



Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien

Synthèse bibliographique pour la rénovation performante à destination des concepteurs et des artisans

Document rédigé par Enertech SCOP



Pour



En partenariat avec



Informations

La reproduction du document est autorisée en citant les sources : *Enertech pour Oktave et le programme Climaxion de la Région Grand Est et de l'ADEME.*

Toute reproduction partielle (extrait) devra comporter impérativement les parties « *Objet et Généralités* », afin de préciser le cadre dans lequel les solutions présentées sont applicables.

Ce document a été rédigé par Enertech¹ : Thierry RIESER, Tristan BOISSONNEAU et Stéphane MOTEAU.

Sauf mention contraire, la source des schémas et illustrations est Enertech.

Le comité de relecture était composé de :

- Région Grand Est : Matthieu FLAHAUT
- ADEME Grand Est : Eric GASPARD
- Parc naturel régional des Vosges du Nord : Anne RIWER et Aurélie WISSER
- Energivie.pro : Katharina BROCKSTEDT et Marina GASPARD
- Pays de l'Alsace du Nord : Virginie FORMOSA et Gabriel QUENTIN
- Institut négaWatt : Vincent LEGRAND et Arthur GAUVAIN
- Terranergie : Vincent PIERRE
- Arcanne : Samuel COURGEY
- Panoptique : François LIERMANN et Luc CHAMORAUD
- Société 4as : Bernard SCHWALLER
- CEREMA : Elodie HEBERLE, Julien BURGHOLZER et Julien BORDERON

¹ Enertech SCOP ARL à capital variable, Siège social : 26160 Pont de Barret - Siret 41522792500021
RCS B 415 227 925 - APE 7112 B - N° TVA intracommunautaire : FR 87415227925

Contenu

Objet	5
Glossaire.....	6
Cadre normatif	8
Généralités applicables à tout ce qui suit	9
1. Ventiler mécaniquement pour évacuer l'humidité.....	10
2. Traiter les remontées humides avant rénovation	11
3. Un pare-vapeur non continu ne fait que concentrer le problème.....	12
4. Perméabilité croissante et capacité de séchage	13
5. Protéger les façades de la pluie.....	14
6. Problématique des planchers intermédiaires bois et hourdis	15
7. ITI et ITE : Avantages, inconvénients et bonne mise en œuvre	17
MURS ENTRE 1948 ET 1975	19
➤ Mur en béton.....	19
➤ Isolation par l'intérieur	19
➤ Isolation par l'extérieur.....	20
➤ Mur en parpaing (bloc de béton creux).....	21
➤ Isolation par l'intérieur	21
➤ Isolation par l'extérieur.....	22
MURS D'AVANT 1948	23
➤ Mur en pierre.....	23
➤ Isolation par l'intérieur	23
➤ Isolation par l'extérieur.....	27
➤ Mur en en brique de terre cuite pleine.....	28
➤ Isolation par l'intérieur	28
➤ Isolation par l'extérieur.....	29
➤ Mur en béton de mâchefer	30
➤ Isolation par l'intérieur	30
➤ Isolation par l'extérieur.....	31
➤ Mur en pisé	32
➤ Isolation par l'intérieur	32
➤ Isolation par l'extérieur.....	33
➤ Mur à pan de bois	34
➤ Isolation par l'intérieur	34
➤ Isolation par l'extérieur.....	36
TOITURES.....	37
➤ Comble perdu isolé à l'horizontale	37
➤ Charpente isolée en rampant.....	38
➤ Isolation sous chevrons	38
➤ Isolation en sarking sans ossature.....	39
➤ Isolation en sarking avec ossature (réhausse).....	41
Annexe 1 : Références Bibliographiques commentées.....	42
a. Hygroba	42
b. LUD et HUN – Etudes de SolaresBauen	42
c. Isolin	43

d.	RAGE	44
e.	Proclima – étude toiture	45
f.	LGCB & ENTPE – L’isolation du pisé.....	47
g.	Autre bibliographie (non commentée)	48
Annexe 2 : Simulations WUFI réalisées pour les besoins du présent rapport.....		50
a.	Hypothèses communes des simulations dynamiques réalisées	50
	Bases de données de matériaux de référence	50
	Climats intérieur et extérieur utilisés.....	52
b.	Simulation 2D de mur à pan de bois	54
c.	Simulation 2D de mur en pierre très dure (« groupe 3 »).....	64
d.	Simulation 2D de dalle hourdi sur mur poreux.....	72
Annexe 3 : Classification des enduits et imperméabilisants.....		80
Annexe 4 : Méthodologie de mesure du facteur d’absorption de la pluie battante A.....		85

Objet

Dans le cadre de toute rénovation, de nombreuses questions sont soulevées à propos de la pérennité de l'isolation et du bâti vis-à-vis de la migration de vapeur d'eau.

De nombreuses études ont déjà été menées sur le sujet, en France et à l'étranger notamment en Allemagne. Mais force est de constater que des divergences subsistent, ainsi que des zones d'ombre, sur certaines typologies de parois. Il manque également une synthèse transversale pragmatique, utilisable par exemple par des artisans, pour déterminer des solutions adaptées (bonnes pratiques) et avertir sur des risques particuliers (points de vigilance).

Ce document étant rédigé dans le cadre du projet Oktave de la Région Grand Est et de l'ADEME, en lien avec le dispositif DORéMI, **le champ concerné par le présent document est restreint à la rénovation complète et performante.**

Les conclusions apportées présupposeront donc nécessairement :

- **l'isolation de toutes les parois** ;
- une **ventilation mécanique** (simple flux ou double flux) respectant ad minima les débits réglementaires, et de préférence les 0,6 vol/h préconisés dans les Solutions Techniques de Rénovation (STR) développées par Enertech et utilisés dans le cadre d'Oktave et de DORéMI ;
- une **étanchéité à l'air performante** (au maximum un n_{50} de 3 vol/h sous 50 Pa, soit un Q_4 d'environ 0,8 m³/h par m²), donc peu de défauts de pose des membranes.

On présuppose également que le bâtiment ne présente **pas de remontées capillaires majeures** (qui sont à traiter impérativement avant toute rénovation thermique).

La construction neuve est également en dehors du cadre de l'étude, notamment les constructions à ossature bois, ainsi que les monomurs (brique alvéolaire ou béton cellulaire). Les toitures terrasses ne seront pas non plus abordées (cas rare en rénovation de maison individuelle).

Enfin, le présent document **ne couvre pas le cas des bâtiments climatisés.**

Le présent rapport propose des solutions conformes aux règles de l'art (DTU, RAGE...) ou préconisations des fabricants (ATEC, DTA, ETE,...) en vigueur au jour de sa rédaction. Il déconseille ou exclut certaines pratiques d'isolation pourtant autorisées par ces mêmes textes, par précaution et/ou en réponse à des retours d'expérience défavorables.

Dans ce cadre, et sur la base d'une étude bibliographique complétée par des simulations menées par Enertech sous WUFI pro 4.2 et WUFI 2D 3.4, l'objet du présent document est de présenter pour chaque typologie de mur existant :

- des solutions d'isolation dite **bonnes pratiques**,
- des solutions alternatives, dites **variantes possibles**, qui sont un peu moins robustes en cas d'humidité accidentelle, mais qui assurent la pérennité du bâti et de l'isolation en fonctionnement normal,
- des **points de vigilance**, à respecter pour éviter les pathologies.

Enfin, pour chaque solution proposée, un renvoi à une référence bibliographique est cité, afin de permettre au lecteur d'approfondir sa connaissance du sujet. A ce titre, un chapitre détaillant ces références est développé à la fin du document.

Important : des généralités applicables à toutes les solutions proposées sont présentées en préambule.

La lecture de ce préambule est indispensable et indissociable du reste du document.

Ce document inclut également un glossaire explicitant les termes techniques utilisés par la suite, et un cadre normatif pour les artisans.

Glossaire

A : coefficient caractérisant à la fois la capillarité et l'absorption de l'eau de pluie battante. Plus il est élevé, plus le mur absorbe la pluie battante. Il varie d'environ $5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ pour des matériaux mal protégés contre la pluie (par exemple brique ou pierre poreuse non protégée), à moins de $0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$, traduisant une bonne protection à la pluie battante [RAGE]. Dans WUFI, ce sont les coefficients D_{ws} (transfert d'eau liquide par succion) et D_{ww} (transfert d'eau liquide par redistribution) qui sont utilisés. Une formule permet de relier ces valeurs au coefficient A.

On peut mesurer ce facteur d'absorption avec une pipe de Karsten, voir [annexe 4](#).

ATEC : avis technique, portant sur un produit de construction spécifique pour des applications précises (se substituant alors aux DTU).

Capillarité : un matériau est dit capillaire s'il comporte des « canaux » dans lesquels l'eau liquide se déplace facilement. Ainsi un matériau capillaire peut sécher rapidement en cas d'humidité accidentelle ou occasionnelle. Les isolants biosourcés sont généralement capillaires (laine de bois, ouate de cellulose, etc...) à l'exception notable du liège. La chaux hydraulique naturelle (NHL) est également capillaire, à la différence du ciment.

DTU : Documents Techniques Unifiés : il s'agit des règles de l'art générales pour la réalisation des travaux.

Enduit à pierre vue : enduit extérieur d'un mur permettant d'obtenir une façade plane tout en laissant visible la pierre.

Nb : le choix des enduits doit être fait en cohérence avec le patrimoine local. L'enduit à pierre vue évite les pièges à eau mais ne protège pas les pierres poreuses, et n'est pas adapté au patrimoine de certains territoires.



Ci-contre : exemple d'enduit à pierre vue (source : CAUE 44)

ETICS : acronyme anglais pour ITE sous enduit.

Freine-vapeur : un freine-vapeur est une membrane d'étanchéité à l'air qui régule le flux de vapeur, sans le bloquer totalement. Il existe des freine-vapeurs hygrovariables, dont la résistance à la migration de vapeur (S_d) varie selon les conditions. On parle de freine vapeur hygrovariable « à fort S_d » lorsqu'il peut dépasser un S_d de 18m en hiver (type Isover Vario Xtra, Pro Clima Intello F18, etc.). Voir aussi : pare-vapeur.

ITI : Isolation Thermique par l'Intérieur.

ITE : Isolation Thermique par l'Extérieur.

HPV : Hautement Perméable à la Vapeur d'eau : concerne les pare-pluie. Un pare-pluie en contact avec un isolant doit systématiquement être HPV.

Hygroscopique : un matériau est dit hygroscopique s'il est capable de stocker en eau liquide de la vapeur d'eau dans sa structure (pores). Les isolants capillaires sont généralement également hygroscopiques, à l'exception notable du béton cellulaire, qui est capillaire mais peu hygroscopique (voir à ce sujet le graphique page 52).

Mâchefer : résidu des hauts fourneaux, utilisé dans les bétons de mâchefer dans les années 1930. Ces bétons sont très poreux, donc assez ouverts à la diffusion de vapeur d'eau, et sensibles à l'éclatement au gel.



Ci-contre : Mur en béton de mâchefer sur un soubassement en béton « classique » (Photo CEREMA)

Miroir : les miroirs d'un mur à pan de bois sont les remplissages entre les ossatures en bois. Ils peuvent être réalisés en différents matériaux : torchis, brique, etc.

μ (mu) : coefficient de résistance à la diffusion de vapeur. Il exprime combien de fois il est plus difficile de traverser le matériau que l'air. Ainsi, un matériau qui a un μ d'environ 200 comme le béton sera 200 fois plus résistant à la diffusion de vapeur que de l'air.

Pare-vapeur : un matériau est un pare-vapeur s'il a une forte résistance à la migration de vapeur (S_d élevé). Il n'y a pas de frontière officielle entre pare-vapeur et freine-vapeur, mais on parle généralement de pare-vapeur pour un S_d supérieur à 10m.

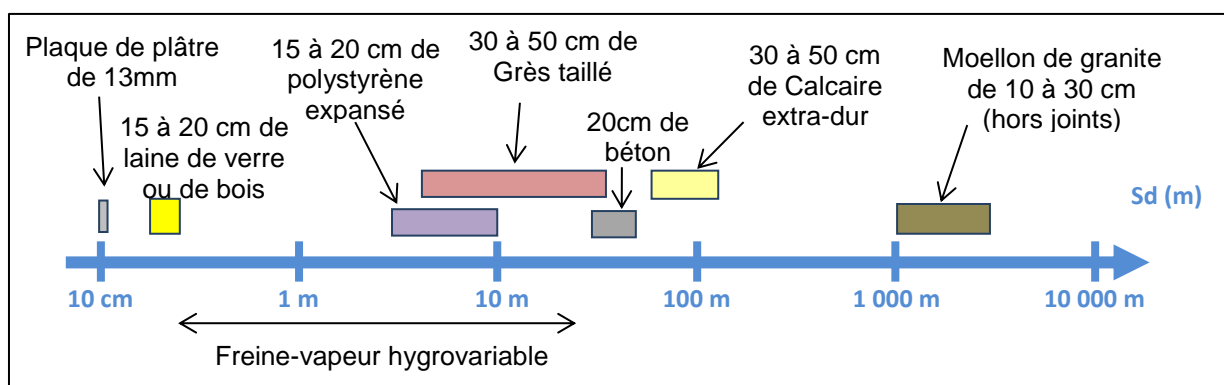
Porosité : un matériau est dit poreux s'il comporte des vides (cavités, canaux, air...) dans sa structure. Ainsi les pierres peuvent être plus ou moins poreuses, ce qui les rend plus ou moins ouverts à la diffusion de vapeur, plus ou moins capables de stocker de l'eau (hygroscopique), et aussi plus ou moins sensibles au risque de gel.

Putrescible : un matériau putrescible risque de se dégrader en présence d'une humidité excessive : il peut ainsi perdre ses propriétés mécaniques (le bois pourri finit par casser) et/ou isolantes (un isolant mouillé n'isole plus). A l'inverse un matériau imputrescible est totalement résistant à l'humidité.

R : résistance thermique : plus cette valeur est élevée, plus un matériau est isolant. Exprimée en $m^2.K/W$, elle se calcule à partir de l'épaisseur e (en m) et de la conductivité λ (en $W/m.K$) avec la formule $R = e / \lambda$.

S_d : épaisseur d'air équivalente. Pour une membrane ou pour une épaisseur donnée d'un matériau, c'est l'épaisseur d'air qui aurait la même résistance à la diffusion de vapeur. Elle se mesure en mètres. Le s_d se calcule en multipliant le μ d'un matériau par son épaisseur (e en m) : $S_d = e \times \mu$. Par exemple, le μ du béton valant 200, 20 cm de béton (soit 0,2 m) ont une épaisseur d'air équivalente S_d de $0,2 \times 200 = 40m$.

On parlera ainsi de matériaux « ouverts à la diffusion de vapeur », ou « perméants », lorsque leur S_d est faible, et au contraire de matériaux « fermés à la diffusion de vapeur » lorsque leur S_d est élevé.



Echelle de S_d de différents matériaux (sources diverses, voir page 50)

NB : les caractéristiques des matériaux (épaisseur, S_d , R , ...) des simulations réalisées pour les besoins du présent rapport sont présentées au chapitre 0.

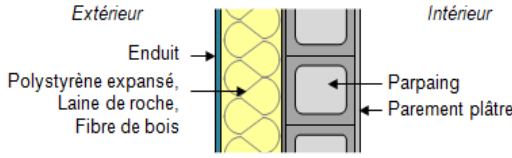
Cadre normatif

Afin de concevoir des solutions d'isolation respectant le cadre normatif et permettant aux artisans d'être assuré pour les travaux qu'ils réalisent, les documents de référence sont les suivants :

- DTU : règles de l'art générales, pour des solutions courantes ;
- ATEC, DTA : documents spécifiques dédiés à un produit particulier, permettant de déroger aux règles génériques du DTU ;
- Il existe parfois des « règles professionnelles » qui donnent un cadre de référence pour une pratique constructive nouvelle (par exemple la paille).

Par la suite du document, les schémas de bonnes pratiques sont accompagnés de renvois aux « documents de référence » sur lesquels il est possible de s'appuyer :

Isolation par l'extérieur :

Mur avant réno.	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	Points de vigilance
<p>Mur en parpaing. (épaisseur environ 20 cm, S_d d'environ 1m en partie courante)</p> <p>Tout parement intérieur et extérieur.</p>	 <p>Extérieur</p> <p>Enduit</p> <p>Polystyrène expansé, Laine de roche, Fibre de bois</p> <p>Intérieur</p> <p>Parpaing</p> <p>Parement plâtre</p> <p>Enduit ouvert à la diffusion de vapeur (ordre de grandeur $S_d < 2m$)</p> <p>Tout isolant, (PSE, laine de roche, fibre de bois...) selon spécifications du système d'ITE (DTA / ETE).</p> <p>Variante possible</p> <p>ITE sous bardage, isolant assez ouvert à la vapeur d'eau.</p>	<p>Proscrire les isolants très peu ouverts à la diffusion de vapeur (Polystyrène extrudé, Polyuréthane, Mousse Phénolique...).</p> <p>Respecter les avis techniques / DTA / ETE : respecter les couples isolant-enduit préconisés par les fabricants.</p> <p>NB : l'étanchéité à l'air du bâtiment n'est pas assurée par l'ITE. Contrôler et reprendre le cas échéant la continuité du parement intérieur.</p>
Doc. de référence	CPT 3035 – V2 : Systèmes d'isolation thermique extérieure par enduit sur polystyrène expansé- juillet 2013 DTA/ETE des systèmes d'ITE polystyrène expansé et laine de roche sous enduit	

Les documents cités **doivent être consultés par les professionnels** pour vérifier que la typologie de parois est bien incluse dans **le domaine d'emploi des matériaux** qu'ils souhaitent mettre en œuvre. Le fait qu'un type de texte de référence soit cité dans cette case ne garantit pas que la typologie soit totalement couverte par le domaine d'application et pour tous les isolants cités (par exemple sur des supports anciens, avec des isolants biosourcés et/ou en climat de montagne, etc.). **Il reste de la responsabilité des professionnels de s'assurer de ce point.**

Certaines configurations et certains matériaux restent aujourd'hui peu couverts par les textes de références. L'artisan engage alors sa responsabilité.

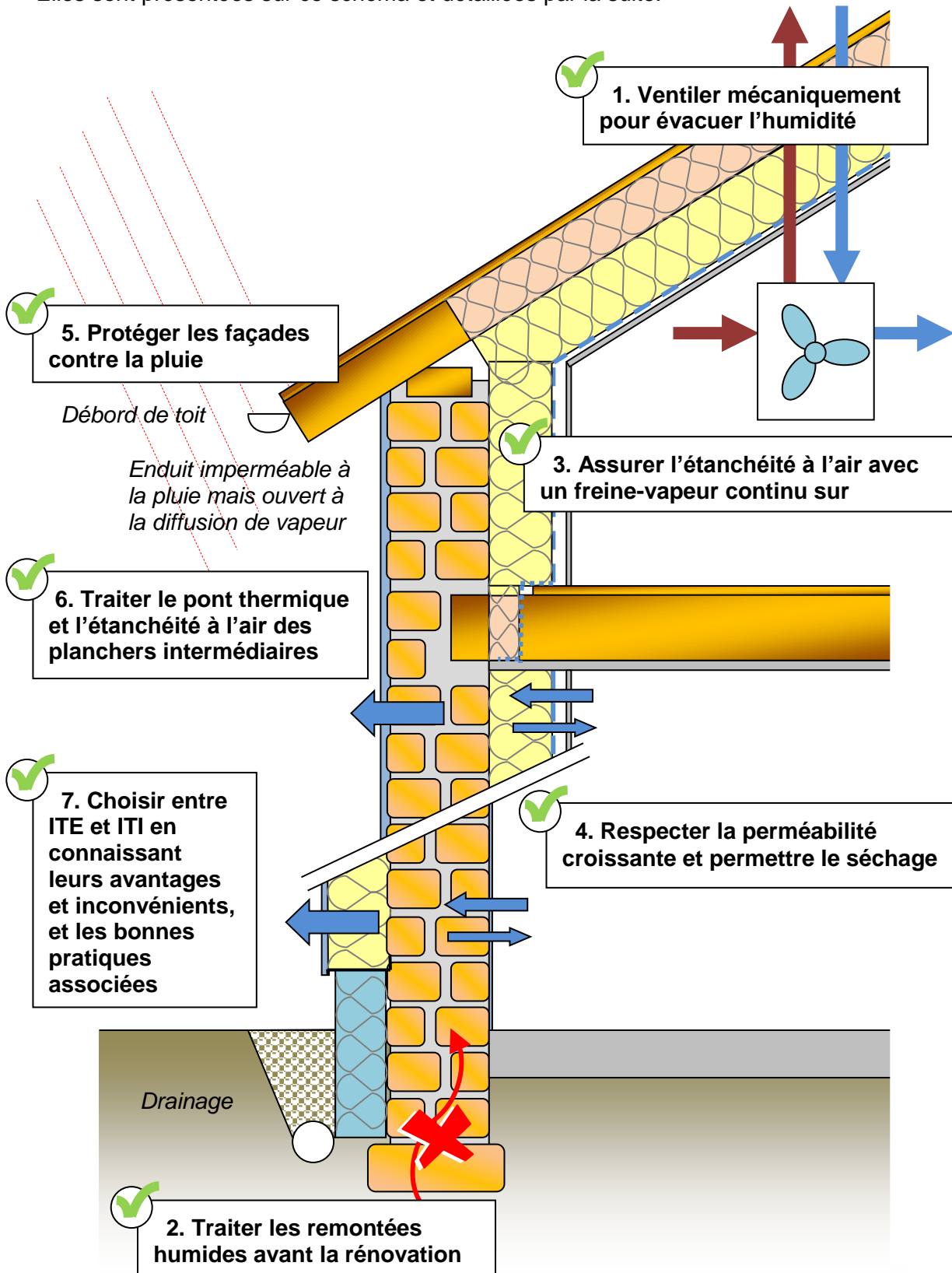
Il est alors possible de faire réaliser une étude spécifique avec un logiciel spécialisé (comme WUFI) par un bureau d'étude ou parfois par le fabricant de matériaux (le freine-vapeur ou l'isolant) qui permette de justifier auprès d'un assureur de l'absence de pathologie de la solution proposée.

Dans tous les cas, le respect des règles de mise en œuvre (règles de l'art et préconisations du fabricant) reste indispensable pour la pérennité et l'assurabilité des travaux.

Généralités applicables à tout ce qui suit

Cette partie présente **7 règles de bonne conception** relatives à l'humidité dans les bâtiments, qui s'appliquent à toutes les solutions décrites par la suite.

Elles sont présentées sur ce schéma et détaillées par la suite.



