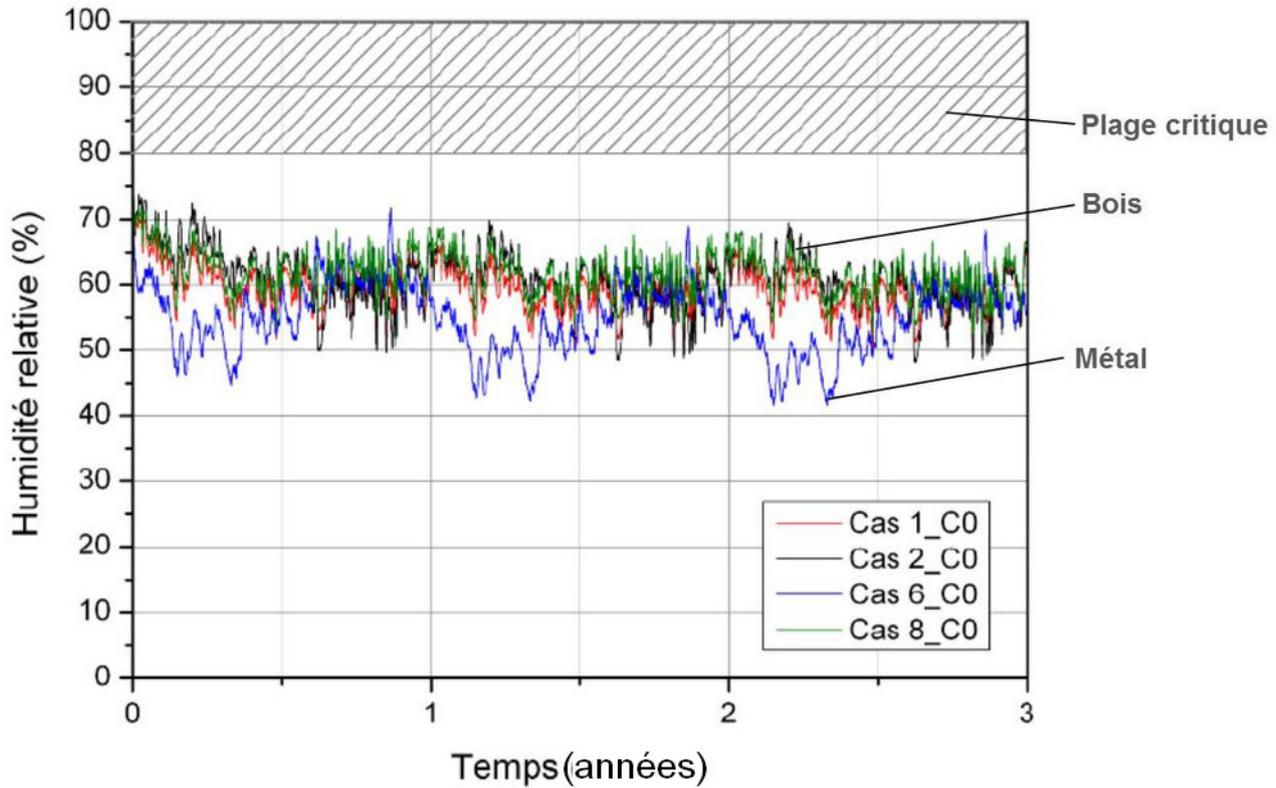


▲ **Graphique 17 :** Évolution de l'humidité relative dans la lame d'air à l'extrémité de la tête de poutre (Position A0, symétrie radiale) sur une durée de 3 ans. Diagramme 112 dans le rapport final. Comparaison des 4 cas étudiés.

- Cas 1 (Brique / bois / fibres minérales) :** Pérenne (stable <95%HR)
- Cas 2 (Brique / bois / PSE) :** Pérenne (stable <95%HR)
- Cas 6 (Brique / métal / fibres minérales) :** Pérenne (stable <80%HR)
- Cas 8 (Pierre / bois / fibres minérales) :** Pérenne (stable <95%HR)



▲ **Graphique 18 :** Évolution du taux d'humidité massique dans le matériau au niveau de la face intérieure de l'isolant sur une durée de 3 ans. Comparaison des 4 cas étudiés. Comme le métal n'est pas hygroscopique, le taux d'humidité est nul. Diagramme 114 dans le rapport final.



▲ **Graphique 19 :** Évolution de l'humidité relative à proximité de la poutre au niveau de la face intérieure de l'isolant sur une durée de 3 ans. Comparaison des 4 cas étudiés. Diagramme 114 dans le rapport final.

Les conditions hygrothermiques autour de la poutre s'améliorent progressivement de l'extérieur vers l'intérieur pour les 4 cas. A l'endroit où la poutre perce la surface intérieure de l'isolant, le taux d'humidité de la poutre et l'humidité relative de l'air sont loin de la plage critique

(Graphique 18) et (Graphique 19).

Conclusions

5



Une isolation thermique par l'intérieur des murs en brique ou en pierre des bâtiments anciens influence significativement le comportement hygrothermique du mur. La diffusion de vapeur d'eau de l'intérieur vers l'extérieur, l'éventuelle condensation sur l'ancienne surface intérieure ainsi que le potentiel de séchage restreint du mur extérieur après un épisode pluvieux sont en effet à prendre en considération.

L'isolation thermique par l'intérieur réduit la température du mur en hiver et de ce fait le potentiel de séchage. Empêcher l'infiltration d'humidité dans le mur devient alors indispensable. Ceci est surtout valable pour la protection contre la pluie battante. Si celle-ci peut être assurée par la surface extérieure du mur – ce qui est le cas pour des coefficients d'absorption capillaire $A < 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ indépendant de l'exposition – on est en principe libre du choix du système d'isolation par l'intérieur. Même avec des épaisseurs d'isolation importantes de l'ordre de 16 cm avec une résistance thermique $R = 5 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, les simulations hygrothermiques ne montrent pas de situation critique au niveau des têtes de poutres.

L'application d'un pare-vapeur côté intérieur de l'isolant peut être nécessaire selon les caractéristiques de la paroi existante pour limiter la diffusion de vapeur d'eau. Les qualités du pare-vapeur, notamment sa résistance à la vapeur d'eau, doivent être dimensionnées soigneusement et au cas par cas.

Une très bonne étanchéité à l'air au niveau des poutres est une condition préalable et indispensable pour le bon fonctionnement hygrothermique du système. Un transport d'humidité par convection de l'intérieur vers le côté froid de l'isolation ou le long des poutres vers l'extérieur doit être exclu.

Si le coefficient d'absorption capillaire est trop élevé pour la mise en œuvre d'une ITI, on peut avoir recours à des procédés d'hydrofugation. L'hydrofugation est une mesure préventive pour protéger les



façades exposées aux intempéries. Empêchant l'absorption de l'eau par capillarité, ce traitement incolore et non filmogène préserve la diffusion de vapeur d'eau à travers le support. Des coefficients durablement inférieurs à $0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ peuvent être réalisés sans problème.

Si on ne peut pas, ou seulement d'une manière insuffisante, assurer une bonne protection contre la pluie battante, des systèmes d'isolation qui permettent un bon séchage du mur vers l'intérieur doivent être préconisés. Une réduction des épaisseurs d'isolation n'est nécessaire que dans certains cas spécifiques. Des matériaux d'isolation ouverts à la diffusion de vapeur d'eau en lien avec des pare-vapeur hygrovariables peuvent représenter une bonne solution pour les parties courantes des murs. Ce système permet d'associer faible apport en humidité pendant l'hiver et bon potentiel de séchage vers l'intérieur. Il oblige néanmoins à la bonne mise en oeuvre de l'étanchéité à l'air de la construction. Des matériaux d'isolation avec une capacité de transport capillaire ont également fait leur apparition ces dernières années. Ils peuvent être envisagés pour des situations d'humidité critiques. Leur mise en oeuvre et la réalisation de l'étanchéité à l'air sont relativement faciles. Leur principe de fonctionnement nécessite par contre une augmentation du taux d'humidité du côté extérieur de l'isolant pour déclencher le transport capillaire vers l'intérieur. Il faut s'assurer que le mur existant peut supporter ce taux d'humidité. Ces matériaux ont le désavantage d'avoir une conductivité thermique relativement élevée par rapport à d'autres isolants, ce qui nécessite une épaisseur plus importante pour arriver à des performances thermiques intéressantes. L'utilisation de ces solutions reste très innovante. Elles ne peuvent donc être envisagées qu'au cas par cas après une étude spécifique.