1. VENTILER MECANIQUEMENT POUR EVACUER L'HUMIDITE

Problème

L'humidité dans les logements vient en grande partie de l'activité humaine à l'intérieur (respiration, douche, cuisson, etc.). Dans le cadre d'une rénovation énergétique, on va améliorer l'étanchéité à l'air, et ainsi réduire l'évacuation de cette humidité.

Solutions

L'ouverture des fenêtres est insuffisante pour évacuer l'humidité au fur et à mesure de sa production. Seule la ventilation continue, mécanique ou naturelle assistée permet **d'évacuer efficacement l'humidité**.

Par ailleurs, dans le cadre de la rénovation énergétique, il est impératif de réduire le besoin de chauffage lié au renouvellement d'air. Les solutions les plus courantes sont la ventilation hygroréglable et la ventilation double flux.

Le débit de ventilation doit être conforme à la réglementation (arrêté de 1982), et de préférence atteindre les 0,6 vol/h préconisés dans les Solutions Techniques de Rénovation développées par Enertech et utilisés dans le cadre d'Oktave et de DORéMI.

La solution hygroréglable présente l'inconvénient de réduire les débits hors occupation, ce qui dégrade la qualité de l'air intérieur, car les polluants continuent d'être émis par les matériaux même en l'absence des occupants !

Seule la ventilation double flux permet à la fois d'économiser l'énergie en récupérant la chaleur de l'air extrait en hiver, tout en contribuant à la qualité de l'air intérieur. La ventilation double flux contribue également au confort en hiver puisque l'air soufflé n'est pas aussi froid que l'air extérieur, et au confort d'été en récupérant la fraîcheur de l'air intérieur.



Exemple de ventilation double flux en maison individuelle

A RETENIR

La ventilation mécanique est indispensable dans le cadre d'une rénovation, afin d'évacuer l'humidité produite par les occupants.

La ventilation performante contribue également aux économies d'énergie, à la qualité de l'air intérieur et au confort.

2. TRAITER LES REMONTEES HUMIDES AVANT RENOVATION

Problème

Si un mur présente des pathologies liées à l'humidité, il faut en comprendre la cause et les traiter avant toute rénovation. **Isoler un mur déjà humide ne peut qu'aggraver le problème.** Parmi les signes évidents d'humidité, on peut citer :



Présence de salpêtre
(Photo : humidites.fr)



Présence de moisissures
(Photo : prix-immobilier.info)

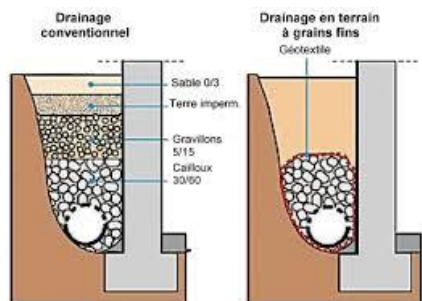


Traces d'humidité et enduit extérieur dégradé

Solutions

Souvent ces pathologies sont liées à des éléments étanches à la vapeur et non capillaires ajoutés sur un bâti ancien. L'ajout de dalle béton au sol peut également avoir perturbé l'équilibre hydrique d'une construction². Dans ce cas la première mesure sera de retirer les enduits ciment, peintures acryliques, etc. qui empêchent le séchage naturel du mur.

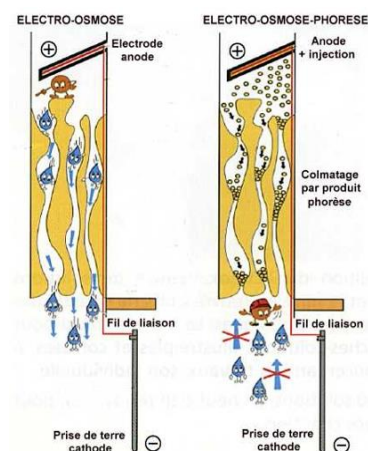
Dans d'autres cas, les pathologies sont dues à une humidité excessive du sol qu'il convient de traiter à la source *en plus* des mesures précédentes. Parmi les solutions possibles³ :



Drainage des murs humides (Schéma :
Agence Qualité Construction)



Injection de résine
(Photo : dakdurieux.be)



Principe de traitements osmotiques.
(Schéma : legenciecivil.fr)

A RETENIR

Les remontées d'humidité importantes sont à **traiter impérativement avant rénovation.**

Les solutions sont à réaliser par des **entreprises spécialisées.**

Laisser sécher le mur au moins 6 mois avant tout travaux d'isolation.

² Il convient toutefois de distinguer les cas où le béton au sol aide à écarter la pluie du mur (glacis avec pente suffisante) et les cas d'imperméabilisation excessive qui empêchent le sol de sécher.

³ Injection de résine et traitement osmotique avec injection font l'objet de réserves sur le risque d'accumulation d'eau sous la barrière étanche, pouvant dégrader les fondations. Ce type d'intervention doit être réalisé par un professionnel qualifié et suite à un diagnostic.

3. UN PARE-VAPEUR NON CONTINU NE FAIT QUE CONCENTRER LE PROBLEME

Problème

Peut-on protéger un mur et son isolant avec le kraft de l'isolant ? Un doublage collé permet-il d'éviter les pathologies ?

La réponse est malheureusement NON, et nous allons voir pourquoi.

L'importance des défauts

Une étude réalisée par l'Institut für Bauphysik de Stuttgart, pour Pro Clima, montre qu'une simple fente de 1mm dans un freine-vapeur laisse passer 1600 fois plus de vapeur qu'en l'absence de fente.

C'est près d'1 litre d'eau par m² et par jour qui transite par la fente !

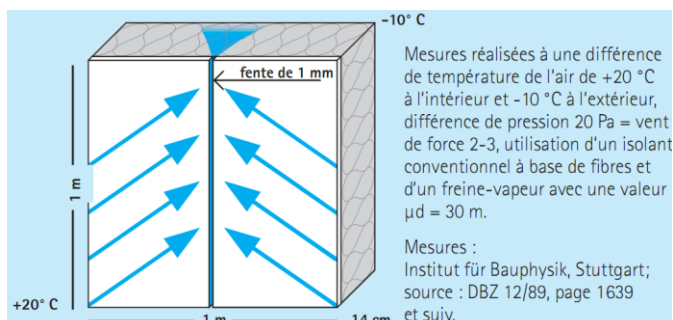


Schéma : Pro Clima

Mesures réalisées à une différence de température de l'air de +20 °C à l'intérieur et -10 °C à l'extérieur, différence de pression 20 Pa = vent de force 2-3, utilisation d'un isolant conventionnel à base de fibres et d'un freine-vapeur avec une valeur $\mu_d = 30$ m.

Mesures : Institut für Bauphysik, Stuttgart; source : DBZ 12/89, page 1639 et suiv.



Un isolant revêtu d'un kraft suffit-t-il ?

Le kraft d'un isolant n'est pas un pare-vapeur et ne résout en rien les problématiques de migration.

Au contraire, le flux de vapeur d'eau va se concentrer entre les lés d'isolant, au niveau des passages électriques des prises et interrupteurs, ainsi qu'en tête et en pieds de mur.

Doublage collé

Le DTU 20.1 P4 sur les ouvrages en maçonnerie de petits éléments impose en ITI un Sd supérieur à 1,5 m, et supérieur à 6m en zone froide. Ce Sd ne peut être atteint que si la plaque de plâtre est revêtue d'un freine-vapeur.

Or les bandes à joints, qui n'ont pas ce Sd, ainsi que les défauts inévitables en tête et pied de mur et des boîtiers électriques (même étanches) laisseront passer la vapeur.

C'est pourquoi on retrouve souvent de la moisissure lorsqu'on dépose un tel doublage, même dans un logement ventilé.

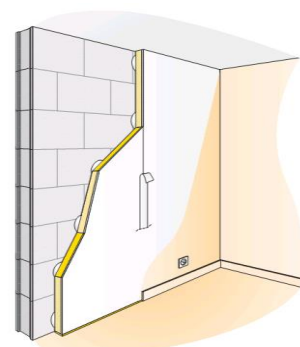
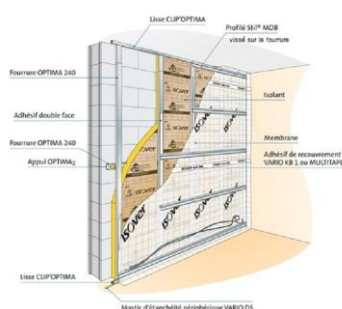
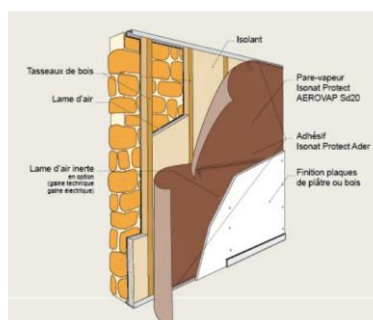


Schéma : Isover

Solutions



ITI sur ossature avec freine-vapeur (Schéma : Isover)



ITI sur ossature bois avec freine-vapeur (Schéma : monisolationecologique.com)



Isolation de rampant avec freine-vapeur (Schéma : Knauf)

A RETENIR

Proscrire les doublages collés. En ITI et en rampant, prévoir un pare vapeur ou freine vapeur en lés, de préférence avec un vide technique entre cette membrane et le parement, pour laisser passer l'électricité sans la percer.

Assurer une bonne voire très bonne étanchéité à l'air.

4. PERMEABILITE CROISSANTE ET CAPACITE DE SECHAGE

Problème

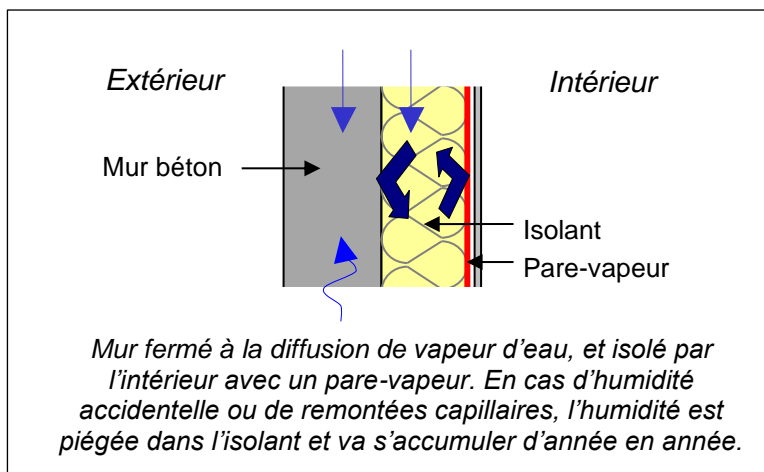
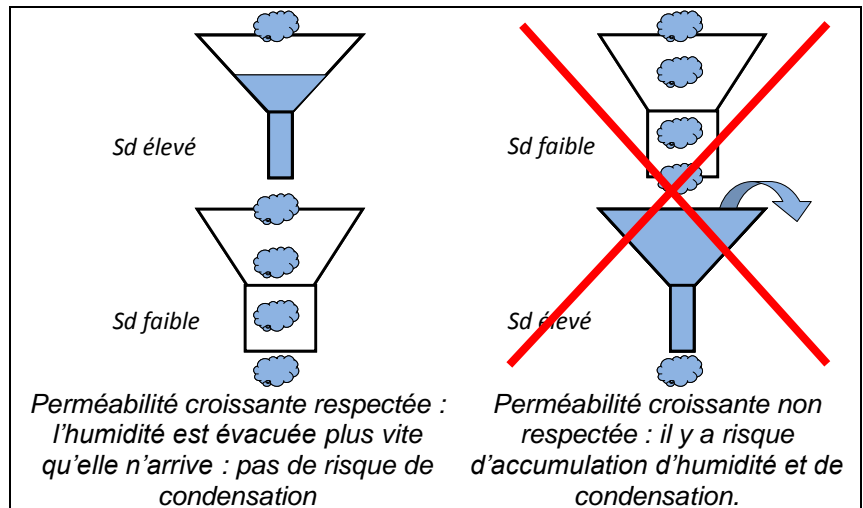
Comment concevoir la migration de vapeur en rénovation d'une paroi existante ?
Quels sont les matériaux à identifier comme potentiellement problématiques ?
Faut-il poser un pare-vapeur ou un freine-vapeur ?

Deux principes à retenir :

i. Principe de perméabilité croissante

Pour que l'humidité ne s'accumule pas en migrant de l'intérieur vers l'extérieur, les matériaux doivent être de plus en plus ouverts à la diffusion de vapeur (S_d de plus en plus faible).

Ceci pose donc problème notamment pour les murs en pierres très fermées isolés par l'intérieur, comme nous le verrons [par la suite](#).



NB : la valeur S_d peut être calculée notamment sur le site :

<http://www.u-wert.net/>

ii. Conserver une bonne capacité de séchage des murs

Surtout en rénovation de mur ancien, il est important que l'humidité ne soit pas emprisonnée entre des matériaux trop fermés à la diffusion de vapeur.

Solutions

- **Identifier les pare-vapeurs existants** : enduit plastique, ancien RPE, papier peint vinyle, peintures plastiques, toiles de verre avec colle plastique,...). Les déposer (ou ad minima les lacérer) chaque fois que cela est possible.
- Préférer les freine-vapeurs aux pare-vapeurs, chaque fois que c'est possible. On respectera toutefois le principe de perméabilité croissante, et les DTU en vigueur.
- Les freine-vapeurs hygrovariables permettent à la fois de respecter la perméabilité croissante en hiver, et de s'ouvrir pour le séchage du mur en été. Ils permettent de déroger au DTU dans le cadre du domaine d'application précisé dans leur ATEC.

A RETENIR

Respecter la perméabilité croissante de l'intérieur vers l'extérieur.

Conserver une capacité de séchage : lacérer ou déposer si possible les pare-vapeurs existant, et privilégier les freine-vapeurs, notamment les freine-vapeurs hygrovariables.

5. PROTÉGER LES FAÇADES DE LA PLUIE

Problème

Dans les régions très ventées, les pluies viennent souvent frapper les murs, les chargeant de **quantités d'eau beaucoup plus importantes** que celles dues à la migration de vapeur.

Cette eau peut être à l'origine de nombreuses pathologies pour le bâti comme pour l'isolant, allant de la moisissure à l'éclatement sous l'effet du gel. Il est donc impératif en premier lieu **d'empêcher l'eau de pénétrer dans le mur**,

De plus, il est préférable de conserver un **fort potentiel de séchage**. Le mur avant isolation a la possibilité de sécher sur ces deux faces. Ainsi ce séchage peut être très réduit notamment en cas d'isolation par l'intérieur, car le mur devient froid et l'humidité ne peut plus s'évacuer suffisamment par la face intérieure.



Enduit ciment craquelé sur mur en pierre



Absence de dispositif anti goutte d'eau en nez de terrasse (photo : AQC)

Solutions (à ce sujet, voir aussi le graphique page 51)

La surface extérieure de la façade doit **assurer l'imperméabilité à l'eau de pluie** tout en permettant **la diffusion de vapeur d'eau**. Mieux vaut aussi privilégier des enduits **capillaires** qui permettent à l'eau de transiter dans un sens ou l'autre et ainsi faciliter le séchage du mur. Un enduit ciment ou un revêtement de type peinture à base de résine plastique (ancien RPE par exemple) sont certes étanches à l'eau mais aussi à la vapeur d'eau et ne sont pas capillaires !

Privilégier donc des enduits ou revêtements ouverts à la diffusion de vapeur et capillaires comme les **enduits à la chaux** par exemple.

Pour les pierres poreuses non enduites ainsi que pour les briques anciennes non peintes, il existe des **hydrofuges ouverts à la diffusion de vapeur** (Voir classement en [Annexe 3](#)). Ils sont efficaces, mais mal appliqués ils peuvent également être nuisibles au mur (risque d'éclatement des pierres en surface). Il est donc impératif de faire appel à un professionnel qualifié.

NB : il est possible de mesurer le facteur d'absorption A d'un mur existant avec une pipe de Karsten. Voir la méthodologie et des exemples en [annexe 4](#).

Un **débord de toit suffisamment important** pour protéger cette surface extérieure, particulièrement pour les murs structurellement sensibles à l'eau : mur en pisé, mur à pan de bois... Mais aussi des **gouttières, chéneaux**... pour canaliser l'évacuation de cette eau de pluie, et des profils formant **goutte d'eau** au niveau des nez de terrasse et appuis de fenêtres afin d'éviter à cette eau de revenir contre la façade et de ruisseler dessus. Il est également possible de protéger les façades les plus exposées à la pluie par des solutions traditionnelles sur certains territoires, comme des bardages.

A RETENIR

La protection contre les pluies battantes est indispensable.

En cas d'application d'un enduit, privilégier la chaux (ouverte à la vapeur et capillaire).

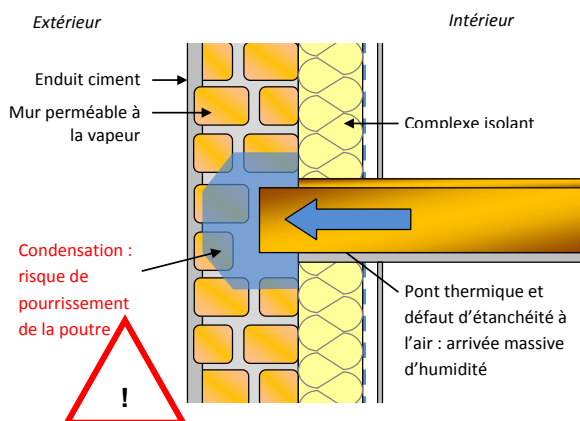
Si un hydrofuge est envisagé celui-ci devra être imperméable à la pluie et ouverte à la diffusion de vapeur. Il sera choisi et mis en œuvre par un professionnel qualifié.

6. PROBLEMATIQUE DES PLANCHERS INTERMEDIAIRES BOIS ET HOURDIS

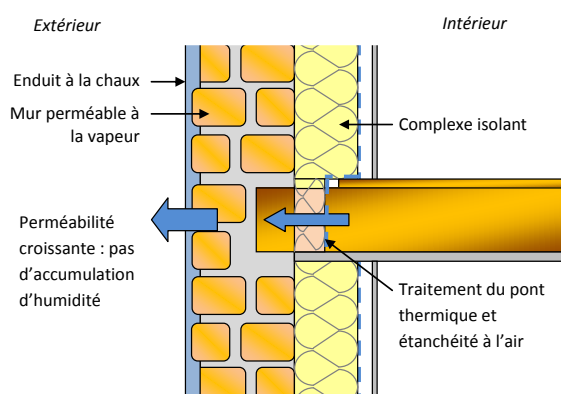
6.1. Plancher bois

Problème

En présence de **planchers en bois**, si l'on se contente d'isoler au-dessus et en-dessous du plancher, on laisse un pont thermique important et aucune barrière pour réguler la migration de vapeur d'eau dans l'épaisseur du plancher. **On risque donc des pathologies importantes :**



ITI sans continuité de l'isolant dans l'épaisseur du plancher bois : risque de pathologie important



ITI dans l'épaisseur du plancher pour assurer la continuité de l'isolation et de l'étanchéité à l'air et remplacement de l'enduit ciment le cas échéant par un enduit à la chaux

Solutions

Il est donc très important d'assurer la **continuité de l'isolation, ainsi que celle de l'étanchéité à l'air** pour maîtriser la migration de vapeur d'eau. Prévoir :

- de scier le plancher au niveau où passera le freine-vapeur (l'ouverture sera ainsi recouverte par l'ITI),
- faire descendre le freine-vapeur jusqu'au parement inférieur du plancher (si il est compliqué de le scier aussi, notamment en cas de plafond en plâtre traditionnel sur lattis de canisse...) et le raccorder soigneusement aux poutres et au parement conservé le cas échéant, avec des produits qui restent souples toute leur durée de vie (colle butyl, adhésif souple adapté au support, etc.). Laisser le lé en attente pour raccordement ultérieur au freine-vapeur courant,
- faire également descendre l'isolant (en épaisseur minimale de 5cm) dans l'épaisseur du plancher.



Raccordement soigné du freine-vapeur autour d'une poutre avec colle butyl

En présence d'un **enduit ciment ou revêtement plastique épais, prévoir un décapage si le mur en lui-même est ouvert à la diffusion de vapeur** (mur en pierre non jointé, ou mur en brique ou pierre ouverte à la vapeur d'eau).

Ces dispositions permettront de s'assurer que le flux de vapeur passant par la poutre elle-même n'est pas bloqué dans le mur.

6.2. Plancher intermédiaire en poutrelle-hourdis

L'isolation par l'intérieur est très risquée dans ce cas. L'air et donc la vapeur d'eau circulent très facilement dans les hourdis. Etant donné qu'il est quasiment impossible d'assurer une continuité d'isolation et d'étanchéité à l'air dans l'épaisseur du plancher, cette humidité entrera en contact avec le mur froid et condensera, avec un risque de pathologie élevé.



Exemple de dalle poutrelle-hourdis de terre cuite (immeuble années 1950) sciée au niveau d'un balcon

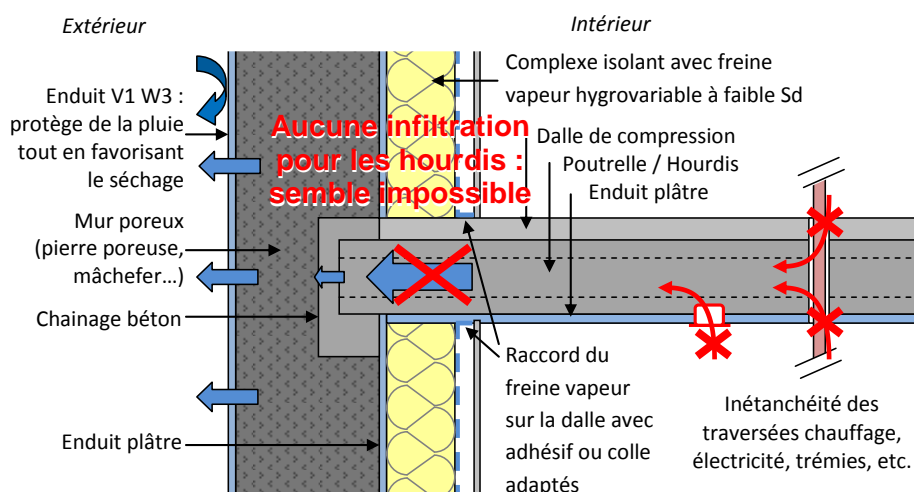


Exemple de dalle hourdis en béton (maison années 1980) non enduite en sous face

Les simulations sous WUFI réalisées pour le présent rapport (voir hypothèses et conclusions au d) montrent qu'**aucune des variantes testées ne fonctionne si des infiltrations d'air dans les hourdis apportent de l'humidité à la jonction dalle – mur**. L'isolant est invariablement dégradé.