Une analyse préalable de la qualité de la paroi extérieure par rapport à la protection contre la pluie battante et de son exposition est nécessaire pour trouver la solution adaptée au cas précis. Cette analyse nécessite des compétences et une certaine expérience dans l'évaluation et/ou la mesure de l'absorption capillaire à la surface du mur ainsi que dans la caractérisation de la situation générale. Le coefficient A peut être déterminé en laboratoire à partir d'échantillons prélevés ou évalués in situ avec le test à pipe de Karsten. Le cas échéant le choix du système d'isolation peut être validé par une simulation hygrothermique.

Discussion de la problématique au niveau européen

6



La problématique de l'isolation par l'intérieur en lien avec les têtes de poutre n'est pas une spécificité française : on la retrouve dans tous les pays européens qui ont engagés dans les deux dernières décennies la rénovation énergétique de leur parc existant. Une grande partie de ces parcs se compose de bâtiments du 19^{ème} et de la première moitié de 20^{ème} siècle, donc en général des bâtiments en pierre ou en brique avec des planchers bois. La question relative aux risques de pathologies au niveau des têtes de poutre lors d'une isolation par l'intérieur fait régulièrement l'objet de débats scientifiques. On trouve des études à ce sujet depuis les années 70 (voir [Bibliographie] à la fin du document).

Elles renseignent notamment sur les impacts des caractéristiques des matériaux, de la protection contre la pluie battante, de la diffusion de vapeur d'eau par l'intérieur et du transport convectif d'humidité vers les têtes de poutres sur le comportement hygrothermique des poutres et les risques de pathologies. La conclusion de ces études est généralement la suivante : l'isolation par l'intérieur est compatible avec les planchers bois des bâtiments anciens si certaines préconisations sont respectées.

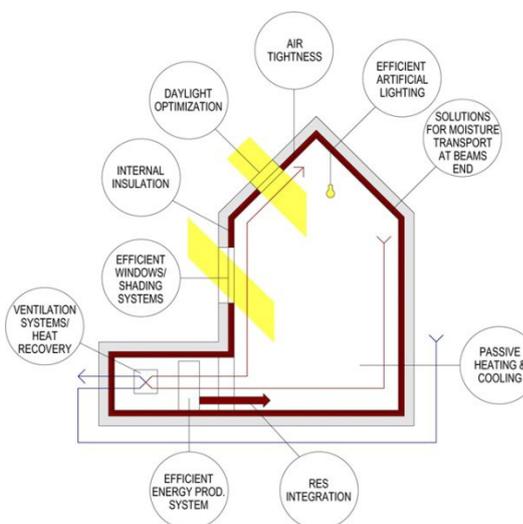
En Allemagne, ce débat entre experts a abouti en 2009 à l'édition d'un guide de conception pour l'isolation par l'intérieur des bâtiments existants [WTA 6-4-09/D] qui résume l'état de l'art actuel. Il décrit les facteurs qui entrent en jeu, met en garde vis-à-vis des éventuelles pathologies et propose une méthode simplifiée de justification pour le fonctionnement hygrothermique de la construction.

Plusieurs descriptions de projets de rénovations dans différents pays européens ayant traités la problématique des planchers bois avec façades en brique ou en pierre apparente se trouvent dans la littérature scientifique (voir par exemple [Thorne 2013], [Wörndle et al 2013] [Bräunlich et al 2013]). Plusieurs de ces projets ont conduit à des mesures hygrothermiques pour vérifier la pérennité des solutions



appliquées. Des conditions critiques ou des pathologies ne sont apparues dans aucun des cas observés.

La question de l'isolation par l'intérieur en présence de têtes de poutres fait partie des thèmes abordés par le projet européen [3ENCULT] (Efficient Energy for EU Cultural Heritage), dans lequel 21 partenaires européens étudient la faisabilité d'une réduction des besoins énergétiques du patrimoine historique entre un facteur 4 et un facteur 10 selon les typologies et les valeurs patrimoniales. Le projet est financé par le 7^{ème} programme-cadre de l'Union Européenne et dure de 2010 jusqu'en 2014.