Les risques de pathologie ne seraient évités que si les 3 conditions suivantes sont réunies :

1. l'étanchéité à l'air du logement doit être performante ($n_{50} \leq 3$ vol/h sous 50 Pa), ce qui limite la circulation d'humidité dans les hourdis, et qu'il ne subsiste aucune entrée d'air vers les hourdis, ce qui signifie **traiter toutes les traversées de la dalle**, que ce soit pour les réseaux d'eau de chauffage, d'évacuations, d'électricité, ou encore toutes les gaines techniques, qui sont autant d'entrées d'air qui débouchent sur la liaison hourdis – mur. **En pratique cela semble quasiment impossible**.
2. l'enduit extérieur doit **protéger de la pluie battante** : avec un facteur A inférieur à $0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ (valeur inspirée de [RAGE]) le risque d'éclatement au gel devient nul,
3. l'enduit extérieur doit être ouvert à la vapeur et capillaire : par exemple avec un enduit ciment le mur accumule de l'humidité et présente des risques de moisissure côté intérieur. Il sera nécessaire de le remplacer par un enduit dont l'absorption d'eau liquide A est inférieur à $0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ et dont le Sd est inférieur à 0,5m (voir [annexe 3](#)).



A RETENIR

Les planchers intermédiaires bois et poutrelle-hourdis nécessitent à la fois d'assurer l'étanchéité à l'air dans l'épaisseur du plancher (ce qui semble impossible pour les hourdis), rompre le pont thermique (plancher bois), protéger le mur de la pluie et favoriser son séchage.

7. ITI ET ITE : AVANTAGES, INCONVENIENTS ET BONNE MISE EN ŒUVRE

7.1. Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE)

Avantages

- Un mur isolé par l'extérieur devient plus chaud en hiver. Il est totalement protégé du gel, et bien protégé de la pluie. Du point de vue thermique et migration d'humidité, **l'ITE est donc la solution qui protège le mieux le bâti.**
- Par ailleurs, l'ITE permet de rompre les ponts thermiques des refends et planchers intermédiaires, et améliore le confort d'été en conservant l'inertie du mur.
- Enfin, elle permet d'isoler une maison en site occupé en minimisant les nuisances pour les occupants, et en évitant de perdre de la surface habitable.



ITE en laine de bois

Inconvénients

- L'isolation par l'extérieur ne permet pas de conserver l'aspect extérieur des murs, notamment en pierre et en pan de bois.
- Elle est souvent refusée dans les périmètres de protection des monuments historiques et les bâtiments présentant un intérêt patrimonial.
- Certaines contraintes urbanistiques peuvent également interdire l'ITE, comme par exemple les trottoirs étroits ou l'interdiction explicite de l'ITE en dessous d'une certaine hauteur.
- L'étanchéité à l'air du bâtiment n'est pas assurée par l'ITE. Contrôler et reprendre le cas échéant la continuité du parement intérieur (enduit, etc.).

NB : Dans le cas de bâtiments à caractère patrimonial, il peut être intéressant de différencier l'approche sur les façades principales, où l'on souhaite privilégier l'isolation par l'intérieur, et les façades secondaires, qui pourraient être isolées par l'extérieur, notamment lorsqu'elles sont exposées aux pluies dominantes.

Bonnes pratiques

- Il n'y a pas que le PSE pour isoler par l'extérieur ! On peut également réaliser des ITE sous enduits par exemple sur laine de bois ou laine de roche, qui sont quant à eux ouverts à la diffusion de vapeur d'eau.
- L'isolation par l'extérieur sous enduit nécessite une mise en œuvre rigoureuse et conforme aux préconisations du fabricant. On rappelle que les documents techniques décrivent un couple isolant et enduit qui restent indissociables.
- Attention à la sensibilité du PSE gris (graphité) à la lumière, prévoir une bâche de protection lors de la mise en œuvre.
- Ne pas compléter les espaces entre panneaux isolants avec du mortier de collage des plaques, mais bien avec un matériau isolant, comme indiqué dans les documents techniques.
- Le cas de l'ITE en polystyrène sous enduit est particulièrement sensible, en raison des risques liés à l'incendie. En 2016, un guide a été publié afin de compléter les textes de référence (IT 249, CPT...) et de rendre ces procédés plus sûrs.
- Assurer l'adhérence de l'isolant sur son support, et éviter la circulation d'air dans une lame d'air entre le mur et l'isolant. Réaliser des boudins périphériques ou coller en pleine surface.
- Assurer la **continuité capillaire** : il ne doit pas y avoir de lame d'air entre l'isolant et le mur existant, car celle-ci dégraderait la performance thermique si elle est ventilée, et réduirait la capacité de séchage du mur en empêchant le transfert d'humidité par capillarité. En pratique :
 - Encoller les isolants sur toute leur surface et non par plots,
 - Sur des murs non plans, prévoir un isolant souple ou en vrac en contact avec le mur (laine souple, laine bi-densité, ouate de cellulose, etc.).

7.2. Isolation Thermique par l'Intérieur (ITI)

Avantages

- L'isolation par l'intérieur permet de préserver l'aspect extérieur des murs.
- Ce procédé d'isolation est généralement moins cher que l'ITE, sauf qu'il engendre des coûts induits (réfection de salle de bain, de cuisine, des finitions, déplacement des réseaux, plinthes, décaissements des vieux enduits...).

Inconvénients

- L'ITI est plus délicate en termes de migration de vapeur. En effet les murs deviennent plus froids, donc plus exposés à la condensation et au gel.
- De plus l'ITI génère le plus souvent plus de ponts thermiques que l'ITE, or ces ponts thermiques sont des points froids qui peuvent être le lieu de condensation voire de pathologies.
- L'isolation par l'intérieur réduit la surface habitable et est plus gênante pour les habitants dans le cadre d'une rénovation en site occupé.



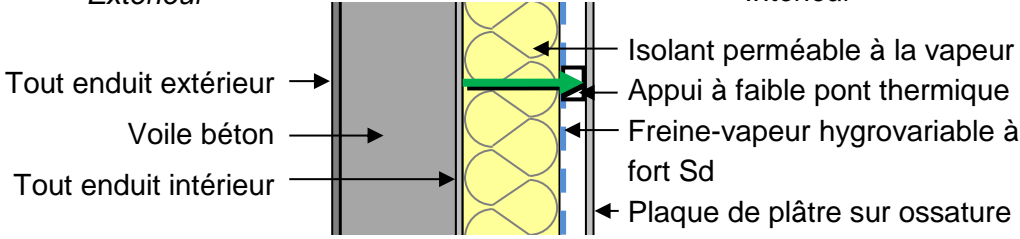
ITI sur ossature métallique avec freine-vapeur hygrovARIABLE

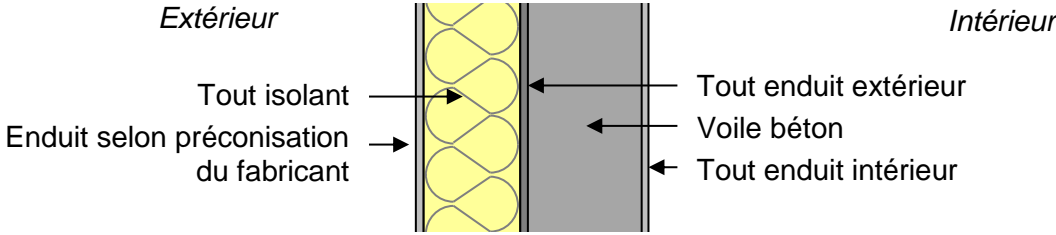
Bonnes pratiques

- Préparation du mur avant isolation par l'intérieur : veiller à supprimer les substrats dont peut se nourrir la moisissure : arracher les papiers peints (surtout s'ils sont pare-vapeurs comme les papiers peints vinyliques) et lessiver la colle à papier peint.
- Supprimer les pare-vapeurs (papier peint vinylique, toile de verre...).
- Assurer une très bonne étanchéité à l'air (voir Généralités, § 3).
- Traiter les planchers intermédiaires (voir Généralités, § 6).
- Assurer la **continuité capillaire** : il ne doit pas y avoir de lame d'air entre l'isolant et le mur existant, car celle-ci dégraderait la performance thermique si elle est ventilée, et réduirait la capacité de séchage du mur en empêchant le transfert d'humidité par capillarité. En pratique :
 - Encoller les isolants rigides (béton cellulaire, etc.) sur toute leur surface et non par plots, reprendre la verticalité avec un mortier adapté,
 - Sur des murs non plans, prévoir un isolant souple ou en vrac en contact avec le mur (laine souple, ouate de cellulose, etc.).
- Bien choisir les isolants pour assurer leur pérennité dans le temps : privilégier les isolants rigides, qui ne se tassent pas dans le temps. En cas d'isolant insufflé, respecter les règles de l'art, notamment la densité préconisée par le fabricant.

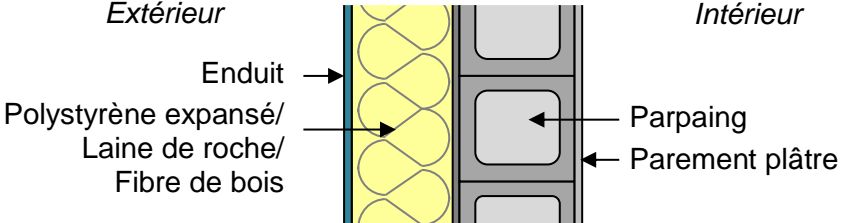
A RETENIR

Le choix entre ITI et ITE est à effectuer au cas par cas en tenant compte de toutes ces contraintes et du souhait du propriétaire.

Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	Points de vigilance
<p>Mur en béton armé. (épaisseur environ 20cm, μ de 150 à 250)</p> <p>Tout parement intérieur et extérieur.</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Extérieur Intérieur </div>  <p>Tout enduit extérieur →</p> <p>Voile béton →</p> <p>Tout enduit intérieur →</p> <p>← Isolant perméable à la vapeur</p> <p>← Appui à faible pont thermique</p> <p>← Freine-vapeur hygrovariable à fort Sd</p> <p>← Plaque de plâtre sur ossature</p> <p>Doublage sur ossature avec isolant ouvert à la diffusion de vapeur et non putrescible (laine minérale,...), ou isolants bio-sourcés (sous avis technique compatible avec le freine-vapeur) et freine-vapeur hygrovariable à fort Sd (capable de monter à plus de 18m) sous avis technique.</p> <p>Variante possible</p> <p>Le vide technique entre le freine-vapeur et le parement peut être isolé pour gagner de la place. Respecter alors la règle des 1/3 – 2/3, c'est à dire qu'au maximum 1/3 de la résistance totale des isolants peut se situer côté chaud du freine-vapeur. Ce rapport ne doit pas dépasser 1/4 – 3/4 en zone froide. <i>Attention cette mise en œuvre n'est cependant pas prévue dans les avis techniques des membranes actuellement sur le marché.</i></p>	<p>Proscrire les complexes isolants collés (voir § Généralités).</p> <p>Ponts thermiques : les ponts thermiques de dalle et de refend peuvent générer des points froids importants. Toutefois les dalles et refends en béton sont peu affectés par une condensation ponctuelle. Une bonne ventilation permet d'éviter toute pathologie du bâti.</p> <p>En présence de plancher bois et poutrelle hourdis : assurer l'étanchéité à l'air (semble impossible pour les hourdis), rompre le pont thermique (continuité de l'isolant dans le plancher bois), protéger le mur de la pluie et favoriser son séchage. Voir détail dans les généralités.</p> <p>Climat de montagne : vérifier la compatibilité de l'avis technique du freine-vapeur (par exemple celui de Isover Vario inclut explicitement le climat de montagne)</p>
<p>Doc. de référence</p>	<p>Avis technique du freine-vapeur hygrovariable, notamment celui d'Isover Vario / Vario XTRA.</p>	

MURS ENTRE 1948 ET 1975	➤ Mur en béton	➤ Isolation par l'extérieur
Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	
<p>Mur en béton armé (μ de 150 à 250, toute épaisseur)</p> <p>Tout parement intérieur et extérieur.</p>	<div style="text-align: center;"> <p><i>Extérieur</i></p>  <p><i>Intérieur</i></p> </div> <p>Tout isolant (le béton est plus pare-vapeur que n'importe quel isolant). Enduit selon préconisation du fabricant.</p> <p>Variante possible</p> <p>ITE sous bardage, tout type d'isolant.</p>	<p>Points de vigilance</p> <p>Respecter les avis techniques / DTA / ETE : respecter les couples isolant-enduit préconisés par les fabricants.</p>
Doc. de référence	<p>CPT 3035 – V2 : Systèmes d'isolation thermique extérieure par enduit sur polystyrène expansé- juillet 2013 DTA /ETE des systèmes d'ITE polystyrène expansé et laine de roche sous enduit</p>	

Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	Points de vigilance
<p>Mur en parpaing. (épaisseur environ 20 cm, S_d d'environ 1m en partie courante)</p> <p>Tout parement intérieur et extérieur.</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: right;"> <p>Extérieur</p> <p>Tout enduit extérieur →</p> <p>Mur en parpaing →</p> <p>Tout enduit intérieur →</p> </div> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: left;"> <p>Intérieur</p> <p>Isolant perméable à la vapeur ←</p> <p>Appui à faible pont thermique ←</p> <p>Freine-vapeur hygrovariable ←</p> <p>Lame d'air ←</p> <p>Plaque de plâtre sur ossature ←</p> </div> </div> <p>Doublage sur ossature avec isolant ouvert à la diffusion de vapeur et de préférence capillaire (fibre de bois, ouate de cellulose, etc.) et freine-vapeur hygrovariable sous avis technique.</p> <p>Contrôler l'état de l'enduit extérieur : il doit assurer son rôle de protection contre la pluie.</p>	<p>Proscrire les complexes isolants collés (voir § Généralités).</p> <p>Ponts thermiques : les ponts thermiques de liaison avec les murs en parpaing ne génèrent pas des points froids trop importants. Par ailleurs les dalles et refends en béton sont peu affectés par une condensation ponctuelle. Une bonne ventilation permet d'éviter toute pathologie du bâti.</p> <p>En présence de plancher bois et poutrelle hourdis : assurer l'étanchéité à l'air (semble impossible pour les hourdis), rompre le pont thermique (continuité de l'isolant dans le plancher bois), protéger le mur de la pluie et favoriser son séchage. Voir détail dans les généralités.</p>
<p>Doc. de référence</p>	<p>NF DTU 20.1 P4 (octobre 2008) : Travaux de bâtiment - Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs - Partie 4 : Règles de calcul et dispositions constructives minimales.</p>	

MURS ENTRE 1948 ET 1975	➤ Mur en parpaing (bloc de béton creux)	➤ Isolation par l'extérieur
Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	
<p>Mur en parpaing. (épaisseur environ 20 cm, S_d d'environ 1m en partie courante)</p> <p>Tout parement intérieur et extérieur.</p>	<div style="text-align: center;"> <p>Extérieur</p>  <p>Intérieur</p> </div> <p>Enduit → Polystyrène expansé/ Laine de roche/ Fibre de bois</p> <p>← Parpaing ← Parement plâtre</p> <p>Enduit ouvert à la diffusion de vapeur (ordre de grandeur $S_d < 2m$) Tout isolant, (PSE, laine de roche, fibre de bois...) selon spécifications du système d'ITE (DTA / ETE).</p> <p>Variante possible</p> <p>ITE sous bardage, isolant assez ouvert à la vapeur d'eau.</p>	<p>Points de vigilance</p> <p>Proscrire les isolants très peu ouverts à la diffusion de vapeur (Polystyrène extrudé, Polyuréthane, Mousse Phénolique...).</p> <p>Respecter les avis techniques / DTA / ETE : respecter les couples isolant-enduit préconisés par les fabricants.</p> <p>NB : l'étanchéité à l'air du bâtiment n'est pas assurée par l'ITE. Contrôler et reprendre le cas échéant la continuité du parement intérieur.</p>
Doc. de référence	<p>CPT 3035 – V2 : Systèmes d'isolation thermique extérieure par enduit sur polystyrène expansé- juillet 2013 DTA /ETE des systèmes d'ITE polystyrène expansé et laine de roche sous enduit</p>	

L'isolation par l'intérieur des murs en pierre nécessite une attention particulière.

Deux effets sont particulièrement importants pour éviter les pathologies :

- La [protection à la pluie battante](#) : il est important d'identifier les pierres qui absorbent la pluie, et de les protéger,
- La perméabilité à la vapeur d'eau : le facteur de diffusion μ varie de 10 à 10 000 selon la nature de la pierre, ce qui implique un choix différent de la membrane d'étanchéité à l'air, pour respecter le [principe de perméabilité croissante](#).

C'est pourquoi nous proposons de catégoriser les pierres en trois groupes :

	Groupe 1 : pierres ouvertes (μ inférieur à 70) Taillées ou non appareillées	Groupe 2 : pierres peu ouvertes (μ entre 100 et 300) Taillées ou non appareillées	Groupe 3 : pierres très fermées (μ supérieur à 500) Taillées ou non appareillées
<i>Exemples</i>	<i>Calcaire tendre, mollasse, tuffeau, grès tendres</i>	<i>Calcaires durs, ...</i>	<i>Schistes, ardoises, granite, basalte, calcaires très durs, marbre.</i>
Non enduite	A protéger de la pluie impérativement	A protéger de la pluie impérativement	Ces pierres n'absorbent pas la pluie : enduit non indispensable. Eviter les pièges à eau.
Enduite	Voir solution proposée (freine-vapeur hygrovariable)	Voir solution proposée (freine-vapeur hygrovariable à fort Sd)	Voir solution proposée (enduit de redistribution, freine-vapeur hygrovariable à fort Sd)

Pour plus de détail sur ce découpage en groupes, voir aussi le graphique page 51.

Il est possible d'utiliser une pipe de Karsten pour mesurer l'absorption d'eau liquide des pierres, et déterminer ainsi la nécessité ou non de les protéger de la pluie. Voir à ce sujet [l'annexe 4](#).

MUR D'AVANT 1948	➤ Mur en pierre du groupe 1	➤ Isolation par l'intérieur
Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	
<p>Mur en pierre du groupe 1 d'épaisseur 30 à 50cm environ. (μ inférieur à 70, par exemple : calcaire tendre, molasse, tuffeau, grès tendre...)</p> <p>Intérieur : enduit plâtre Extérieur : nu ou enduit</p>	<div data-bbox="510 272 1503 528" style="text-align: center;"> </div> <p>Doublage sur ossature avec isolant ouvert à la diffusion de vapeur et de préférence capillaire (fibre de bois, ouate de cellulose, etc.) et freine-vapeur hygrovariable sous avis technique.</p> <p>En présence d'un enduit extérieur ou jointoiement continu au ciment, notamment s'il est déjà fissuré : envisager de casser et remplacer par un enduit à la chaux.</p> <p>Selon les cas, envisager une protection particulière de la façade la plus exposée à la pluie (bardage ventilé, isolation extérieure...).</p> <p>Variante possible</p> <p>Les laines minérales fonctionnent également, mais présentent une capacité de séchage un peu moins bonne en raison de leur caractère non capillaire. L'isolation par l'intérieur en béton cellulaire ou silicate de chaux est également possible. Assurer une parfaite adhérence et la continuité capillaire entre mur et isolant.</p> <p>En adéquation avec le patrimoine local, un enduit à pierre vue est techniquement possible pour supprimer les pièges à eau et protéger la façade de la pluie en lieu et place d'un enduit traditionnel.</p> <p>Pour les pierres poreuses non enduites, et dans le cas où un enduit traditionnel ne serait pas envisagé, il est nécessaire de recourir à l'application d'un hydrofuge ouvert à la diffusion de vapeur, par un professionnel qualifié. (<i>Viser $A = 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ [RAGE]</i>) Voir à ce sujet l'annexe 3 pour les normes associées.</p> <p>Les corrections isolantes, type enduit « isolant » (chaux-chanvre, chaux-aérogel de silice, etc.) côté extérieur sont un complément intéressant notamment au droit de planchers intermédiaires.</p>	<p>Proscrire les complexes isolants collés voir généralités.</p> <p>Un hydrofuge fermé à la diffusion de vapeur, ou mal appliqué, peut être un remède pire que le mal... faire appel à un spécialiste !</p> <p>Pierres non appareillées : veiller à supprimer les pièges à eau au niveau du jointoiement en façade. Si réfection de façade, privilégier un enduit à pierre vue, à base de chaux.</p> <p>En présence de plancher bois et poutrelle hourdis : assurer l'étanchéité à l'air (semble impossible pour les hourdis), rompre le pont thermique (continuité de l'isolant dans le plancher bois), protéger le mur de la pluie et favoriser son séchage. Voir détail dans les généralités.</p> <p>Une correction thermique ($R = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ sur 1,2m environ) est recommandée sur les murs de refend afin d'éviter tout risque de condensation, notamment dans les pièces humides. Avec une bonne ventilation, les risques de moisissures semblent limités en l'absence d'un substrat organique, de plâtre ou de papier peint.</p>
Doc. de référence	Avis technique du freine-vapeur hygrovariable	

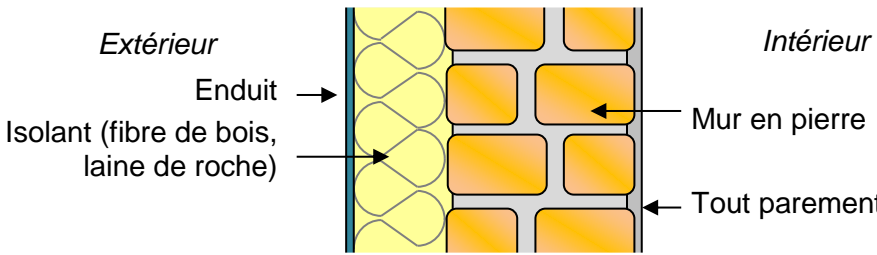
MUR D'AVANT 1948	➤ Mur en pierre du groupe 2	➤ Isolation par l'intérieur	
Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques		Points de vigilance
<p>Mur en pierre du groupe 2 d'épaisseur 30 à 50cm environ.</p> <p>(μ entre 100 et 300, par exemple : calcaires durs...)</p> <p>Intérieur : enduit plâtre Extérieur : nu ou enduit</p>	<div data-bbox="510 284 1518 545" style="text-align: center;"> </div> <p>Doublage sur ossature avec isolant ouvert à la diffusion de vapeur et non putrescible (laine minérale,...), ou isolants bio-sourcés (sous avis technique compatible avec le freine-vapeur) et freine-vapeur hydrovariable à fort Sd (capable de monter à plus de 18m) sous avis technique.</p> <p>En présence d'un enduit ou jointoyage continu au ciment, notamment s'il est déjà fissuré : envisager de casser et remplacer par un enduit à la chaux.</p> <p>Selon les cas, envisager une protection particulière de la façade la plus exposée à la pluie (bardage ventilé, isolation extérieure...).</p> <p>Variante possible</p> <p>En adéquation avec le patrimoine local, un enduit à pierre vue est techniquement possible pour supprimer les pièges à eau et protéger la façade de la pluie en lieu et place d'un enduit traditionnel.</p> <p>Pour les pierres poreuses non enduites, et dans le cas où un enduit traditionnel ne serait pas envisagé, il est nécessaire de recourir à l'application d'un hydrofuge ouvert à la diffusion de vapeur, par un professionnel qualifié. ($V_{\text{viser}} A = 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ [RAGEI]) Voir à ce sujet l'annexe 3 pour les normes associées.</p> <p>Les corrections isolantes, type enduit « isolant » (chaux-chanvre, chaux-aérogel de silice, etc.) côté extérieur sont un complément intéressant notamment au droit de planchers intermédiaires.</p>		<p>Proscrire les complexes isolants collés, voir généralités.</p> <p>Un hydrofuge fermé à la diffusion de vapeur, ou mal appliqué, peut être un remède pire que le mal... faire appel à un spécialiste !</p> <p>En présence de plancher bois et poutrelle hourdis : assurer l'étanchéité à l'air (semble impossible pour les hourdis), rompre le pont thermique (continuité de l'isolant dans le plancher bois), protéger le mur de la pluie et favoriser son séchage. Voir détail dans les généralités.</p> <p>Une correction thermique ($R = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ sur 1,2m environ) est recommandée sur les murs de refend afin d'éviter tout risque de condensation, notamment dans les pièces humides. Avec une bonne ventilation, les risques de moisissures semblent limités en l'absence d'un substrat organique, de plâtre ou de papier peint.</p>
Doc. de référence	<p>Avis technique du freine-vapeur hydrovariable à fort Sd.</p> <p>En climat de montagne, vérifier que l'avis technique couvre bien ce domaine d'application.</p>		

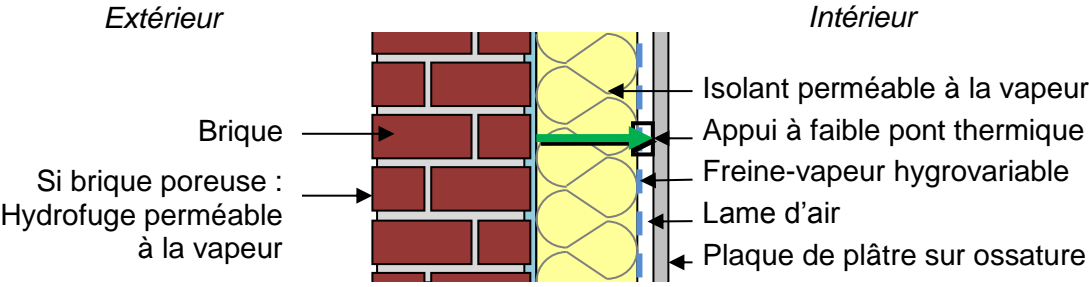
MUR D'AVANT 1948

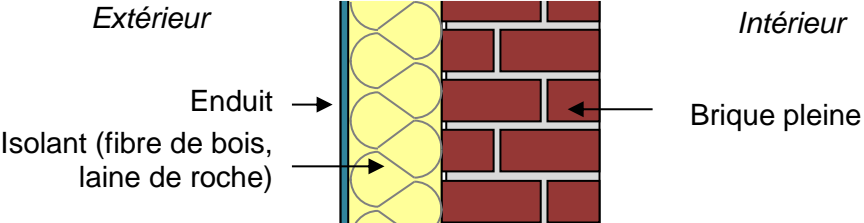
➤ Mur en pierre du groupe 3

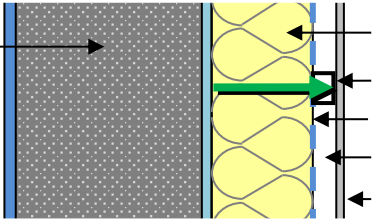
➤ Isolation par l'intérieur

Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	Points de vigilance
<p>Mur en pierre du groupe 3 (μ supérieur à 500, par exemple : Schistes, ardoises, granite, basalte, calcaire très dur) d'épaisseur 30 à 50cm environ.</p> <p>Intérieur : nu ou enduit plâtre Extérieur : nu ou enduit</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p><i>Extérieur</i></p> <p>Pierre très dure (granite...) Joints capillaires : chaux, terre crue</p> </div> <div style="width: 10%; text-align: center;"> </div> <div style="width: 45%;"> <p><i>Intérieur</i></p> <p>Enduit de redistribution (chaux) Laine minérale Appui à faible pont thermique Freine-vapeur hygrovariable à fort Sd Plaque de plâtre sur ossature</p> </div> </div> <p>Dans le cas où les joints sont capillaires (chaux, terre crue), un enduit de redistribution de 15 à 30 mm d'épaisseur de type enduit à la chaux appliqué sur la face intérieure du mur permet de guider l'humidité vers les joints, et de limiter ainsi la quantité d'eau contenue dans les premiers centimètres des isolants fibreux dans des limites raisonnables. Dans cette configuration la laine minérale se comporte mieux qu'un isolant hygroscopique qui a tendance à rester trop chargé en humidité. (voir étude WUFI en annexe)</p> <p>Prévoir un freine-vapeur hygrovariable à fort Sd (capable de monter à plus de 18m). Vérifier l'état de l'enduit ou des joints existants, pour s'assurer que la protection à la pluie est effective et qu'il n'y a pas de piège à eau.</p> <p>Variante possible</p> <p>En cas de joints non capillaires, et en climat de bord de mer, il semble plus prudent de s'orienter vers un double mur avec lame d'air ventilée et cunette (schéma page 66) : double mur de type IIb ou III comme décrit dans le NF DTU 20.1 P1-3.</p> <p>Une technique possible est une contre cloison avec appui intermédiaire formant lame d'air ventilée entre mur et isolant. Un freine-vapeur hygrovariable à fort Sd semble intéressant pour maximiser la capacité de séchage. Dans ce cas un isolant hygroscopique semble à éviter.</p>	<p>Proscrire les complexes isolants collés, voir généralités.</p> <p>Pierres non appareillées : veiller à supprimer les pièges à eau au niveau du jointolement en façade. Si réfection de façade, privilégier un enduit à pierre vue, à base de chaux.</p> <p>En présence de plancher bois et poutrelle hourdis : assurer l'étanchéité à l'air (semble impossible pour les hourdis), rompre le pont thermique (continuité de l'isolant dans le plancher bois), protéger le mur de la pluie et favoriser son séchage. Voir détail dans les généralités.</p> <p>Une correction thermique ($R = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ sur 1,2m environ) est recommandée sur les murs de refend afin d'éviter tout risque de condensation, notamment dans les pièces humides. Avec une bonne ventilation, les risques de moisissures semblent limités en l'absence d'un substrat organique, de plâtre ou de papier peint.</p>
<p>Doc. de référence</p>	<p>NF DTU 20.1 Partie 1-3, Avis technique du freine-vapeur hygrovariable. En climat de montagne, vérifier que l'avis technique couvre bien ce domaine d'application.</p>	

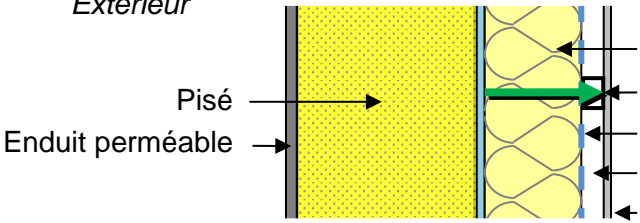
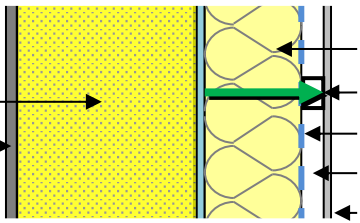
MUR D'AVANT 1948	➤ Mur en pierre des groupes 1, 2 et 3	➤ Isolation par l'extérieur	
Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques		Points de vigilance
<p>Mur en pierre de toute nature, non appareillé ou pierre de taille.</p> <p>Intérieur : toute finition</p> <p>Extérieur : tout type</p>	<div style="text-align: center;">  <p>Extérieur</p> <p>Enduit →</p> <p>Isolant (fibre de bois, laine de roche) →</p> <p>← Mur en pierre</p> <p>← Tout parement</p> <p>Intérieur</p> </div> <p>Isolant ouvert à la diffusion de vapeur (isolant fibreux recommandé pour les pierres du groupe 1 ou 2).</p> <p>Enduit également ouvert à la vapeur (Sd de l'ordre de 0,5m pour les pierres du groupe 1, et de 2m pour les pierres du groupe 2).</p> <p>Variante possible</p> <p>ITE sous bardage, isolants ouverts à la diffusion de vapeur d'eau.</p>		<p>Le PSE est fortement déconseillé sur un mur en pierre, pour préserver une bonne capacité de séchage et en raison de la mauvaise planéité du support.</p> <p>Pour les murs en pierre de groupe 3, tout type d'isolant convient dans la limite de la capacité à le mettre en œuvre.</p> <p>NB : l'étanchéité à l'air du bâtiment n'est pas assurée par l'ITE. Contrôler et reprendre le cas échéant la continuité du parement intérieur.</p> <p>En cas d'enduit ciment extérieur, ou ancien RPE (plastique)... : Neutraliser tout élément fermé à la diffusion de vapeur et/ou faiblement capillaire avant isolation (sinon la capacité de séchage du mur peut s'avérer insuffisante). Voir généralités.</p>
Doc. de référence	DTA /ETE des systèmes d'ITE		

MUR D'AVANT 1948	➤ Mur en en brique de terre cuite pleine	➤ Isolation par l'intérieur	
Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques		Points de vigilance
<p>Mur en briques pleines. (μ d'environ 10 à 16, épaisseur 30 à 40cm environ)</p> <p>Intérieur : enduit plâtre Extérieur : nu</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p><i>Extérieur</i></p>  <p>Brique</p> <p>Si brique poreuse : Hydrofuge perméable à la vapeur</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p><i>Intérieur</i></p> <p>Isolant perméable à la vapeur</p> <p>Appui à faible pont thermique</p> <p>Freine-vapeur hygrovariable</p> <p>Lame d'air</p> <p>Plaque de plâtre sur ossature</p> </div> </div> <p>Si la brique est poreuse (brique ancienne notamment, voir annexe 4 pour la mesure à la pipe de Karsten), envisager l'application d'un hydrofuge ouvert à la diffusion de vapeur par un professionnel qualifié. Viser $A = 0,2 \text{ kg/m.h}^{1/2}$ [RAGE] (voir annexe 3 pour le classement correspondant).</p> <p>L'isolant sera ouvert à la diffusion de vapeur (fibreux), et associé à un freine-vapeur hygrovariable sous avis technique. Un isolant capillaire (fibre de bois, ouate de cellulose, etc.) est préférable une fois le mur correctement protégé de la pluie.</p> <p>Soigner tous les détails d'étanchéité à l'air.</p> <p>Variante possible</p> <p>En présence de peinture de façade fermée à la diffusion de vapeur : une peinture de façade non perméante à la vapeur d'eau peut générer une accumulation d'eau dans le mur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si la peinture est en bon état et protège bien de la pluie, un freine-vapeur hygrovariable à l'intérieur permet de laisser sécher le mur. [Isolin] - Dans le cas contraire, sabler la peinture et la remplacer par une peinture ouverte à la diffusion de vapeur. 		<p>Proscrire les complexes isolants collés, voir généralités.</p> <p>Un hydrofuge fermé à la diffusion de vapeur, ou mal appliqué, peut être un remède pire que le mal... faire appel à un spécialiste !</p> <p>En présence de plancher bois et poutrelle hourdis : assurer l'étanchéité à l'air (semble impossible pour les hourdis), rompre le pont thermique (continuité de l'isolant dans le plancher bois), protéger le mur de la pluie et favoriser son séchage. Voir détail dans les généralités.</p> <p>Ponts thermiques : les ponts thermiques de dalle et de refend peuvent générer des points froids importants. Il convient d'évaluer les risques selon la nature des matériaux. Les dalles et refends en béton plein sont peu affectés par une condensation ponctuelle. Une bonne ventilation permet d'éviter les pathologies. Mais des moisissures peuvent se développer sur des refends en brique avec enduit torchis ou plâtre. Envisager dans ces cas une correction thermique.</p>
Doc. de référence	Avis technique du freine-vapeur hygrovariable		

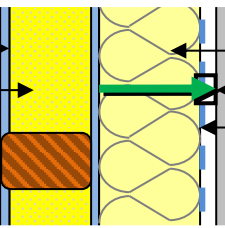
MUR D'AVANT 1948	➤ Mur en brique de terre cuite pleine	➤ Isolation par l'extérieur
Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	
<p>Mur en briques pleines. (μ d'environ 10 à 16, épaisseur 30 à 40cm environ)</p> <p>Intérieur : toute finition Extérieur : nu</p>	<div style="text-align: center;"> <p>Extérieur</p>  <p>Intérieur</p> </div> <p>Isolant ouvert à la diffusion de vapeur (fibreux). Enduit également ouvert à la vapeur (ordre de grandeur $S_d < 2m$)</p> <p>Variante possible</p> <p>ITE sous bardage, isolants ouverts à la diffusion de vapeur.</p>	<p>Points de vigilance</p> <p>Bien choisir des chevilles adaptées à la brique</p> <p>NB : l'étanchéité à l'air du bâtiment n'est pas assurée par l'ITE. Contrôler et reprendre le cas échéant la continuité du parement intérieur.</p>
Doc. de référence	DTA /ETE des systèmes d'ITE	

MUR D'AVANT 1948	➤ Mur en béton de mâchefer	➤ Isolation par l'intérieur	
Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques		Points de vigilance
<p>Mur en béton de mâchefer. (épaisseur d'environ 50cm)</p> <p>Intérieur : enduit plâtre Extérieur : enduit chaux</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: center;"> <p><i>Extérieur</i></p> <p>Mâchefer Enduit $S_d \leq 0,5m$ et $A \leq 0,2 \rightarrow$ $kg/m^2.h^{1/2}$</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;"> <p><i>Intérieur</i></p> <p>Isolant perméable à la vapeur Appui à faible pont thermique Freine-vapeur hygrovariable Lame d'air Plaque de plâtre sur ossature</p> </div> </div> <p>Doublage sur ossature avec isolant fibreux (laines minérales, fibre de bois, ouate de cellulose, etc.).</p> <p>Freine-vapeur hygrovariable sous avis technique.</p> <p>Enduit à la fois ouvert à la diffusion de vapeur (S_d inférieur à 0,5 m) et imperméable à l'eau liquide (absorption $A \leq 0,2 kg/m^2.h^{1/2}$). Attention tous les enduits à la chaux ne remplissent pas ces critères, voir annexe 3.</p> <div style="background-color: #d9ead3; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>Variante possible</p> </div>		<p>Proscrire les complexes isolants collés, voir généralités.</p> <p>En présence de plancher bois : assurer l'étanchéité à l'air, rompre le pont thermique (continuité de l'isolant dans le plancher bois), protéger le mur de la pluie et favoriser son séchage.</p> <p>En présence de plancher poutrelle-hourdis, l'étanchéité à l'air semble impossible (il faudrait traiter tous les traversées de réseaux et toutes les trémies) : nous conseillons de ne pas isoler par l'intérieur mais par l'extérieur (classique ou enduit isolant extérieur) dans cette configuration.</p> <p>Voir détail dans les généralités.</p>
Doc. de référence	Avis technique du freine-vapeur hygrovariable		

MUR D'AVANT 1948	➤ Mur en béton de mâchefer	➤ Isolation par l'extérieur
Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	
<p>Mur en béton de mâchefer. (épaisseur d'environ 50cm)</p> <p>Tout parement intérieur et extérieur</p>	<div data-bbox="577 320 1480 560" data-label="Diagram"> <p>Extérieur</p> <p>Intérieur</p> <p>Enduit</p> <p>Isolant perméable à la vapeur</p> <p>Béton de mâchefer</p> <p>Parement plâtre</p> </div> <p>Isolant ouvert à la diffusion de vapeur (fibreuse). Enduit également ouvert à la vapeur (ordre de grandeur $S_d < 2m$)</p> <p>Variante possible</p> <p>En présence d'un sous-bassement béton, et en l'absence de remontées capillaires, le PSE est une variante possible. ITE sous bardage, sous réserve de la résistance des fixations.</p>	<p>Points de vigilance</p> <p>Bien choisir des chevilles adaptées au mâchefer.</p> <p>Dans tous les cas, l'adhérence et la continuité capillaire entre mur et isolant doivent être assurées. Veiller à ne pas créer de lame d'air.</p> <p>NB : l'étanchéité à l'air du bâtiment n'est pas assurée par l'ITE. Contrôler et reprendre le cas échéant la continuité du parement intérieur.</p>
Doc. de référence	DTA /ETE des systèmes d'ITE	

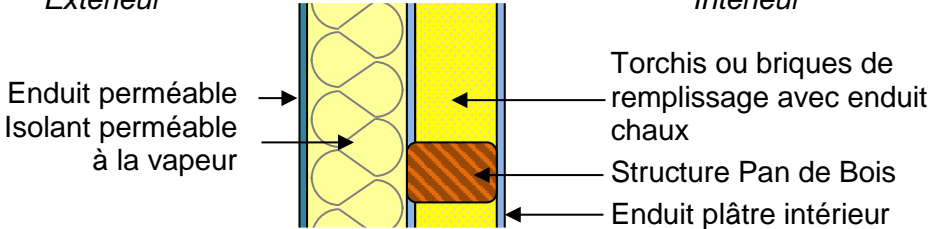
MUR D'AVANT 1948	➤ Mur en pisé		➤ Isolation par l'intérieur
Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques		Points de vigilance
<p>Mur en pisé. (μ d'environ 6 à 12, épaisseur 30 à 50cm environ)</p> <p>Intérieur : enduit plâtre Extérieur : enduit chaux</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: center;"> <p>Extérieur</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Intérieur</p>  </div> </div> <p>Isolant fibreux de préférence capillaire (fibre de bois, ouate de cellulose, etc.). Les laines minérales fonctionnent également, mais présentent une capacité de séchage un peu moins bonne en raison de leur caractère non capillaire.</p> <p>Freine-vapeur hygrovariable.</p> <p><i>NB : l'enduit doit être adapté au pisé. Voir à ce sujet l'annexe 3.</i></p>		<p>Proscrire les complexes isolants collés, voir généralités.</p> <p>En présence de plancher bois : Assurer la continuité de l'isolation et du freine-vapeur dans l'épaisseur du plancher et raccord autour des solives. Voir détail dans les généralités.</p> <p>Une correction thermique ($R = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ sur 60cm minimum) est vivement recommandée sur les murs de refend afin d'éviter tout risque de condensation voire de dégradation structurelle, notamment dans les pièces humides.</p>
<p>Variante possible</p>	<p>Si enduit ciment extérieur</p>	<p>Enduit ciment extérieur à enlever systématiquement, et remplacer par enduit à la chaux (sinon capacité de séchage insuffisante, et risque de décollement de l'enduit).</p>	
	<p>Si enduit ciment intérieur, papier peint vinyle ou toile de verre...</p>	<p>Neutraliser tout élément fermé à la diffusion de vapeur d'eau avant isolation (sinon la capacité de séchage du mur peut s'avérer insuffisante).</p>	
<p>Doc. de référence</p>	<p>Avis technique du freine-vapeur hygrovariable</p>		

MUR D'AVANT 1948	➤ Mur en pisé	➤ Isolation par l'extérieur
Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	
<p>Mur en pisé. (μ d'environ 6 à 12, épaisseur 30 à 50cm environ)</p> <p>Intérieur : enduit plâtre Extérieur : enduit ciment</p>	<div data-bbox="568 316 1433 555" data-label="Diagram"> </div> <p>Isolant ouvert à la diffusion de vapeur (fibreux). Enduit également ouvert à la vapeur (Sd de l'ordre 0,5m).</p> <p>Variante possible</p> <p>Le PSE reste à éviter pour conserver une capacité de séchage maximale (Lettre LGCB-ENTPE Pisé). Il est même à proscrire en présence d'enduit ciment intérieur ou papier peint vinyle (pour maximiser la capacité de séchage).</p> <p>ITE sous bardage ventilé, sous réserve de la résistance des fixations.</p>	<p>Points de vigilance</p> <p>Enduit ciment fissuré : à décroûter. Sinon il peut être conservé s'il est en bon état.</p> <p>Bien choisir des chevilles adaptées au pisé.</p> <p>Dans tous les cas, l'adhérence et la continuité capillaire entre mur et isolant doivent être assurée. Veiller à ne pas créer de lame d'air.</p> <p>NB : l'étanchéité à l'air du bâtiment n'est pas assurée par l'ITE. Contrôler et reprendre le cas échéant la continuité du parement intérieur.</p>
Doc. de référence	DTA /ETE des systèmes d'ITE, et préconisations du fabricant des fixations (chevilles adaptées...)	

MUR D'AVANT 1948	➤ Mur à pan de bois	➤ Isolation par l'intérieur
Mur avant réno.	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	Points de vigilance
<p>Mur à pan de bois (épaisseur d'environ 20cm, remplissage torchis μ d'environ 11, ou brique ancienne, μ d'environ 15)</p> <p>Intérieur : enduit plâtre</p> <p>Extérieur : bois nu / miroir avec enduit chaux</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p><i>Extérieur</i></p> <p>Enduit chaux</p> <p>Torchis ou Brique de remplissage</p> <p>Structure pan de bois</p> </div> <div style="width: 10%; text-align: center;">  </div> <div style="width: 45%;"> <p><i>Intérieur</i></p> <p>Isolant perméable à la vapeur</p> <p>Appui à faible pont thermique</p> <p>Freine-vapeur hygrovariable à fort Sd</p> <p>Plaque de plâtre sur ossature</p> </div> </div> <p>Isolant fibreux, de préférence non hygroscopique (laine minérale) et freine-vapeur hygrovariable à fort Sd.</p> <p>Il est impératif de protéger le mur de la pluie :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rétablir les débords de toiture s'ils ont été supprimés. • Supprimer les pièges à eau et fissures entre les miroirs et le bois. • Reprendre l'enduit des miroirs s'il est fissuré. Utiliser un enduit à base de chaux (adapté au support, voir à ce sujet l'annexe 3). <p>Soigner tous les détails d'étanchéité à l'air.</p> <p>Variante possible</p> <p>Les isolants hygroscopiques, dont la plupart des bio-sourcés, semblent possibles mais moins recommandés sur ce type de mur car ils accumulent un peu plus d'humidité que les laines non hygroscopiques (<i>effet « éponge »</i>), sans toutefois qu'un risque pathologique apparaisse. Par ailleurs, une laine minérale à faible conductivité permet de réduire l'encombrement, ce qui est particulièrement intéressant pour les maisons à pan de bois de centre-ville.</p> <p>Le béton cellulaire allégé type Calsitherm, Multipor, STDB, etc., (simulé de façon générique avec $\lambda=0,04$ et $\mu=4,1$) est une piste intéressante car il est très résistant à l'humidité, mais sa mise en œuvre nécessite absolument une continuité capillaire parfaite avec le mur existant, ce qui semble très difficile à mettre en œuvre en pratique (sur un mur non plan et non vertical).</p>	<p>Proscrire les complexes isolants collés, voir généralités.</p> <p>Dans tous les cas, l'adhérence et la continuité capillaire entre mur et isolant doivent être assurées. Veiller à ne pas créer de lame d'air.</p> <p>Neutraliser tout élément fermé à la diffusion de vapeur avant isolation : enduit ciment, papier peint vinyle, toile de verre, sinon la capacité de séchage du mur peut s'avérer insuffisante.</p> <p>En présence de plancher bois : Assurer la continuité de l'isolation et du freine-vapeur dans l'épaisseur du plancher et raccord autour des solives. Voir détail dans les généralités.</p> <p>Une correction thermique ($R = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ sur 60cm minimum) est vivement recommandée sur les murs de refend afin d'éviter tout risque de condensation voire de dégradation structurelle du pan de bois, notamment dans les pièces humides.</p>
Doc. de référence	Avis technique du freine-vapeur hygrovariable	

Dans le cas de pan de bois abimés : les miroirs sont remplacés. Des solutions de remplissage à base de béton cellulaire allégé permettent d'améliorer le comportement hygrothermique du mur [\[HUN\]](#) (Hypothèses des simulations : béton cellulaire $\lambda=0,04$ et $\mu=4,1$). Par analogie, le remplissage en béton de chanvre avec une bonne protection à la pluie (enduit chaux) semble possible également.