▲ Schéma 20 :Thèmes abordés dans le cadre du projet européen 3ENCULT

(source : www.3encult.eu)

Références

7

- [3ENCULT] : Efficient Energy for EU Cultural Heritage. Projet dans le 7^{ème} programme-cadre de l'Union Européenne : www.3encult.eu.
- [ASHRAE160] : ASHRAE ANSI Standard 160: Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. 2009.
- [Borsch-Laaks 2012] : BORSCH-LAAKS, Robert; Innendämmung in Holzbauweise. Erfahrungen aus Langzeitfeuchtemessungen und bau-physikalischer Planung. Tagungsband 3. Internationaler Holz[Bau]Physik-Kongress 2012, AKÖH, Herford, 2012.
- [Borsch-Laaks 2012-2] : BORSCH-LAAKS, Robert; WALTHER, Wilfried : "Keine Angst vor Innendämmung" dans Tagungsband 3. Internationaler Holz[Bau]Physik-Kongress 2012, AKÖH, Herford, 2012.
- [Bräunlich et al 2013] : BRÄUNLICH, Kristin ; KAUFMANN, Berthold : Messung der Holzfeuchteentwicklung in Balkenköpfen bei einer Sanierung mit Innendämmung. Contribution pour la 17^{ème} conférence des bâtiments passifs 2013 à Francfort, publiée dans les actes ; Passivhaus Institut Darmstadt, 2013.
- [DIN 4108-3] : DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Juli 2001.
- [Künzel et al 2012] : KÜNZEL, Hartwig M. ; FITZ, Cornelia; KRUS, Martin : Feuchteschutz verschiedener Fassadensysteme – Beanspruchungen, Systemanforderungen und Langzeitbeständigkeit. Publié dans Européischer Sanierungskalender 2011 de Venzmer (ed.), Beuth-Verlag Berlin 2010.



- [NF EN 15026] : NF EN 15026 : Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments. Évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique. Avril 2008.
- [Thorne 2013] : THORNE, Anne : Detailing for retrofit in London, terrace houses, solid walls and internal insulation. Contribution pour la 17^{ème} conférence des bâtiments passifs 2013 à Francfort, publiée dans les actes ; Passivhaus Institut Darmstadt, 2013.
- [Wörndle et al 2013] : WÖRNDLE, Barbara; STUFFER, Oscar : Maßgeschneiderte Lösungen für ein historisches Wohnhaus im Zentrum von Bozen. Contribution pour la 17^{ème} conférence des bâtiments passifs 2013 à Francfort, publiée dans les actes ; Passivhaus Institut Darmstadt, 2013.
- [WTA 6-4-09/D] : WTA-Merkblatt 6-4-09/D: Innendämmung nach WTA I – Planungsleitfaden. Mai 2009.
- [WTA E 6-5-12/D] : WTA-Merkblatt E 6-5-12/D: Innendämmung nach WTA II – Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren. Entwurf November 2012.

Bibliographie



- **ARNOLD, U.** : "Untersuchungen zum kritischen Feuchte-Temperatur-Verhältnis des Pilzbefalls an Holzbalkenköpfen" Masterthesis HAWK Hildesheim / Minden / Göttingen 2009.
- **BANGERT, A.; PEPPER, S.; BASTIAN, Z.**: „Inserting the ends of wooden beams in the airtight layer“, Contribution pour la 16^{ème} conférence des bâtiments passifs 2012 à Hanovre, publiée dans les actes ; Passivhaus Institut Darmstadt, 2012.
- **BIALAS, Adam** : "Holzbalkendecken – Sichere Innendämmung von Bestandsgebäuden" contributions dans Bauverlag BV GmbH : Leitfaden Innendämmung, Bauverlag Gütersloh, 2013.
- **BIANCHI JANETTI, M.; OCHS F.; PFLUGER R.; FEIST, W.** : "Hygrothermische 3D-Simulation von Bauteilen mit COMSOL MULTIPHYSICS" Fourth German-Austrian IBPSA Conference, Berlin University of the Arts Berlin 2012.
- **BORSCH-LAAKS, Robert** : "Zur Schadensanfälligkeit von Innendämmungen" contribution dans Oswald, R. : Aachener Bausachverständigentage 2010 Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2011.
- **BORSCH-LAAKS, Robert** : "Holzbalkendecken bei der Bestandsanierung" dans Tagungsband 2. Internationaler Holz[Bau] Physik-Kongress 2011, AKÖH, Herford, 2011.
- **BORSCH-LAAKS, Robert; SIMONS, Paul** : "Wie dick darf die Innendämmung sein?" dans Tagungsband 3. Internationaler Holz[Bau]Physik-Kongress 2012, AKÖH, Herford, 2012.
- **ENGEL, Jens; HEINZE, Philip, PLAGGE, Rudolph** : "Schlagregensicherheit innen gedämmter Fassaden" contributions dans Bauverlag BV GmbH : Leitfaden Innendämmung, Bauverlag Gütersloh, 2013.



- ESSMANN, F.:"Balkenköpfe in Außenwänden – Bauschaden durch Innendämmung?" contribution pour les 13^{ème} EIPOS Sachverständigentage Bauschadensbewertung, Dresde, 2011.
- FEIST, Wolfgang (ed.): "Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten : Passivhauskomponenten und Innendämmung" Protokollband Nr. 32 des AK Kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2005.
- FEIST, Wolfgang (ed.): "EnerPHit Planerhandbuch" Altbauten mit Passivhauskomponenten fit für die Zukunft machen. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2012.
- GNOTH, S.; STRANGFELD, P.; STOPP, H.: "Hygrothermisches Verhalten eingebetteter Holzbalkenköpfe im innengedämmten Außenmauerwerk", contribution dans Bauphysik 27, N°2 2005 Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 2005.
- KEHL, Daniel : "Holzbalkenköpfe im Mauerwerk" dans Tagungsband 3. Internationaler Holz[Bau]Physik-Kongress 2012, AKÖH, Herford, 2012.
- KEHL, Daniel : "Pilzmodelle – Ist der Befall vorhersehbar?" dans Tagungsband 2. Internationaler Holz[Bau]Physik-Kongress 2011, AKÖH, Herford, 2011.
- KÜNZEL, Hartwig M.:"Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten." Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- KÜNZEL, Hartwig M.; BINDER, A., ZIRKELBACH, Daniel : "Bemessung von Innendämmung." dans Innendämmung im Bestand, Gerd Geburtig (ed.), Fraunhofer IRB Verlag, 2010.
- KÜNZEL, Hartwig M.; ZIRKELBACH, Daniel : "Kapillaraktive Innendämmungen" dans Tagungsband 3. Internationaler Holz[Bau] Physik-Kongress 2012, AKÖH, Herford, 2012.
- LAMERS, Reinhard : "Innendämmung von Fachwerkhäusern. Auf den Schlagregenschutz kommt es an." contribution dans Holzbau 3/2001 Verlag Kastner, Wolnzach, 2001.
- LOGA, T.:"Energetische Modernisierung eines Gründerzeithauses in Wiesbaden" contribution pour le 6^{ème} Leipziger Bauschadenstag, Leipzig, 2005.
- MELDER, Karin; BÜSCH, Martin : "Innendämmung bei Holzbalkendecken. Holzbalkendecken – "Problemzone" bei Innendämmung." dans Bauhandwerk, N° 1/2 2013.
- MÜLLER, Uwe : "Holzbalkenköpfe in historischen Mauerwerk" dans Tagungsband 2. Internationaler Holz[Bau]Physik-Kongress 2011, AKÖH, Herford, 2011.

- NF EN ISO 10456 : "Matériaux et produits pour le bâtiment. Propriétés hygrothermiques" Juin 2008.
- NF EN ISO 13788 : "Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments. Température superficielle critique et la condensation dans la masse." Décembre 2001.
- PEPPER, S.; KAUFMANN, B.; HASPER, W.; PFLUGER, R.; OCHS, F. : "Innendämmung und Wandfeuchte" contribution dans Deutschen Bauzeitschrift (DBZ), Bauverlag Gütersloh, 2010.
- RUISINGER, Ulrich : "Risikofaktor Balkenkopf? – Holzbalkendecken und die Innendämmung." dans Tagungsband 2. Internationaler Holz[Bau]Physik-Kongress 2011, AKÖH, Herford, 2011.
- RUISINGER, Ulrich; KAUTSCH, Peter; PLAGGE, Rudolf : "Und es funktioniert doch! Innendämmung trotz Holzbalkenköpfe" dans Bauen im Bestand 35 (B+B), n°4 2012.
- SIMONS, Paul : "Fachwerksanierung mit 12 cm Innendämmung. Vierjährige Messungen zum feuchtetechnischen Verhalten." contribution dans Holzbau 1/2000 Verlag Kastner, Wolnzach, 2000.
- STOPP, Horst; STRANGFELD, P.; TOEPEL, T.; ANLAUFT, E. : "Messergebnisse und bauphysikalische Lösungsansätze zur Problematik der Holzbalkenköpfe in Außenwänden mit Innendämmung" contribution dans Bauphysik 32, N°2 2010 Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 2010.
- TROI, A., BENEDIKTER, M. : "Kultureller Wiedergewinn und energetische Sanierung – Faktor 10 im denkmalgeschützten Altbau" 2. Internationales Anwenderforum "Energieeffizienz im Bestand", Kloster Banz, 2008.
- VITANEN, H.; MAKKONEN, L.; PEUHKURI, R.; OJANEN, T.; RUOKOLAINEN, L.; RÄISÄNEN, J. : "Towards modelling of decay risk of wooden materials" European Journal of Wood and Wood Products, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 2010.
- VITANEN, Hannu : "Schimmelpilzwachstum auf Holz" dans Tagungsband 2. Internationaler Holz[Bau]Physik-Kongress 2011, AKÖH, Herford, 2011.
- WORCH, Anatol : "Nachweise und Lösungsstrategien – WTA-Merkblätter zum Thema Innendämmung" contributions dans Bauverlag BV GmbH : Leitfaden Innendämmung, Bauverlag Gütersloh, 2013.
- WTA-Merkblatt 3-17-10/D : "Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen." Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. –WTA, München, Mai 2010.