Correction thermique extérieure des miroirs : il est possible d'améliorer le comportement hygrothermique du mur en appliquant un enduit chaux-isolant (chanvre, silice expansée, aérogel de silice, ... selon mise en œuvre préconisée par les fabricants), qui apportera à la fois une protection à la pluie, tout en restant ouvert à la diffusion de vapeur, et une correction thermique intéressante.

MUR D'AVANT 1948	➤ Mur à pan de bois	➤ Isolation par l'extérieur
Mur avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	Points de vigilance
<p>Mur à pan de bois. (épaisseur d'environ 20cm, remplissage torchis μ d'environ 11, ou brique ancienne, μ d'environ 15)</p> <p>Toute finition intérieure Extérieur : nu / enduit chaux</p>	<div style="text-align: center;"> <p><i>Extérieur</i></p>  <p><i>Intérieur</i></p> </div> <p>Isolant ouvert à la diffusion de vapeur (fibreux). Enduit également ouvert à la vapeur (Sd de l'ordre 0,5m).</p> <p>Afin de maximiser la capacité de séchage, il est préférable le cas échéant de déposer un enduit extérieur existant qui serait non capillaire (ciment) ou fermé à la diffusion de vapeur (enduit « plastique »).</p> <p>Variante possible</p> <p>ITE sous bardage, sous réserve de la résistance des fixations.</p>	<p>Adapter le système constructif à la planéité du mur : pour reprendre un mur non plan, une ITE entre ossature bois + fibre de bois pare-pluie support d'enduit semble une solution adaptée.</p> <p>Dans tous les cas, l'adhérence et la continuité capillaire entre mur et isolant doivent être assurée. Veiller à ne pas créer de lame d'air.</p> <p>NB : l'étanchéité à l'air du bâtiment n'est pas assurée par l'ITE. Contrôler et reprendre le cas échéant la continuité du parement intérieur.</p>
Doc. de référence	DTA /ETE des systèmes d'ITE	

TOITURES

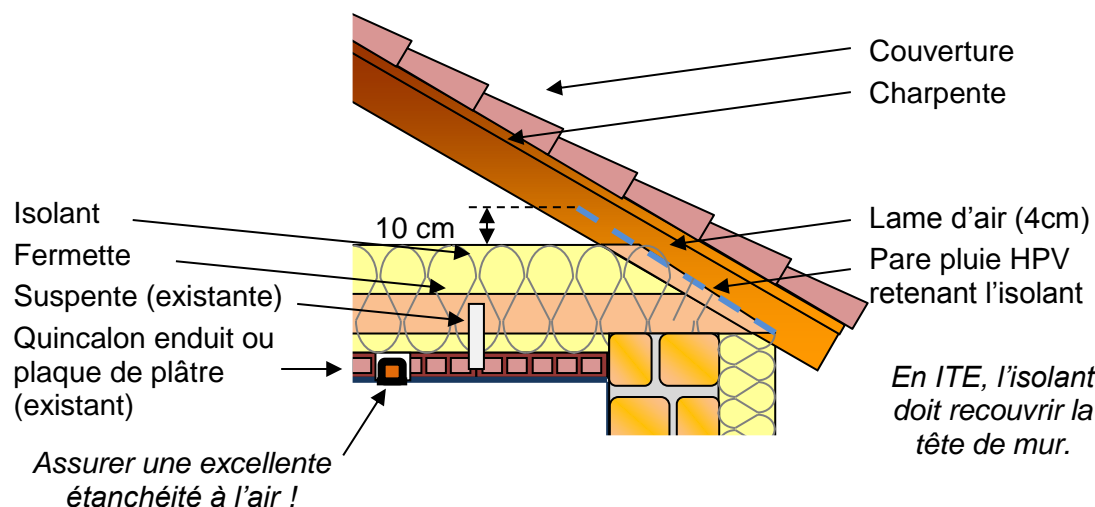
➤ Comble perdu isolé à l'horizontale

Paroi avant rénovation

Solutions d'isolation : bonnes pratiques

Points de vigilance

Comble perdu en fermettes
Plafond du volume chauffé en plaque de plâtre ou brique creuse (quincalons)



Isolation en ouate de cellulose insufflée.

La plaque de plâtre ou quincalons suffit à maîtriser la migration de vapeur à condition que le comble soit bien aéré. Si besoin, percer des ouvertures en pignon pour bien aérer le comble. Pour que des courants d'air excessifs ne déplacent pas l'isolant, former une croûte sur la ouate par pulvérisation d'eau.

Variante possible

D'autres isolants en vrac sont possibles également, mais il semble plus difficile d'assurer une bonne aération du comble tout en évitant que l'isolant ne soit poussé par le vent (la ouate peut être croutée). La ouate semble également moins appréciée des rongeurs (leurs galeries s'effondrent).

Si le mur est isolé par l'extérieur, il est important de couper le pont thermique **en recouvrant d'isolant la tête de mur**. Pour cela, ajouter si besoin un pare-pluie HPV pour assurer la lame d'air de 4cm sous les tuiles.

De préférence, **mettre en œuvre un pare pluies** sur toute la surface du toit pour protéger l'isolant de la condensation en sous-face de tuiles.

Traiter soigneusement l'étanchéité à l'air des passages électriques au plafond.

Attention également aux liaisons cloison de brique creuse – plafond quincalons : le plafond n'est pas enduit au droit de la cloison :

Traiter tous les défauts (fissures, boîtiers électriques dans la cloison...)

Doc. de référence

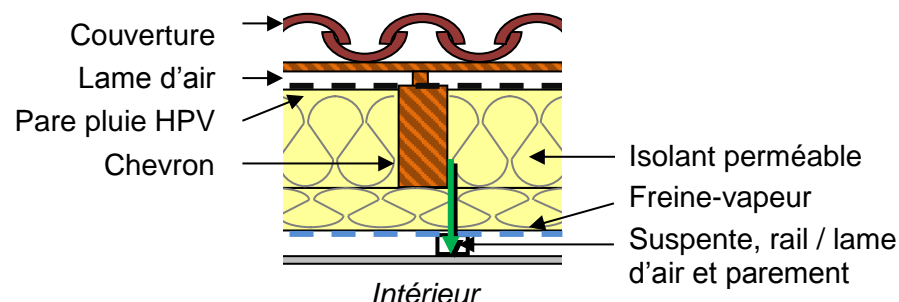
Avis technique de l'isolant mis en œuvre

Paroi avant rénovation

Solutions d'isolation : bonnes pratiques

Points de vigilance

Avec pare-pluie continu (existant ou mis en œuvre par le dessus en détuilant) :

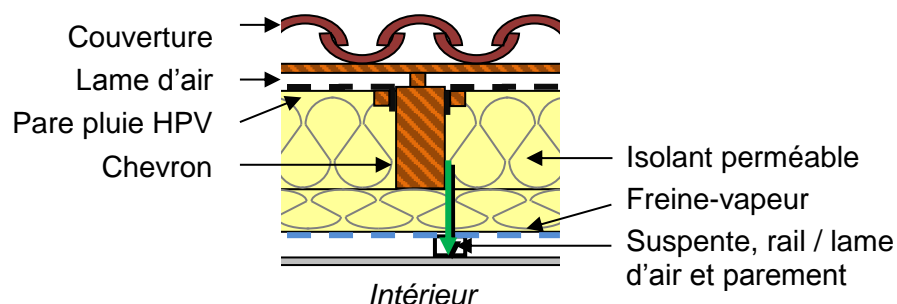


Isolation entre et sous les chevrons en isolant ouvert à la diffusion de vapeur (laine minérale, fibre de bois, ouate de cellulose,...). Utilisation de suspentes à faible pont thermique. L'isolation en laine de bois améliore à la marge le confort d'été. Cet effet est négligeable en présence de dalles lourdes ou de murs isolés par l'extérieur. En l'absence complète d'inertie du niveau concerné, la laine de bois reste préférable.

Mise en œuvre d'un freine-vapeur hygrovariable sous avis technique.

Variante possible

Cas où il n'y a pas de pare-pluie existant, et que l'on ne détuile pas pour placer un pare-pluie (pour raison économique notamment) :



Pose du pare-pluie HPV par dessous, sur tasseau. Cette mise en œuvre laisse la charpente exposée, et reste donc déconseillée pour les climats de montagne : dans ce cas privilégier un pare-pluie continu, voire un sarking.

PSE et PU à proscrire en toiture : risque de pathologie sur la charpente existante.

Climat de montagne : vérifier la compatibilité de l'avis technique du freine vapeur (par exemple celui de Isover Vario et celui de Pro Klima Intello incluent explicitement le climat de montagne)

En cas de charpente traditionnelle apparente, soigner l'étanchéité à l'air entre freine-vapeur et éléments de charpente.

Réaliser une lame d'air entre le freine-vapeur et le parement notamment pour faire passer l'électricité ou la ventilation sans endommager l'étanchéité à l'air.

Rampant de comble aménagé.

Cas où on peut isoler sous les chevrons

Doc. de référence

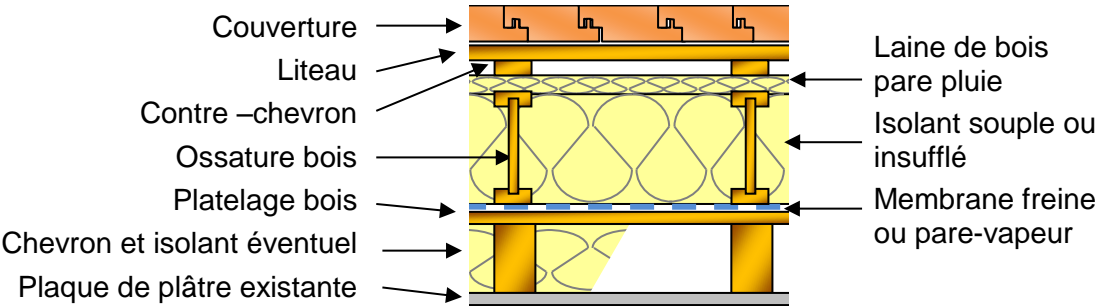
ATEC des freine-vapeurs hygrovariables

➤ Cas du climat de plaine

Paroi avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	Points de vigilance
<p>Rampant de comble aménagé.</p> <p>Cas où on ne peut pas isoler sous les chevrons : sarking</p>	<div data-bbox="495 359 1585 699"> </div> <p>Choix de l'isolant et de la membrane selon préconisation du fabricant de l'isolant spécifique pour le sarking.</p> <p>La prise en compte de l'isolant existant entre chevrons n'est pas explicitement abordée dans les documents techniques de tous les fabricants. Sur la base de [ProClima] et doc technique UThERM, on peut ajouter le double de la résistance existante (règle des 1/3 – 2/3) en climat de plaine.</p> <p>Généralement, la membrane doit être un pare-vapeur de $S_d \geq 18m$ en plaine.</p> <div data-bbox="483 1010 734 1043"> <p>Variante possible</p> </div> <p>Pose « en boucle » de la membrane dans le cas du remplacement de l'isolant existant (source : [ProClima]) :</p> <div data-bbox="495 1145 1585 1469"> </div>	<p>Quelle que soit la position du freine-vapeur, étanchéité à l'air à soigner !</p> <p>Un isolant ouvert à la diffusion de vapeur (laine de roche, de bois ou de verre) semble préférable à un isolant nettement plus fermé comme le polyuréthane ou le polystyrène extrudé (voir généralités), en tout cas en climat de plaine.</p> <p><i>NB : le sarking est souvent techniquement plus efficace, mais pour des raisons de coût et dans certains cas pour respecter les règles d'urbanisme et patrimoniales, on privilégiera l'isolation sous chevrons chaque fois que cela est possible.</i></p>

➤ Cas du climat de montagne

Paroi avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	Points de vigilance
<p>Rampant de comble aménagé.</p> <p>Cas où on ne peut pas isoler sous les chevrons : sarking</p>	<p>Choix de l'isolant et de la membrane selon préconisation du fabricant de l'isolant spécifique pour le sarking, en climat de montagne.</p> <div data-bbox="607 443 1568 805" data-label="Diagram"> <p style="text-align: center;">Intérieur</p> </div> <p>Attention en climat de montagne (altitude > 900m), certains fabricants préconisent une étanchéité sur chantelatte trapézoïdale plutôt qu'un simple pare-pluie.</p> <p>Les isolants non putrescibles comme le polyuréthane ou le polystyrène sont alors intéressants car imputrescibles (voir Avis techniques).</p> <p>Par ailleurs, ces Avis Techniques préconisent généralement un pare-vapeur d'un Sd d'environ 60m en climat de montagne.</p> <p>Variante possible</p> <p>Le cas d'un isolant existant entre chevrons n'est pas explicitement abordé dans les Avis techniques pour le climat de montagne. L'application de la règle des 1/4 – 3/4 semble a priori possible, mais nous recommandons d'en demander systématiquement la validation écrite du fournisseur.</p>	<p>Quelle que soit la position du freine-vapeur, étanchéité à l'air à soigner !</p> <p><i>NB : le sarking est souvent techniquement plus efficace, mais pour des raisons de coût et dans certains cas pour respecter les règles d'urbanisme et patrimoniales, on privilégiera l'isolation sous chevrons chaque fois que cela est possible.</i></p>
<p>Doc. de référence</p>	<p>DTA par exemple Rockciel de Rockwool / Documentation technique des fabricants, par exemple : Isonat Fiberwood Multisol et Duoprotect, Isover Luro, et Unilin Utherm</p>	

TOITURES	➤ Charpente isolée en rampant	➤ Isolation en sarking avec ossature (réhausse)
Paroi avant rénovation	Solutions d'isolation : bonnes pratiques	Points de vigilance
<p>Rampant de comble aménagé.</p> <p>Cas où on ne peut pas isoler sous les chevrons : sarking</p>	<p>Cas du climat de plaine :</p>  <p style="text-align: center;"><i>Intérieur</i></p> <p>Choix de l'isolant et de la membrane selon préconisation du fabricant de l'isolant pare-pluie.</p> <p>D'un point de vue économique, les isolants insufflés comme la ouate de cellulose sont actuellement les plus compétitifs sur ce procédé.</p> <p>La prise en compte de l'isolant existant entre chevrons n'est pas explicitement abordée dans les documents techniques des fabricants. Sur la base de [ProClima] on peut raisonnablement penser que si l'on ajoute le double de la résistance existante (règle des 1/3 – 2/3) il n'y a pas de problème en climat de plaine.</p> <p>Généralement, la membrane doit être un pare-vapeur de $S_d \geq 18m$ en plaine, mais sur la base de [ProClima] il semble qu'un freine-vapeur hygrovariable soit également possible.</p> <p>Variante possible</p>	<p>Quelle que soit la position du freine-vapeur, étanchéité à l'air à soigner !</p> <p>Attention, vérifier la compatibilité de l'isolant pare-pluie avec le climat de montagne (altitude > 900m) : cas non explicitement abordé à notre connaissance dans les documentations techniques.</p> <p>Prévoir un pare-vapeur selon préconisation du fabricant. Le cas échéant, faire valider par le fabricant la validité en présence d'un isolant existant entre chevrons (règle des 1/4 - 3/4 a priori).</p> <p><i>NB : le sarking est souvent techniquement plus efficace, mais pour des raisons de coût et dans certains cas pour respecter les règles d'urbanisme et patrimoniales, on privilégiera l'isolation sous chevrons chaque fois que cela est possible.</i></p>
Doc. de référence	Documentation technique des fabricants, par exemple : Isonat Fiberwood Multisol et Duoprotect, Homatherm UD-Q11 Protect, Pavatex Pavatherm-Plus... / CPT 3560 v2	

Annexe 1 : Références Bibliographiques commentées

a. Hygroba

Référence	[Hygroba]
Nom complet	HYGROBA – Etude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes
Auteurs	CETE de l'Est, ENSA de Toulouse, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, et Maisons Paysannes de France, pour la 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)
Année de publication	2013

Commentaire :

Les hypothèses de calcul d'Hygroba sont décrites brièvement dans le cahier 0, §3.4.

Pour l'étude des murs en pierre, l'étude est basée sur un calcaire dur (cf tableau p. 24 : $\mu=140$; $w_{80} = 3 \text{ kg/m}^3$; coefficient d'accroche $A=0$)

Certaines hypothèses sont très prudentes :

- *les apports en eau de 5 g/m^3 , correspondant à des pièces humides moyennement ventilées*
- *pour l'ITI, l'étude prend en compte des apports d'eau liquide entre l'isolant et le mur, basés sur un Q4 de $1,7 \text{ m}^3/\text{h}$ par m^2 de surface déperditive hors plancher bas sous Pa, ce qui correspond en maison individuelle à un n50 compris entre 4 et 7 vol/h, soit très nettement supérieur à ce qui est visé dans le cadre de rénovations complètes et performantes,*
- *pour l'ITE, les mêmes apports en eau liquide sont pris en compte « par défaut », sans justification précise, si ce n'est des possibles infiltrations d'eau de pluie ou des remontées capillaires. Cette hypothèse nous semble défavorable.*

Compte tenu de ces hypothèses défavorables, le rapport Hygroba permet d'affirmer sans prendre aucun risque que toutes les configurations jugées à « risque de condensation faible » le sont effectivement.

En revanche certaines configurations jugées « à risque » restent à évaluer plus finement dans le cadre des rénovations concernées par la présente étude.

b. LUD et HUN – Etudes de SolaresBauen

Référence	[LUD] et [HUN]
Nom complet	Ecorénover une maison traditionnelle 11 documents, dont notamment : <ul style="list-style-type: none">- LUDWIGSWINKEL - BÂTIMENT RÉNOVÉ - Étude WUFI- HUNSPACH - BÂTIMENT RÉNOVÉ - Étude WUFI
Auteurs	SolaresBauen, pour les régions Alsace et Lorraine, et le Parc Naturel régional des Vosges du Nord
Année de publication	2014

Commentaire :

Rapport d'étude WUFI de deux bâtiments, dont la finalité n'est pas de généraliser les résultats mais de comparer des scénarios de rénovation sur deux cas d'étude particuliers. Document très complet et bien documenté.

L'étude [LUD] du bâtiment à Ludwigswinkel concerne un mur en grès Obernkirchner, dont le facteur de diffusion de la vapeur est $\mu=32$ (dans la moyenne de la famille des grès).

L'étude [HUN] du bâtiment de Hunspach concerne un mur en pan de bois, remplissage torchis enduit à la chaux.

Tout en saluant la qualité de l'étude, nous avons choisi d'aller à l'encontre de certaines conclusions de ces rapports d'étude, en s'appuyant sur d'autres bibliographies et sur nos propres simulations (voir [annexe 2](#)). En effet, certaines hypothèses nous semblent très prudentes :

- Le modèle de Climat intérieur est une simple sinusoïde : des températures de 20 à 22°C (norme WTA), ce qui est faible pour l'été donc cela limite le séchage en été. L'hygrométrie relative évolue de 40 à 60% ;

Notre expérience montre qu'une simulation WUFI menée sur un climat intérieur réel mesuré, ou en utilisant la norme ASHRAE (voir exemple en page 52) permet un bien meilleur séchage en été qu'un scénario normatif. Les conclusions de ces études sont donc a priori défavorables.

- Les facteurs d'accroche de la pluie sur la façade ne sont pas explicités, or c'est clairement un paramètre essentiel pour la modélisation (l'étude le dit clairement). Selon les auteurs, les valeurs prises sont « des valeurs moyennes recommandées soit par les créateurs de WUFI, soit par des normes ». Le débord de toiture est jugé inefficace et n'est pas pris en compte pour les bâtiments étudiés.

Une étude de sensibilité sur les facteurs d'accroche de la pluie nous semble également nécessaire pour généraliser les conclusions de ces deux études de cas ponctuelles, ce qui a été fait dans l'étude [\[RAGE\]](#).

Dans la mesure où les hypothèses sont globalement prudentes, nous retenons les conclusions positives :

- Pour [LUD], pas de pathologie dans les solives encastrées dans le mur en grès jusqu'à 15cm d'ITI, à condition d'une continuité de l'isolant et d'une bonne étanchéité à l'air autour des solives (conclusion qui rejoint l'étude [\[RAGE\]](#) sur les solives encastrées).
- Pour les deux études, les freine-vapeurs hygrovariables présentent les meilleurs résultats en partie courante par rapport à des pare-vapeurs ou des freine-vapeurs traditionnels, ce qui rejoint une des conclusions d'[\[Isolin\]](#).

c. Isolin

Référence	[Isolin]
Nom complet	Programme de recherche ISOLIN : Isolationthermiqueparl'intérieurdesmursexistantsenbriquespleines
Auteurs	Université Catholique de Louvain - Architecture et climat / Service public de Wallonie
Année de publication	2013

Commentaire :

Etude très complète et bien documentée.

L'objet de l'étude est la création d'un outil. Le rapport ne présente donc pas les résultats détaillés sur des cas d'étude donnés. Les conclusions sont donc plutôt des bonnes pratiques que des conclusions fermes sur la validité ou non d'une solution donnée.

Nous retenons pour la présente étude les bonnes pratiques listées au 4.4.7, page 94 :

3. Pour une perméabilité moyenne équivalente, il est préférable de choisir une membrane à perméabilité variable qui donne de meilleurs résultats ;
9. L'application d'un hydrofuge de surface à l'extérieur améliore, parfois considérablement, le comportement des parois ;
10. Prés de 40 % des cas couverts d'une peinture étanche à l'extérieur entraînent des problèmes d'accumulation d'humidité dans la brique, si cette couche étanche ne peut être évitée, il faut s'assurer de la pérennité de son pouvoir d'étanchéité à l'eau et envisager une couche (isolant ou membrane) très peu perméable à la vapeur du côté intérieur ;
11. Une brique faiblement absorbante empêche une absorption trop importante des pluies battantes, mais cette qualité est malheureusement associée à un faible pouvoir de redistribution de l'humidité qu'elle contient vers les surfaces d'évaporation ce qui conduit à un mauvais potentiel de séchage ;
12. Une brique fortement absorbante est un atout considérable pour les parois exposées au nord (moins de pluie), car leur pouvoir de redistribution est élevé ce qui conduit à un bon potentiel de séchage. ;

d. RAGE

Référence	[RAGE]
Nom complet	Règles de l'art Grenelle Environnement 2012 <i>Evaluation des Risques de pathologies liées à l'humidité</i>
Auteurs	<i>Fraunhofer Institut IBP et Pouget Consultant en collaboration avec le CSTB,</i> <i>pour le Groupe de travail RAGE, comportant l'ADEME, l'AIMCC, l'AQC, la CAPEB, COPREC, le CSTB, EDF, EPL, la FFB, la FFSA, la FPI, CINOV, GDF Suez, le MEDDE, le METL, le Plan Bâtiment Durable ; SYNTEC, l'UNSFSA, l'UNTEC, et l'USH.</i>
Année de publication	2013

Commentaire :

Etude complète sur les sujets abordés, et citant de nombreuses références bibliographiques.

On note :

- *Le modèle de Climat intérieur : des températures de 20 à 25 °C*
- *les apports en eau de 5 g/m³, correspondant à des pièces humides moyennement ventilées pour l'hiver (tempéré par un modèle dégressif de 5 à 0 g/m³ pour une température extérieure de 0 à 20°C, selon EN13788)*

N'ayant jamais testé ce jeu d'hypothèse, nous ne pouvons pas conclure quant à son caractère pénalisant ou non par rapport à un climat intérieur mesuré.

- *Le modèle de mur en pierre est basé sur un « Calcaire tendre », dont les caractéristiques ne sont pas explicitées. On peut supposer qu'il est dans la fourchette de $\mu = 25$ à 40 selon l'acceptation courante du terme, donc représentatif du « groupe 1 » de pierres ;*
- *Le type de brique n'est pas précisé.*

NB : le rapport page 18 évoque une annexe où les caractéristiques seraient explicitées, mais nous n'avons pas pu avoir accès à cette annexe.

Nous retenons les conclusions suivantes :

- Pour les murs en brique en ITI, la pérennité du mur dépend essentiellement du coefficient d'absorption capillaire. Les cas simulés avec une bonne protection (facteur $A = 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$) ne présentent pas de pathologie même avec des épaisseurs d'isolant importantes ($R=5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$).
- Même conclusion pour un mur en calcaire pour $A = 0,2$ et pour $A = 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$.

Cette conclusion rejoint celles d'autres études, dont [Borsch Laaks 2012], qui semble établir un palier important entre $0,2$ et $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$, seuil en-dessous duquel l'ITI est possible même en forte épaisseur.

L'étude sous WUFI 2D des têtes de poutres indique l'absence de risque dans les mêmes hypothèses.

Ces conclusions sont renforcées par des mesures in-situ qui confirment l'absence de pathologie y compris au niveau des nez de solive.

- La conclusion propose la mise en œuvre d'une hydrofugation (jugée « durable ») pour atteindre la valeur seuil de $A = 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$.
- La mise en œuvre de freine-vapeur hygrovariable est jugée positive pour l'amélioration de la capacité de séchage qu'elle apporte.

Synthèse proposée par Enertech entre [ISOLIN], [RAGE] et [LUD] :

Pour atteindre le coefficient A visé par [RAGE], l'imperméabilisation sera souvent nécessaire sur les pierres tendres et les briques.

Par ailleurs, les tendances semblent indiquer que plus une brique ou une pierre est fermée à la migration de vapeur, plus elle est également fermée à l'absorption d'eau, comme semblent le dire les conclusions de [ISOLIN].

Il n'y a donc en fait pas de contradiction entre les trois études :

- Pour les pierres tendres et les briques (μ faible, mais valeur A élevée) : risque présent avec la pierre nue en l'état => **enduit à pierre vue ou hydrofuge nécessaire a priori pour protéger le mur de la pluie**. A cette condition, le mur ne présente pas de risque.
- Pour les pierres dures (fermées à la migration, mais valeur A faible) : pas besoin d'hydrofuge (valeur A de RAGE respectée a priori), mais le mur sera fortement pare-vapeur. Problématique proche d'un mur en béton, voire encore plus fermé à la migration de vapeur pour les pierres du groupe 3 : cas étudiés par Enertech sous WUFI 2D.
- [Notre étude sous WUFI 2D](#) ne montre pas de variation majeure du comportement des murs en pierre du groupe 3 en fonction de l'épaisseur ni de la nature des joints entre les pierres. La nature de la pierre semble prépondérante pour caractériser les solutions qui fonctionnent ou non.

e. Proclima – étude toiture

Référence	[ProClima]
Nom complet	Calcul du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment d'isolations thermiques dans les constructions en bois et en acier Frein-vapeurs hygrovariables pro clima dB+ et INTELLO avec hygrorégulation intelligente – toits, murs, plafonds –
Auteurs	Pro Clima
Année de publication	NC

Commentaire :

Etude menée avec WUFI, hypothèses bien explicitées.

On note :

- Les études ont été menées sur divers climats en France et en Suisse.
- Le climat intérieur est une simple sinusoïde entre 20 et environ 22°C (WTA).

Nous retenons les conclusions suivantes :

- Le freine-vapeur hygrovariable permet non seulement de protéger l'isolant en toiture mais aussi de maximiser son potentiel de séchage.
- Ces conclusions sont également valables en climat de montagne.

Référence	[ProClima]
Nom complet	Etude de rénovation Solutions d'étanchéité à l'air dans le cas de rénovations thermiques de toits Emplacement fonctionnel de l'étanchéité à l'air dans les constructions Pose en boucle (par au-dessus et par en-dessous) : comparaison du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment des freine-vapeurs à valeur Sd variable
Auteurs	Pro Clima
Année de publication	2016

On note :

- Le climat intérieur est modélisé selon WTA 6-2-01/D avec une charge d'humidité « normale » selon cette norme, soit la sinusoïde 20-22°C et 40-60% HR.
- Les configurations modélisées dans cette étude ne concernent que les cas de sarking.

Nous retenons les conclusions suivantes :

- Dans le cas d'une isolation sur les chevrons (sarking), et avec un traitement performant de l'étanchéité à l'air, il n'y a pas de pathologie avec un freine-vapeur à très bas Sd (Sd=0,02m type Dasaplano) sur chevrons, et une épaisseur équivalente entre chevrons et sur chevrons. Ceci permet de déroger à la règle de l'art des 1/3 – 2/3. Mieux encore, une proportion 1/3 au-dessus des chevrons et 2/3 entre chevrons fonctionne encore si le sarking est réalisé en isolant « sorbant » (fibre de bois ou ouate).
- L'idéal reste la pose « en boucle », avec dépose de l'isolant existant entre chevrons, avec un freine-vapeur hygrovariable (Sd de 0,05 à 2m type Dasatop) et isolant fibreux. Le potentiel de séchage des chevrons est grandement amélioré par le caractère hygrovariable du freine-vapeur.

f. LGCB & ENTPE – L'isolation du pisé

Référence	[Lettre LGCB-ENTPE Pisé]
Nom complet	L'isolation du pisé : pertinence et principe LGCB-ENTPE TransLettre d'août 2015
Auteurs	<i>PHILIPPE HEITZ : journaliste</i> <i>JEAN-CLAUDE MOREL, ANTONIN FABBRI, LUCILE SOUDANI,</i> <i>FLORIENT CHAMPIRÉ : LGCB-LTDS (ENTPE-CNRS)</i> <i>NICOLAS MEUNIER : entreprise de maçonnerie</i>
Année de publication	2015

NB : nous ne partageons pas les points de vue de ce document sur la (non) pertinence d'isoler les murs en pisé. Cependant nous nous rejoignons sur l'analyse qui est proposée concernant la migration de vapeur si le choix est fait d'isoler les murs.

Extraits (§ complet) :

Humidité et risque d'assécher le mur :

Page 4 "On l'a compris, la présence simultanée d'eau liquide et d'air dans les pores du pisé est une condition pour créer la force capillaire. La quantité d'eau nécessaire est très faible : la résistance à la compression R_c d'un échantillon de terre à pisé compactée ne diminue que pour une déshydratation complète à l'étuve à 200°C (CRATerre-ENSAG). **En conditions réelles, il y a toujours suffisamment d'eau dans le pisé.**"

Isolation en général : "A noter, qu'au vu du comportement du pisé décrit précédemment, les seules certitudes scientifiques conduisent à **contre-indiquer toute utilisation d'isolant étanche à la vapeur d'eau.**"

Pour l'ITE :

Page 11 : "En rénovation, l'isolation thermique par l'extérieur (ITE) présente l'avantage de faciliter le traitement des ponts thermiques et de conserver le mur en terre à l'intérieur du volume chaud, dynamisant ainsi sa capacité d'échange avec l'air intérieur. Le matériau isolant choisi doit avoir une résistance à la diffusion de la vapeur (valeur $S_d = \mu \times \text{épaisseur}$) inférieure à celle du pisé afin de conserver les possibilités de transfert à travers la paroi. Il conviendra de s'interroger sur la stabilité à l'eau d'un tel isolant (gonflement, moisissure,...), donc à sa pérennité dans le temps, à l'échelle de la durée de vie de la structure. Par exemple, l'architecte Jacky Jeannet (AbiTerre) propose une ossature bois supportant des panneaux de fibres de bois protégés par un pare-pluie et un bardage bois ventilé."

Pour l'ITI :

Page 11 : "Le mur isolé par l'intérieur ne bénéficie plus de la chaleur du logement, ce qui favorise la condensation dans le mur. Si celui-ci est bien protégé des remontées capillaires et infiltrations, et si sa surface extérieure est nue ou revêtue d'un enduit perméant à la vapeur (enduit ciment proscrit), si le pare-vapeur est sans discontinuité, le mur en terre ne devrait pas subir d'humidification excessive. Si une de ces conditions n'est pas remplie, il y a risque de pathologie accru par l'ITI."

g. Autre bibliographie (non commentée)

Pierres, imperméabilisation de façade

Guide « Altérations de la pierre », Philippe BROMBLET (CICRP, Marseille, France), Association MEDISTONE, 2010

Mémento sur les Altérations de la Pierre, Philippe BROMBLET, CICRP, PierreSud, Base de données sur les pierres du patrimoine historique et archéologique du sud de la France, 2010

Kevin Beck. Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité. Minéralogie. Université d'Orléans, 2006. Français.

VIEILLISSEMENT NATUREL EN MILIEU URBAIN DE PIERRES CALCAIRES HYDROFUGÉES : EVALUATION DE LA DURABILITE DES TRAITEMENTS ET DE LEUR IMPACT SUR LE NETTOYAGE, Claire MOREAU, Thèse de doctorat à l'UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE, 2008

ENDOMMAGEMENT PAR LE GEL DE PIERRES CALCAIRES UTILISEES DANS LE PATRIMOINE BATI : ETUDE DU COMPORTEMENT HYDROMECHANIQUE, Charlotte Walbert, THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE, 2015

A MOISTURE TRANSFER IN EXTERNAL WALLS WITH NATURAL STONE CLADDING GLUED DIRECTLY TO THERMAL INSULATION LAYER, ALEKSANDER BYRDY, Institute of Building Materials and Structures, Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology

Binder leaching from hydraulic lime mortars P.F.G. Banfill and A.M. Forster School of Energy, Geoscience, Infrastructure and Society, Heriot-Watt University, Edinburgh, 2015

Rain protection of Stucco façades, Hartwig M. Künzel, Ph.D., Member ASHRAE, Helmut Künzel, Ph.D., Andreas Holm, Ph.D, Associate Member ASRAE, ASHRAE, 2004

Enduits chaux :

Enduits à la chaux et réglementation, La nouvelle version du DTU 26.1, chap. 12, Luc Van Nieuwenhuyze, maçon formateur [Revue Maisons Paysannes de France](#), M. P. F. n ° 177, 2010

Influence d'une chaux magnésienne sur les propriétés d'un mortier, Comparaison avec d'autres types de chaux magnésiennes et calciques, Yahya Sebaibi, ingénieur TP, Editions universitaires européennes, 2016

Interactions mortier-support : éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier, Nicot Pierre, Thèse de Doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2008

Biosourcés, géosourcé

Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw, Jakub Wihan, 2007

Anh Dung Tran Le. Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment (sous titre: simulation numérique et approche expérimentale). Sciences de l'ingénieur. Université de Reims - Champagne Ardenne, 2010

Contribution à l'élaboration et la caractérisation d'un Ecomortier d'enduit à base de chaux et déchets de briques pour la réhabilitation du vieux bâti, Melle AYAT Amira. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université 20 Aout 1955-Skikda, Faculté de technologie, Département : Génie civil, 2015

DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES THERMIQUES ET HYDRIQUES DU PISE, SIMULATIONS NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE DE SON COMPORTEMENT FACE A LA MIGRATION D'HUMIDITE, Nadège FREY, Projet de Fin d'Études à l'INSA Strasbourg, 2011

Simulation de la migration d'humidité

Simulation des transferts de chaleur et d'humidité dans l'enveloppe de bâtiment, Hartwig M. Künzel, Andreas Holm (Fraunhofer Institut Bauphysik, Holzkirchen),

MODELLING THE EFFECT OF AIR LEAKAGE IN HYGROTHERMAL ENVELOPE SIMULATION, Hartwig M. Künzel, Dr.-Ing. is head of department of Hygrothermics, Fraunhofer Institute for Building Physics, Holzkirchen, Bavaria, Germany, 2 Daniel Zirkelbach, Dipl.-Ing. is deputy head of department of Hygrothermics, Fraunhofer-Institute for Building Physics, Holzkirchen, Bavaria, Germany, Beate Schafaczek, Dipl.-Ing. is scientist in the department of Hygrothermics, Fraunhofer-Institute for Building Physics, Holzkirchen, Bavaria, German

Influence d'un défaut d'étanchéité à l'air sur la teneur en eau de quatre types de murs traditionnels rénovés, Élodie Héberlé, Julien Borderon, Julien Burholzer (CEREMA – Direction Territoriale Est – Laboratoire de Strasbourg), Richard Cantin (ENTPE – Université de Lyon – LGCB, Vaulx en Velin)

Pipe de Karsten

WATER ABSORPTION TUBE TEST, RILEM II.4, AMT Laboratories, 2006

Annexe 2 : Simulations WUFI réalisées pour les besoins du présent rapport

a. Hypothèses communes des simulations dynamiques réalisées

Bases de données de matériaux de référence

Données générales

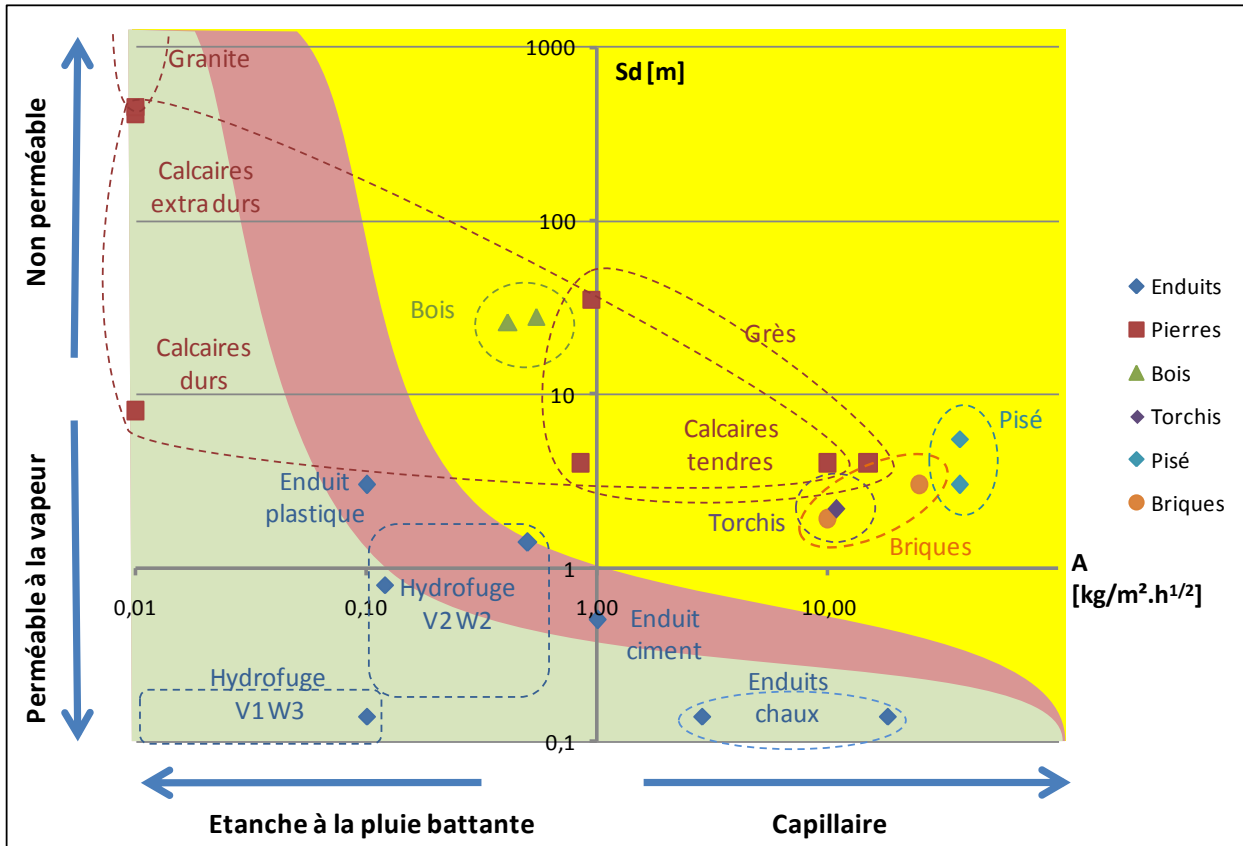
		μ -	Sd m	A kg/m ² .h ^{1/2}	w80 kg/m ³	Source
Enduits	Enduit chaux	7		18,00	30	WUFI
	Enduit chaux	7		2,82	30	[Hygroba]
	Enduit ciment	25		1,00	45	WUFI
	Enduit plastique		3	0,10	-	WUFI
	Hydrofuge Siloxane		0,8	0,12	-	PV essai Supersilox
	Hydrofuge V2 W2		1,4	0,50	-	norme EVWA
	Hydrofuge V1 W3		0,14	0,10	-	norme EVWA
Pierres	Grès moyen 1 (20cm)	20		15,00	0,1	WUFI
	Grès moyen 2 (20cm)	20		0,85	19	WUFI
	Grès Zeitzer (50cm)	70		0,95	8	WUFI
	Calcaire tendre	20		≈3 (cf §0)	NC	S. Courgey ⁴
	Calcaire dur	40		0,01	3	[Hygroba]
	Calcaire extra dur	813		≤0,2 (cf §0)		S. Courgey
	Granite	1400		NC	NC	Divers Internet
		4000		NC	NC	Divers Internet
Bois	Bois (Epicea radial)	130		0,41	80	WUFI
	Bois (chêne radial)	140		0,54	115	WUFI
Torchis	Torchis	11		10,80	18	[HUN] / [Hygroba]
	Torchis	11		2,8	18,8	WUFI 2D (TU Dresden)
Pisé	Pisé	6		37,20	20	[Hygroba]
	Pisé	11		NC	NC	Mesure CRITT
Briques	Brique ancienne	15		25,00	4,5	WUFI
	Brique manufacturée	9,5		10,00	1,8	WUFI
Isolants	Laine de bois	1,2		0,46	17,3	WUFI
		3		0,198	17	[Hygroba]
	Ouate	1,5		18,00	18	[Hygroba]
		1,5		18,00	13	WUFI
	Laine de verre	1,2		0,00	0,4	WUFI
		1,2		0,00	0,82	WUFI
	Laine de roche	1,2		0	0,14	WUFI
	Multipor	4,1		0,78	8,1	WUFI
	Dennert	2		1,02	1,16	WUFI
	PSE	20		0,00	0,2	WUFI
		50		0,00	0,2	WUFI

Données liées à la migration de vapeur de divers matériaux (sources diverses)

⁴ L'isolation thermique écologique, J.P. OLIVA et S. COURGEY, Editions Terre Vivante

Analyse de ces données du point de vue de la protection à la pluie battante :

Nous avons placé sur le graphique suivant différents familles de matériaux potentiellement exposés à la pluie : plusieurs types de pierres, des briques, des enduits, mais aussi les bois et torchis utilisés dans certains murs à pan de bois. Ces matériaux sont caractérisés par leur absorption d'eau liquide (A), qui traduit également leur capillarité sur l'axe horizontal et la résistance à la migration de vapeur (Sd) d'une épaisseur classique sur l'axe vertical :



Comparaison de différents matériaux de façade sur les deux critères de l'absorption de la pluie battante A en abscisse et la résistance à la migration de vapeur Sd pour une épaisseur classique en ordonnée.