- WTA-Merkblatt 6-2-01/D : "Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse." Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. – WTA, München, Mai 2002.
- WTA-Merkblatt 6-4-09/F : "Isolation thermique par l'intérieur selon WTA I – guide de conception" Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. – WTA, München, Mai 2009.

PARTENAIRES du Programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) ;
- Association des industries de produits de construction (AIMCC) ;
- Agence qualité construction (AQC) ;
- Confédération de l'artisanat et des petites entreprises du bâtiment (CAPEB) ;
- Confédération des organismes indépendants de prévention, de contrôle et d'inspection (COPREC Construction) ;
- Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) ;
- Électricité de France (EDF) ;
- Fédération des entreprises publiques locales (EPL) ;
- Fédération française du bâtiment (FFB) ;
- Fédération française des sociétés d'assurance (FFSA) ;
- Fédération des promoteurs immobiliers de France (FPI) ;
- Fédération des syndicats des métiers de la prestation intellectuelle du Conseil, de l'Ingénierie et du Numérique (Fédération CINOV) ;
- GDF SUEZ ;
- Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie ;
- Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement ;
- Plan Bâtiment Durable ;
- SYNTEC Ingénierie ;
- Union nationale des syndicats français d'architectes (UNSFA) ;
- Union nationale des économistes de la construction (UNTEC) ;
- Union sociale pour l'habitat (USH).

Les productions du Programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont le fruit d'un travail collectif des différents acteurs de la filière bâtiment en France.



RAPPORT

ÉVALUATION DES RISQUES
DE PATHOLOGIES LIÉES
À L'HUMIDITÉ

AU NIVEAU DES POUTRES
ENCASTRÉES DANS UN MUR
EXTÉRIEUR ISOLÉ PAR L'INTÉRIEUR

SEPTEMBRE 2013

RÉNOVATION

38% des bâtiments du parc existant ont été construits avant 1948. Pour 70% de ces bâtiments, une isolation par l'extérieur n'est pas envisageable. Une isolation thermique par l'intérieur (ITI) est alors nécessaire pour améliorer les performances thermiques de ces bâtiments. Or, lors de travaux d'isolation par l'intérieur, la gestion du pont thermique entre le mur extérieur vertical (pierre, brique) et le plancher (bois ou métal) est complexe, notamment du fait des risques de pathologies liées à l'humidité.

La présente étude analyse le comportement hygrothermique des têtes de poutre au niveau des murs extérieurs lors d'une ITI en bâti ancien.

L'étude montre qu'il est possible, sous certaines conditions préalables, de mettre en œuvre une isolation par intérieur très performante ($R = 5 \text{ m}^2\text{K/W}$) sans déclencher de pathologies au niveau des têtes de poutre. Étant donné que le périmètre de l'étude est restreint (nombre de cas étudiés, matériaux utilisés, données météorologique d'une station, etc.), les résultats ne sont que peu généralisables. Cette étude permet néanmoins de donner quelques premières pistes de réflexion.



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS

« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

Ce programme est une application du Grenelle Environnement. Il vise à revoir l'ensemble des règles de construction, afin de réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