Les épaisseurs prises en compte sont :

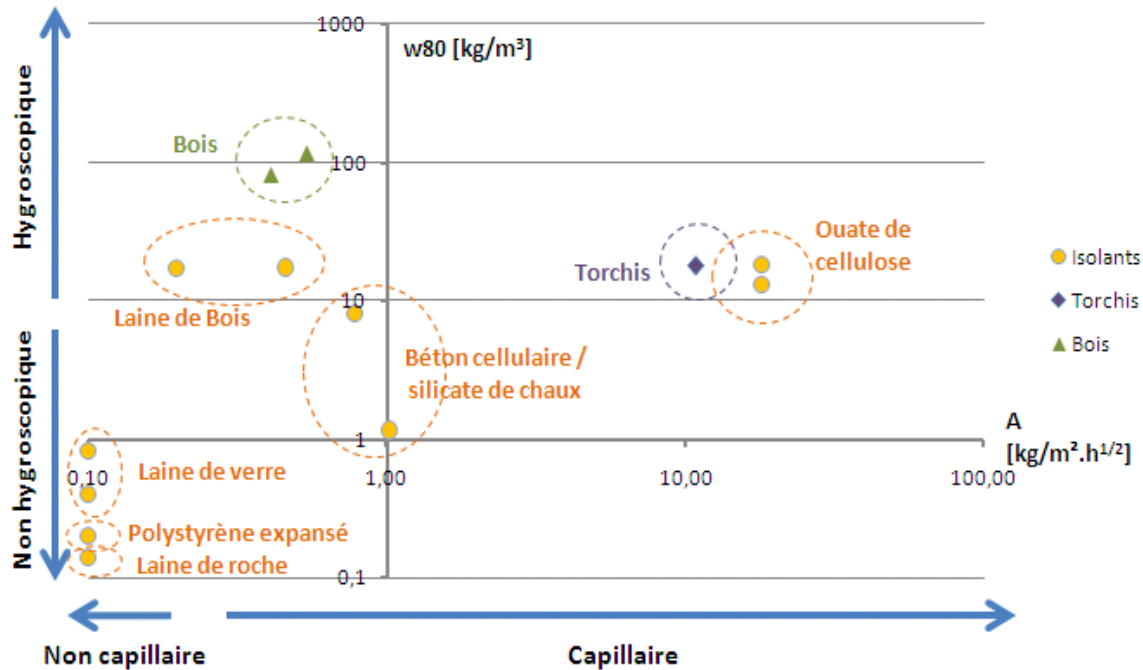
- 50cm pour le pisé
- De 20 à 50cm pour les pierres,
- 20 cm pour les bois, torchis, briques,
- 2 à 3 cm pour les enduits chaux et ciment, 3mm pour l'enduit « plastique »

Cette représentation permet d'identifier :

- Une zone « verte » de matériaux qui ne craignent pas la pluie battante (A faible) ou qui sèchent facilement (A élevé et Sd faible) : ces matériaux sont aptes à protéger le mur de la pluie battante ;
- Une zone « rouge » de matériaux qui protègent le mur de la pluie, mais ne lui permettent pas de sécher ni de gérer une humidité excessive : ces matériaux sont à retirer et remplacer par une protection située dans la zone verte ;
- Une zone « jaune » de matériaux qui absorbent une quantité d'eau liquide trop importante, qui les met en danger (humidité excessive, moisissure, voire gel). Ces matériaux sont à protéger avec un enduit ou hydrofuge situé dans la zone verte.

Analyse des isolants et matériaux capillaires et/ou hygroscopiques :

Sur le graphique suivant, nous avons représenté les isolants courants, et certains matériaux particulièrement hygroscopiques. L'axe horizontal présente le facteur A, qui caractérise la capillarité du matériau, et l'axe vertical indique le w80, c'est à dire la teneur en eau du matériau exposé à une humidité relative de 80% :

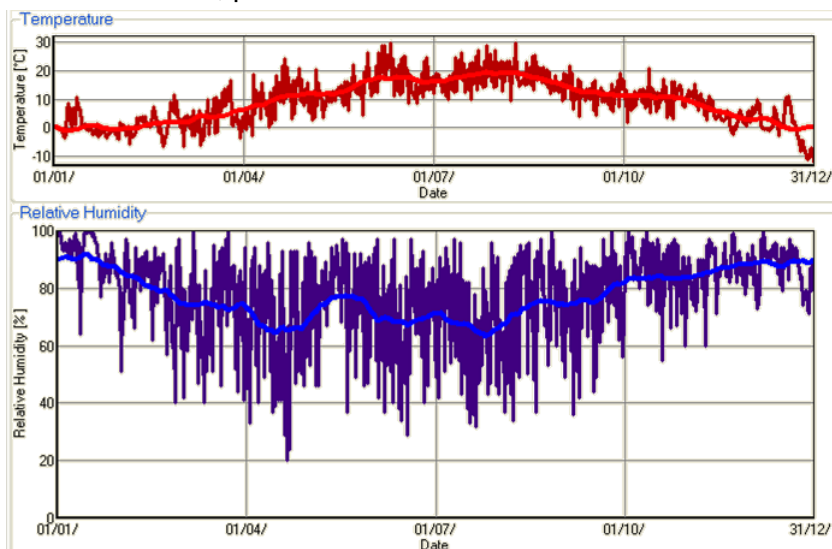


On voit que les isolants biosourcés, mais aussi le bois et le torchis sont à la fois capillaires et hygroscopiques. Les laines minérales et le polystyrène ne sont ni capillaires ni hygroscopiques. Le béton cellulaire ou silicate de chaux est capillaire, mais selon les produits plus ou moins hygroscopique.

Climats intérieur et extérieur utilisés

Climat extérieur

Climat de Nancy sur WUFI de 1996, puis Climat Météonorm 1991-2011



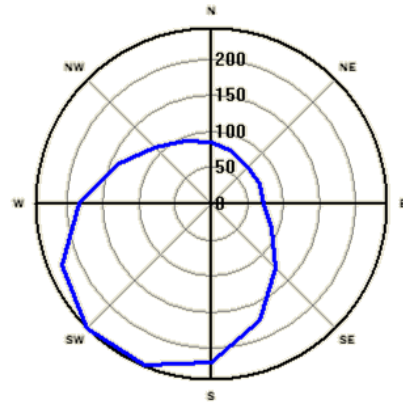
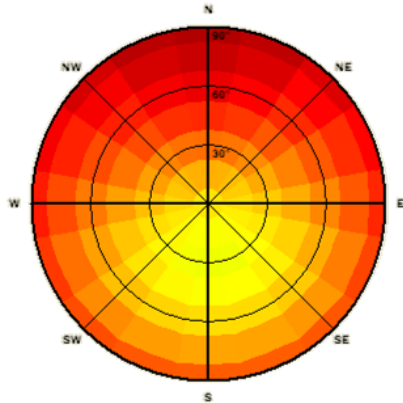
Température et Humidité du Climat de Nancy

Counter Radiation Sum [kWh/m²a]: 2782.1
Mean Cloud Index [-]: 0.70

Mean Wind Speed [m/s]: 2.90
Normal Rain Sum [mm/a]: 613

Sun Radiation Sum [kWh/m²a]

Driving Rain Sum [mm/a]

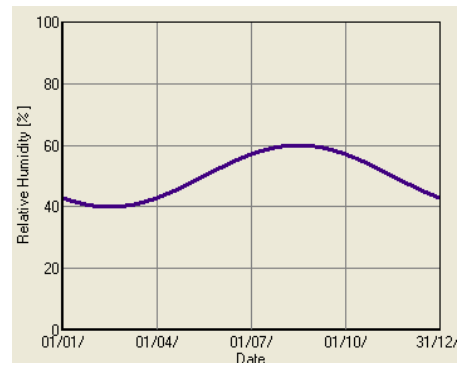
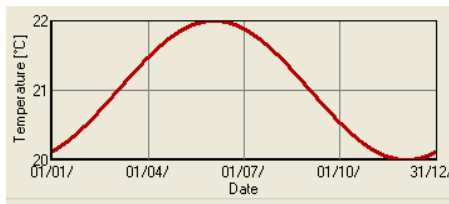


Radiation et Pluie selon l'orientation pour le climat de Nancy

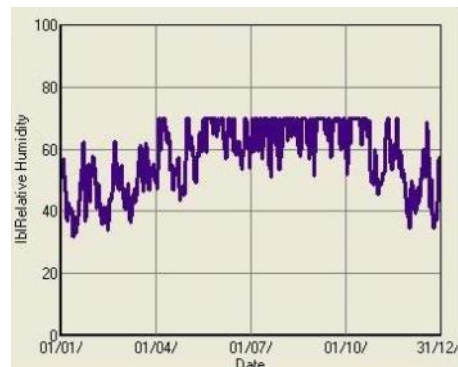
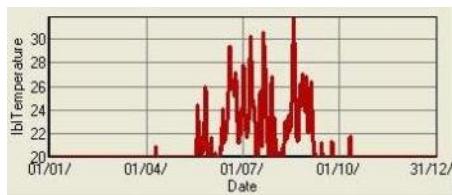
Climat intérieur

Nous avons testé dans les différentes simulations deux normes : la norme allemande WTA 6-2-01 /E et la norme américaine ASHRAE.

- Climat intérieur 1 : selon la norme allemande WTA 6-2-01 /E



- Climat intérieur 2 : simulé conformément à la norme ASHRAE 160 P



Ce climat est basé sur le climat extérieur, avec une consigne de chauffage à 20°C, un décalage de température qui génère les surchauffes en été, et une humidité intérieure calculée avec un apport d'humidité, le renouvellement d'air et le volume du bâtiment. Nous avons pris les hypothèses suivantes : logement de 70m², avec 1 chambre, et un taux de ventilation à 0,6 vol/h. Les valeurs de HR sont coupées à 70% (logiciel WUFI 2D).

Nous avons fait varier ces paramètres pour certaines simulations en test de résilience.

b. Simulation 2D de mur à pan de bois

Objet

L'isolation par l'intérieur d'un mur à pan de bois ne fait pas consensus dans la bibliographie. C'est pourquoi, suite à l'analyse de différentes études nous proposons en guise de synthèse une nouvelle série de calculs sur lesquels nous appuyons les détails de parois proposés en bonne pratique dans ce document.

Nous nous sommes intéressés à simuler dans un premier temps le mur existant sans isolation, pour voir si les hypothèses de simulations sont compatibles avec le comportement actuel du mur. Ensuite nous avons simulé l'isolation intérieure, puis nous nous sommes intéressés au cas des poutres encadrées dans un mur à pan de bois.

Nous résumons ici une partie du rapport de stage de Tristan Boissonneau. Lors de son stage à Enertech, il a effectué un travail de simulations hygrothermiques sur les murs anciens ayant subi une rénovation thermique performante. Une rénovation performante s'entend dans le cadre de notre étude, avec une résistance thermique minimale de 4,5 m².K/W.

Les simulations ont été effectuées avec WUFI 2D.

NB : les résultats présentés ici ne sont qu'une partie des simulations réalisées. Nous avons effectué de nombreux tests de résilience en faisant varier les climats intérieurs et extérieurs, les matériaux, le facteur d'accroche de la pluie, etc. afin de s'assurer de la robustesse des résultats présentés ici.

Hypothèses de modélisation

Données climatiques

- Climat extérieur : Climat de Nancy (WUFI)
- Climat intérieur : Pour l'étude principale, le climat selon la norme WTA 6-2-01 /E a été utilisé.

Données communes aux variantes étudiées

Avant de détailler les simulations, nous allons définir les matériaux utilisés dans les simulations de maisons à colombages. Pour ce qui est du bois, nous avons choisi du chêne radial. Le torchis n'étant pas présent dans la base de données WUFI, nous avons choisi un matériau ressemblant au maximum au torchis. Pour les isolants, nous avons voulu étudier la différence entre les laines minérales non hygroscopiques et des isolants biosourcés, tels que la ouate de cellulose. Nous avons aussi testé le Multipor, un béton cellulaire du fabricant Ytong, très intéressant pour la migration de vapeur d'eau. Les caractéristiques des matériaux permettant de les retrouver sous WUFI sont énoncées dans le tableau suivant :

Nom	Densité	λ (W/m.K)	μ	Porosité
Enduit Chaux	1600	0,7	7	30%
Enduit Ciment	2000	1,2	25	30%
Intello (à fort Sd)	115	2,4	Sd variable jusqu'à 26m	8,6%
Chêne (radial)	685	0,13	140	72%
Torchis (Mud plaster)	1514	0,59	11	42%
Laine Minérale (GR32)	32,5	0,032	1	95%
Cellulose	50	0,037	1,8	95%
Fibre de bois	53	0,039	1,35	96%
Béton Cellulaire	115	0,04	4,1	96%
Colle à Béton Cellulaire	833	0,155	15,1	68,6%

Liste des matériaux utilisés pour la simulation et leurs caractéristiques principales.

Le facteur d'absorption à la pluie battante de l'enduit chaux est $A = 3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$.

Variante 1 : Mur existant non isolé

Géométrie

Nous avons simulée une maison existante en pan de bois afin de voir la pérennité des murs dans ce cas-là sans isolation. On observe effectivement comme énoncé dans la partie précédente des problèmes dans le remplissage de certains miroirs de ces maisons, le torchis ayant souvent été endommagé au fil des années. On a donc décidé de simuler un coin d'une maison orientée Nord-Ouest et Nord-Est, avec des poutres de bois et du remplissage torchis, pour effectivement se poser la question d'une possible dégradation sans pose d'isolation :

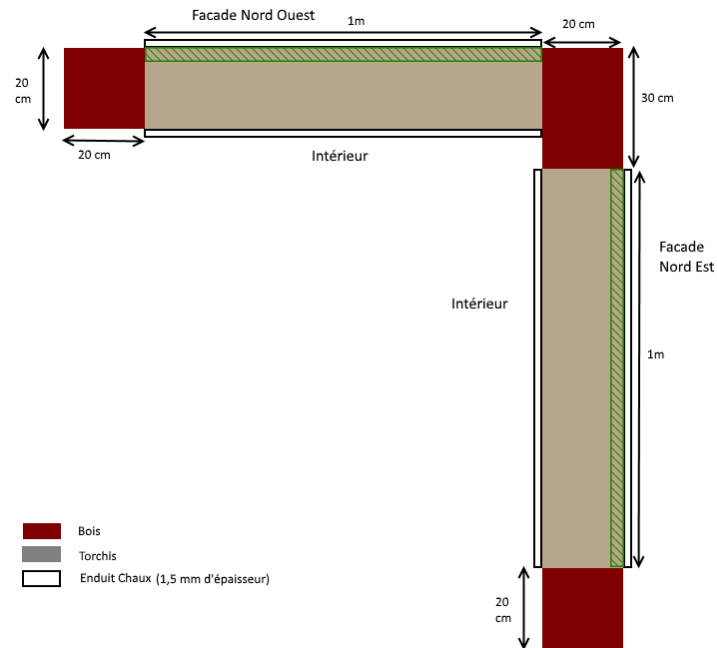


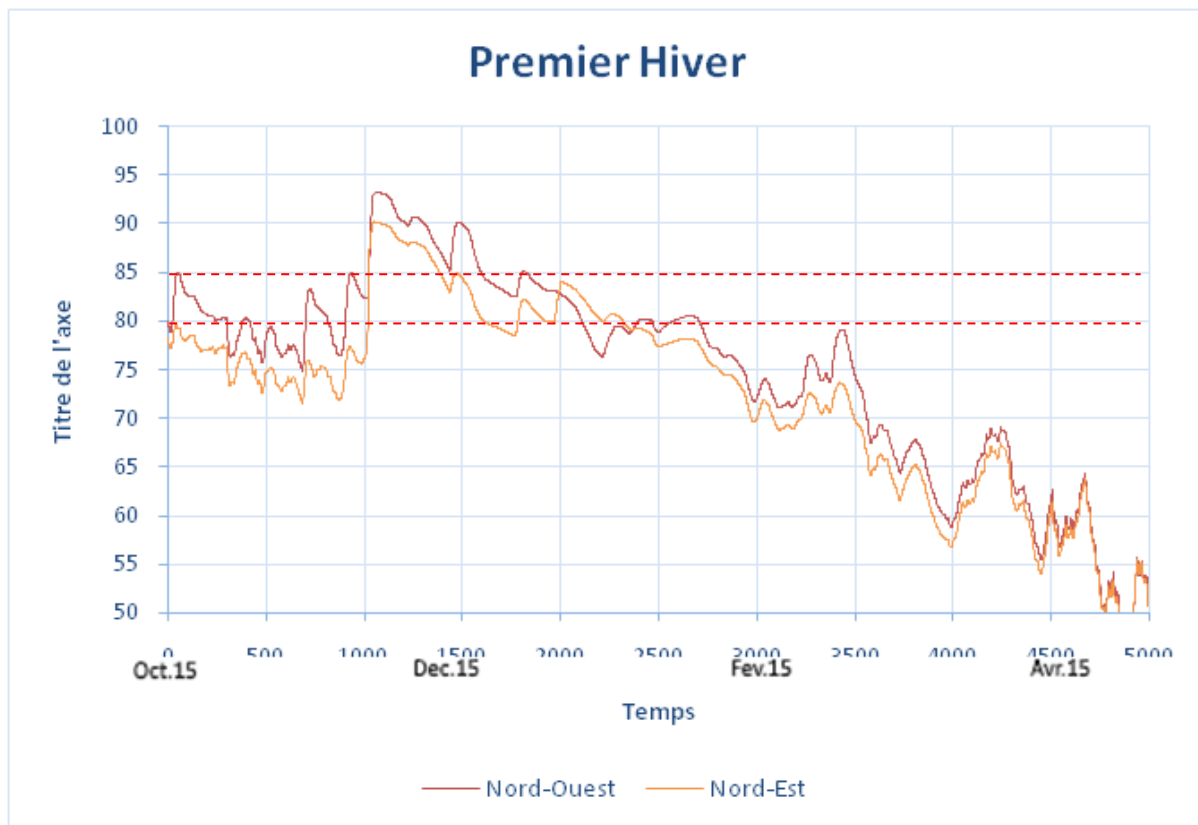
Schéma représentant la géométrie simulée sous WUFI 2D

Ce qui va nous intéresser dans cette simulation est représenté par les rectangles hachurés en vert, on va ainsi comparer l'humidité sur la surface extérieure du torchis sur les orientations Nord-Ouest et Nord Est. Le rayonnement est quasiment le même, mais la pluie battante est plus forte du côté Nord-Ouest.

Exposition à la pluie : Valeur par défaut de WUFI : 0,7 (mur vertical, absence de débord de toit)

Résultats sans ITI

La figure ci-dessous représente l'humidité relative dans les deux zones hachurées sur le croquis, lors du premier hiver, le but étant de voir l'impact de la pluie sur le torchis. On observe en effet que le torchis de la façade Nord-Ouest à une humidité relative plus élevée, sur une grande partie de l'hiver, et qu'à chaque pic de pluie, le pic est plus important pour la façade Nord-Ouest que la façade Nord-Est.



Humidité relative dans les premiers centimètres du torchis lors du premier hiver

Les valeurs sont très élevées et traduisent le fait que dans cette configuration le torchis non protégé par un enduit va être dégradé par la pluie.

NB : Ces valeurs sont pessimistes car ici la façade reçoit beaucoup de pluie ce qui n'est pas le cas dans la réalité. En effet le colombage possède souvent une protection à la pluie d'étage en étage avec l'encorbellement. De plus il existe souvent des débords de toits sur les maisons réduisant ici l'impact de la pluie. Il faut tout de même noter que sans protection à la pluie, le torchis de remplissage risque d'être dégradé au fil des années. **On gardera tout de même ces hypothèses pessimistes pour la suite** afin de nous placer dans le cas de simulation le plus délicate pour nos maisons : Orientation Nord-Ouest, Humidité initiale élevée.

Variante 2 : Mur isolé par l'intérieur

Nous avons voulu tester des isolants de différentes natures. Nous avons donc choisi afin de limiter les cas, une laine minérale non hygroscopique, une ouate de cellulose et un isolant à base de fibre de bois, isolant hygroscopique. Nous avons aussi fait le choix de les associer à un pare-vapeur hygrovariable à fort Sd car le chêne de l'ossature bois positionné en radial a une résistance à la vapeur d'eau élevée. Sans un pare-vapeur conséquent à l'intérieur, le risque de condensation d'hiver est important.

Géométrie

A la différence du cas d'étude sans ITI, nous avons pris en compte un enduit à la chaux protégeant les miroirs de la pluie battante (pour mémoire, le facteur d'absorption à la pluie battante de l'enduit Chaux prise en compte est $A = 3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$).

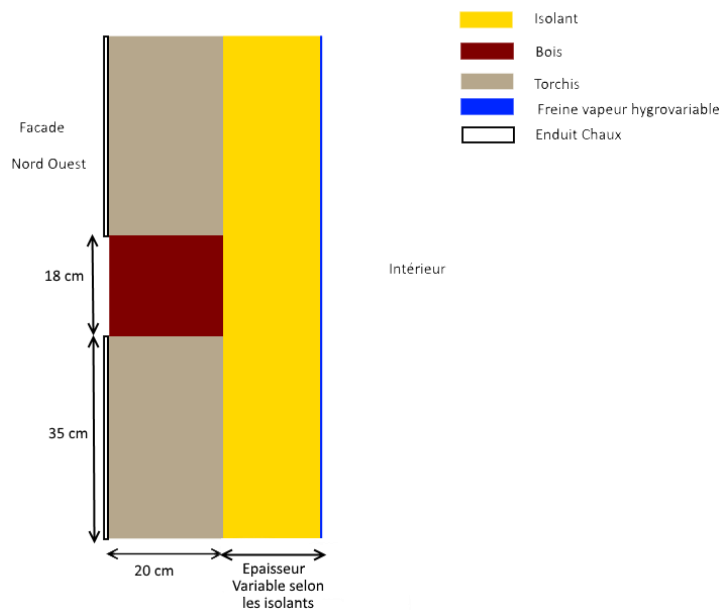
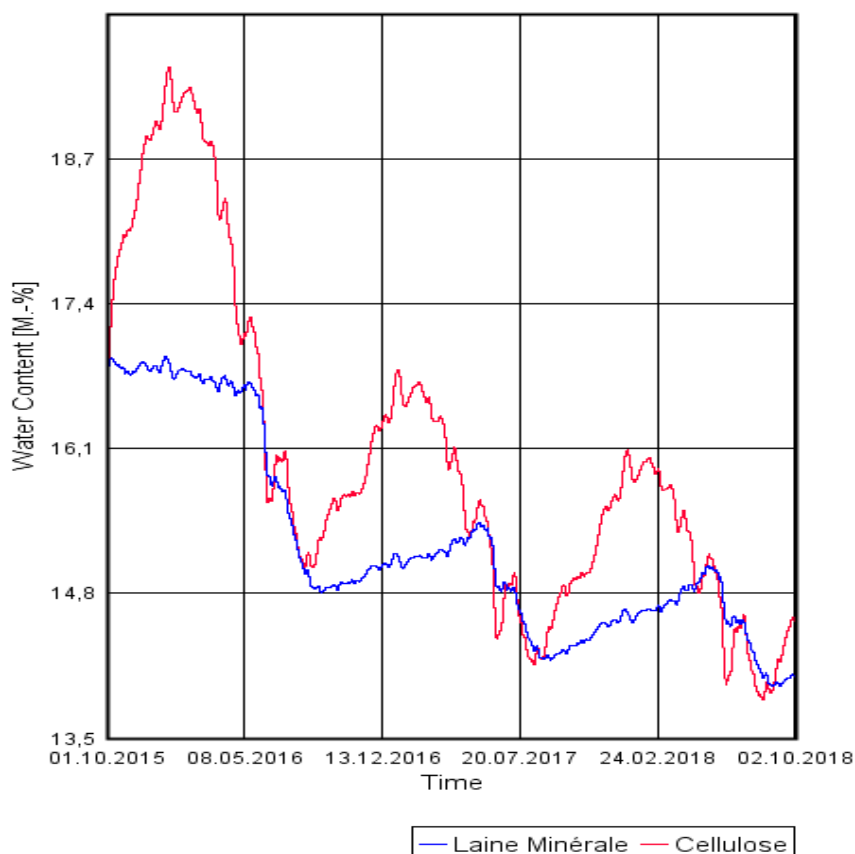


Schéma utilisé pour la simulation avec un isolant intérieur

Épaisseurs simulées : cas de base à 150 mm de laine GR32, soit $R=4,7 \text{ m}^2.K/W$. Des variantes d'épaisseurs inférieures ont également été testées (non présenté ici).

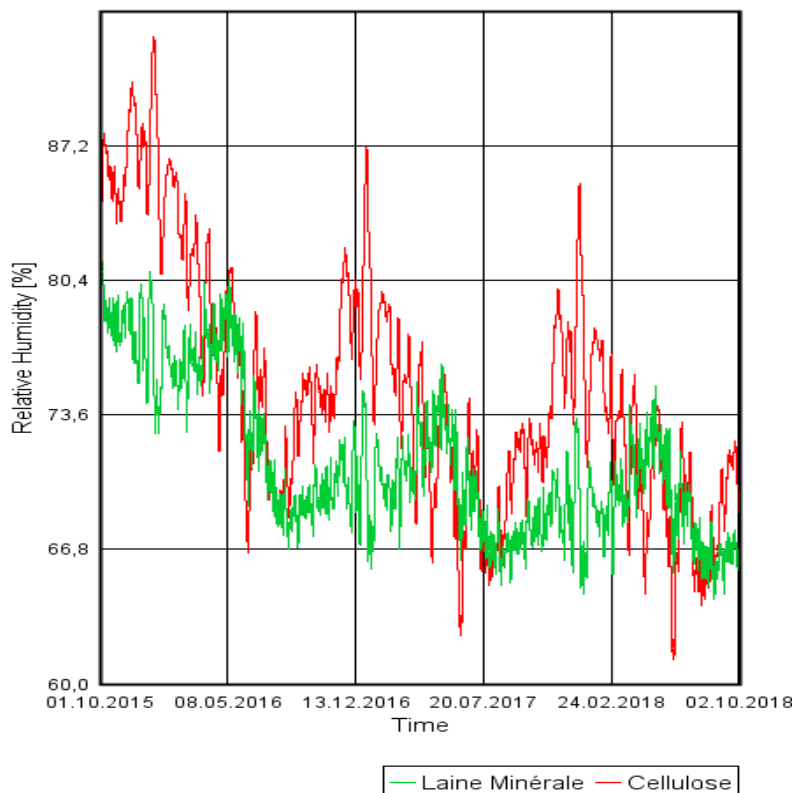
Résultats avec ITI laine de verre et ouate



Teneur en eau en pourcentage de masse sèche dans le bois à l'interface bois/isolant

La figure ci-dessus représente la teneur en eau en pourcentage de masse dans le bois à la jonction entre l'isolant et la poutre. **On observe donc que pour les deux isolants, la teneur en eau est inférieure à 20% de masse sèche (valeur seuil recommandée pour le bois).**

Néanmoins, on observe que la teneur en eau dans le bois est plus importante pour l'isolant hygroscopique que pour la laine minérale. La figure ci-dessous montre aussi que la cellulose a une humidité relative plus élevée en hiver que la laine minérale.



Humidité relative dans l'isolant à l'interface isolant/bois

On explique cela par le fait que les isolants hygroscopiques végétaux adsorbent plus d'eau que la laine minérale pour une même humidité relative (8 kilogrammes pour la cellulose contre 0,8 pour la laine de verre à 80% d'humidité relative).

De plus nous commençons à 80% d'humidité relative à l'état initial, ce qui est un cas qui peut se produire dans le cas de la projection humide de cellulose. Cela influe donc sur la simulation et la différence qu'on observe entre les deux isolants. La cellulose va donc stocker de l'eau à chaque fois que de la vapeur d'eau va la traverser, la laine minérale quant à elle réagissant peu. Le problème est que les isolants hygroscopiques n'arrivent pas à s'équilibrer en rejetant la vapeur d'eau, car vers l'intérieur le freine-vapeur hygrovariable est fermé en hiver, et du côté bois, le bois ayant des coefficients de redistribution très faible de manière radiale, il arrive à adsorber une partie de l'eau des isolants hygroscopiques, mais ne redistribue pas l'eau dans tout son volume.

On peut qualifier ce phénomène « **d'effet éponge** », qui ne se produit que si l'isolant hygroscopique est soumis à une accumulation d'humidité sur une paroi fermée à la diffusion de vapeur (ici localement fermée) à la migration de vapeur. La différence de comportement entre une fibre biosourcée et une laine minérale est que dès une humidité relative de 85%, il se produit dans les fibres creuses des biosourcés de la condensation capillaire, qui mobilise et stocke de l'eau sous forme liquide. Les fibres pleines des laines minérales ne provoquent pas ce phénomène, elles ne contiennent ainsi quasiment pas d'eau liquide condensée entre 85 et 95% d'humidité relative, ce qui leur permet de rester plus sèche.

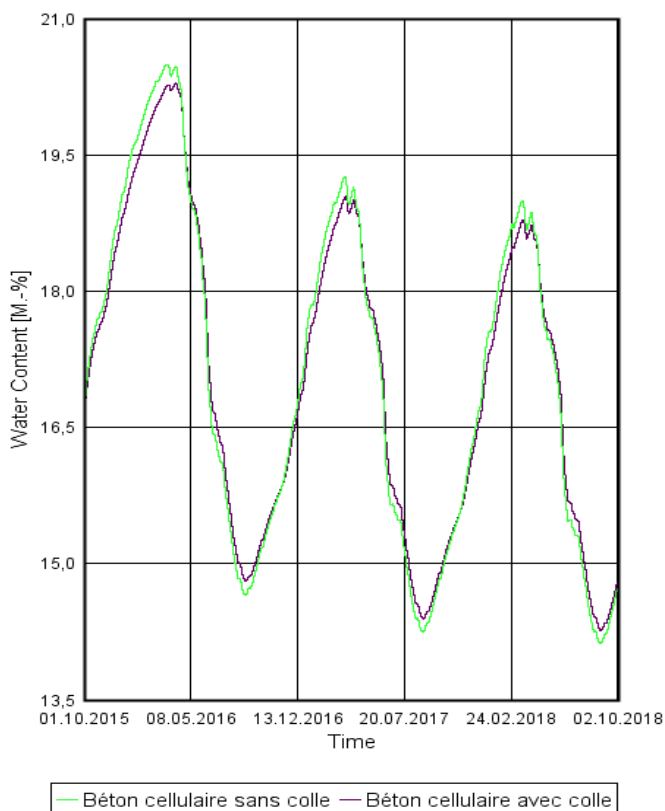
Les biosourcés ont ainsi un avantage : la redistribution capillaire qui les aide à sécher, et un inconvénient : la condensation capillaire qui stocke beaucoup d'eau quand l'humidité relative est élevée. Dans la présente simulation (ainsi que dans la simulation des [murs en pierre très fermés](#)), le caractère très fermé à la diffusion de vapeur du bois entraîne des humidités relatives élevées pendant des périodes longues, ce qui active la condensation capillaire. Résultat, avec la teneur en eau élevée que génère ce phénomène, l'isolant présente un risque de se dégrader et de dégrader l'ossature bois à son contact.

De plus les isolants hygroscopiques perdent une partie de leur capacité isolante avec l'humidité. Ainsi la cellulose par exemple, ne possède plus un λ de 0,038 mais 0,042 à 75% d'humidité relative.

On préfère donc choisir la solution laine minérale avec un freine-vapeur hygrovariable, qui a de plus le mérite de nécessiter une plus faible épaisseur pour la même résistance thermique.

Résultats avec ITI en béton cellulaire

Nous avons réalisé une simulation sur le même mur, avec cette fois-ci un béton cellulaire à la place de l'isolant. Ce béton cellulaire ($\lambda=0,04$ et $\mu=4,1$) possède de très bonnes qualités d'adsorption d'eau ainsi que de redistribution. Dans la théorie, le béton cellulaire va permettre de stocker de l'eau et de la redistribuer facilement vers l'intérieur lorsque nécessaire. Il n'y a donc pas de pare-vapeur côté intérieur pour permettre à ce béton cellulaire de redistribuer son eau adsorbée vers l'intérieur.



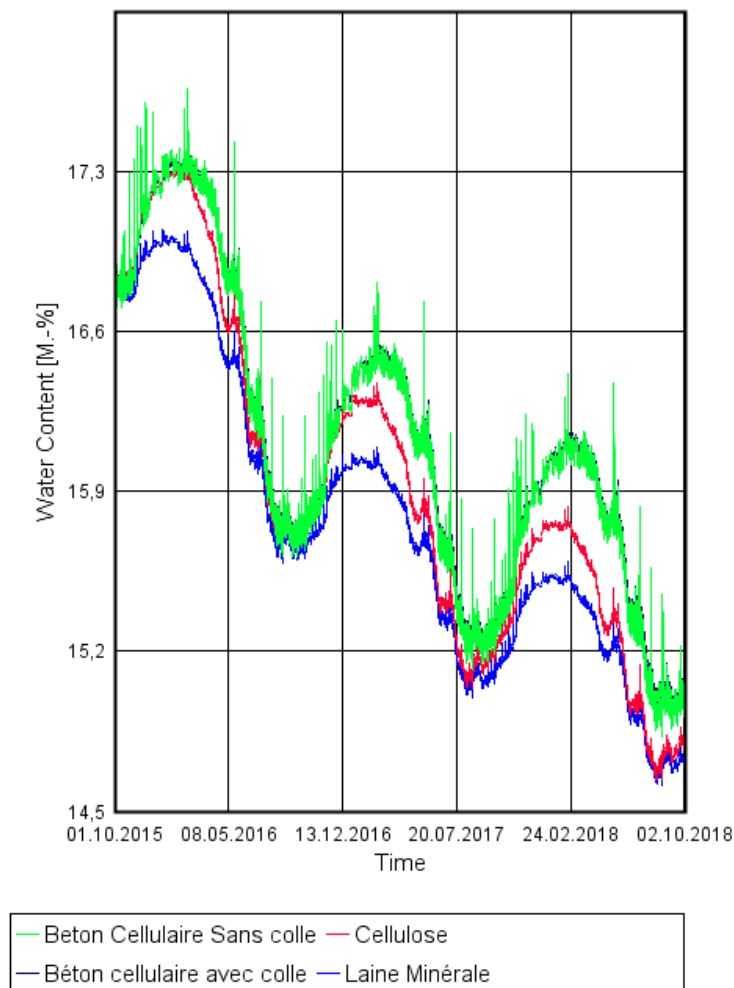
Teneur en eau en pourcentage de masse sèche dans le bois à l'interface avec l'isolant

On observe sur la figure ci-dessus que **la teneur en eau dans le bois est plus élevée** que pour la cellulose ou la laine minérale, **par contre, dès qu'il a besoin de sécher, la teneur en eau chute très vite**. Ainsi l'avantage de posséder une facilité de redistribution est problématique, car par l'absence de pare-vapeur, la pression de vapeur est donc plus élevée à la jonction avec le bois, ce qui entraîne une humidité relative élevée.

Ce qui est intéressant par contre, c'est que même si la teneur en eau dans le bois est supérieure à 20% de masse pendant quelques jours en hiver, **les moisissures dans le bois ne se développent qu'à température relativement haute (supérieures à 10°C)**. C'est pourquoi la propriété de redistribution que possède le béton cellulaire est intéressante, en effet lors des transitions hiver -> été (lors du changement de sens de migration de la vapeur d'eau), il se décharge très vite de son eau, ce qui empêche le développement de moisissures au printemps. Nous avons que peu d'informations sur les bétons cellulaires, qui sont de qualités variables selon les fabricants.

Résultats avec ITI – totalité de la poutre

Pour finir, on observe aussi la poutre dans sa totalité, afin de voir si la teneur en eau élevée est seulement superficielle ou si la teneur en eau de la poutre est élevée dans l'ensemble, ce qui peut dans ce cas entraîner des gros problèmes structurels.



Teneur en eau en pourcentage de masse sèche pour la totalité du bois.

On observe sur la figure ci-dessus que pour tous les isolants la poutre reste saine dans sa globalité. Il n'y a donc pas de problèmes structurels. Les seuls problèmes pouvant être dans un premier temps les moisissures superficielles sur la poutre, qui ont peu de chance d'apparaître, comme expliqué plus haut, une température haute étant nécessaire.

Néanmoins une dernière spécificité du bois nous pousse à plutôt recommander la laine minérale plutôt que le béton cellulaire, c'est plus la dilatation du bois avec la teneur en eau. Ainsi de trop fortes variations en eau peuvent entraîner un écart dans la structure entre l'hiver et l'été. Les variations d'eau les plus faibles étant pour la laine minérale, c'est donc la solution que nous recommandons prioritairement.

Variante 3 : Mur isolé par l'intérieur au niveau d'une poutre

Nous allons ensuite nous intéresser au cas d'une poutre encastrée dans un mur pan de bois, dont la géométrie est résumée à la figure suivante. Ce cas est intéressant pour deux raisons, la première il peut y avoir un éventuelle pont thermique, en effet la poutre n'étant pas protégée par l'isolant. On se demande aussi si la poutre n'étant pas protégée par un pare-vapeur, la vapeur n'aurait pas tendance à passer majoritairement par la poutre.

Géométrie

NB : on suppose ici une parfaite étanchéité à l'air entre le freine-vapeur et la poutre. Nous n'avons pas modélisé d'apport d'humidité ponctuelle liée à des infiltrations localisées (voir étude [\[RAGE\]](#)).

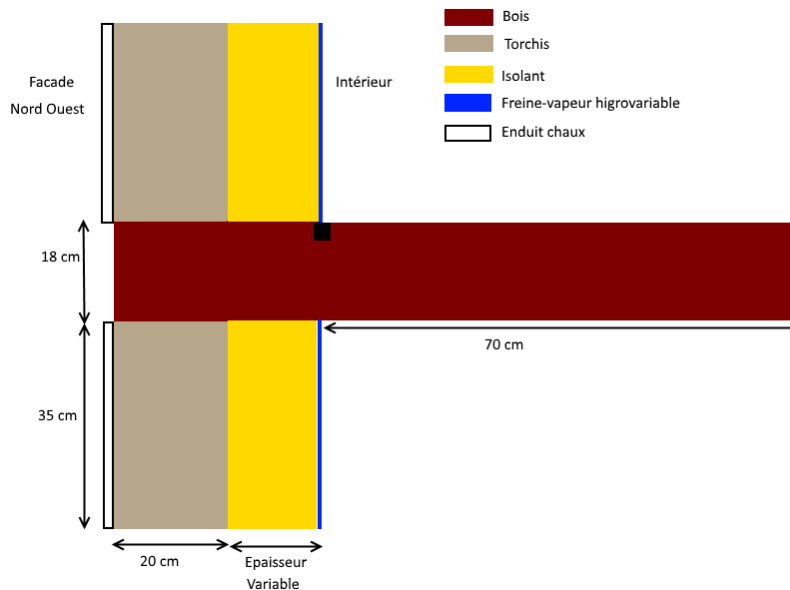
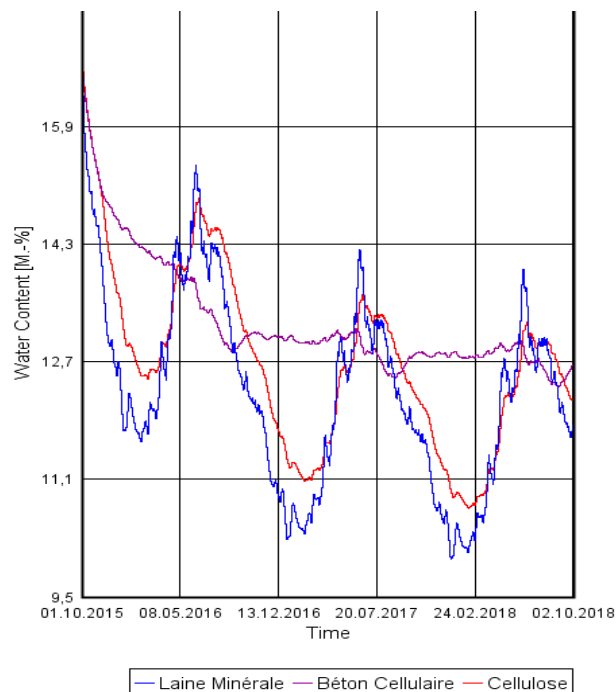


Schéma de la géométrie utilisée pour la simulation de poutre encastrée.

Résultats avec ITI au niveau d'une poutre

On étudie dans la figure ci-dessous que la teneur en eau en pourcentage de masse dans la poutre en bois :



Teneur en bois dans le bois de la poutre à la limite avec l'isolant

On observe donc des teneurs en eau qui diminuent très vite et qui restent très inférieures à 20%, ce qui indique l'absence de pathologie structurelle générale. Ceci s'explique par le fait que le bois est assez peu conducteur (par rapport à du béton...) et possède une bonne résistance à la vapeur d'eau (il est son propre freine-vapeur).

Sur ce point singulier, le béton cellulaire se comporte moins bien que les autres isolants, sans doute en raison de l'absence d'un freine-vapeur.

La laine minérale donne ici également les meilleurs résultats.

NB : le bois étant ici choisi comme radial, sa résistance à la vapeur d'eau est élevée.

Calcul de température de rosée au niveau des ponts thermiques

Afin d'évaluer le risque de pathologie de type moisissure à présent, il est intéressant de regarder la température au coin de la pièce intérieure (zone noir sur le schéma de la géométrie simulée). En effet la température dans ce coin est importante, c'est un pont thermique, car une partie de la structure n'est pas protégée par l'isolant. La température est donc plus froide ici.

Nous avons donc étudié cinq situations avec Conducteo / THERM et on peut donc observer les températures obtenues dans ces cas-là, lors des températures les plus sévères à l'extérieur (-11°C).

Configuration	Poutre encastrée / Mur pan de bois	Refend Pan de bois / Pan de bois	Poutre encastrée / Mur pierre	Refend Pierre / Pierre	Refend Pierre / Béton
Température du coin	14,5°C	13°C	14,5°C	9,5-10,5°C	10-11°C

Température au coin de la pièce pour différentes géométries

Les ponts thermiques sur pan de bois ne sont donc pas les plus générateurs de pathologie a priori par rapport aux murs en pierre ou en béton. En revanche ils sont beaucoup plus sensibles car une pathologie due à l'humidité peut avoir de graves conséquences structurelles !

Sachant que selon la température intérieure et l'humidité relative, la condensation arrive à des valeurs différentes de températures (obtenues grâce à un diagramme psychométrique) :

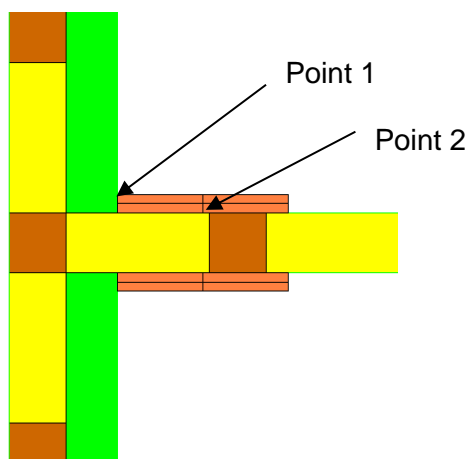
	Air à 19°C/ Humidité relative 70%	Air à 20°C/ Humidité relative 70%	Air à 21°C/ Humidité relative 70%
Température de rosée	13,5°C	14,4°C	15°C

Température de condensation pour différentes atmosphères intérieures

On voit ici que la condensation peut se produire au niveau des différents ponts thermiques du pan de bois pour une température et une humidité intérieure élevées.

Pour rehausser la température dans l'angle, et ainsi éviter la condensation, on va effectuer ce que l'on appelle une correction thermique, plus ou moins importante selon le différentiel de température à corriger.

Nous avons ainsi testé plusieurs corrections thermiques : 3 à 6 centimètres de chaux-chanvre (conductivité de 0,10 W/m.K), 6 cm de laine minérale (conductivité 0,040 W/m.K), sur une largeur de 30 à 60cm.



Géométrie utilisée pour le calcul des points froids avec correction thermique

On note alors le point le plus froid en contact avec l'air (le point 1 pour les corrections thermiques de 60cm et le point 2 pour les corrections thermiques de 30cm)

La synthèse des résultats est présentée dans le tableau suivant :

Sans correction thermique	13°C ($\Psi = 0,20 \text{ W/m.K}$)	
Avec correction thermique	Largeur 30 cm (point 2)	Largeur 60 cm (point 1)
Correction 1 : 3cm chaux chanvre ($R = 0,3$)	18°C ($\Psi = 0,18 \text{ W/m.K}$)	16,5°C ($\Psi = 0,17 \text{ W/m.K}$)
Correction 2 : 6cm chaux chanvre ($R = 0,6$)	17,5°C ($\Psi = 0,16 \text{ W/m.K}$)	17°C ($\Psi = 0,16 \text{ W/m.K}$)
Correction 2 : 6cm de laine minérale Th40 ($R = 1,5$)	16,5°C ($\Psi = 0,15 \text{ W/m.K}$)	17°C ($\Psi = 0,13 \text{ W/m.K}$)

Température de surface la plus faible, et déperdition du pont thermique (Ψ) pour différentes corrections thermique de la liaison refend pan de bois – mur à pan de bois.

Conclusion générale sur les murs à pan de bois

Les simulations réalisées montrent que pour une bonne ventilation du logement, et une protection classique à la pluie battante (simple débord de toit), on peut isoler par l'intérieur un mur à pan de bois avec un isolant de forte résistance ($R = 4,5 \text{ m}^2.\text{K/W}$) de préférence laine minérale et un freine-vapeur hygrovARIABLE à fort S_d .

Les isolants hygroscopiques semblent possibles, mais ils accumulent un peu plus d'humidité et nous semblent donc plus risqués. Par ailleurs pour atteindre la résistance de $4,5 \text{ m}^2.\text{K/W}$ une épaisseur plus importante est nécessaire par rapport à une laine de verre de conductivité $0,032 \text{ W/m.K}$, ce qui est problématique en ITI de maison de centre ancien.

L'isolation en béton cellulaire est également possible, mais en l'absence de freine-vapeur l'humidité est plus élevée, notamment au niveau des poutres encastrées dans le mur.

Il est important pour éviter des pathologies structurelles d'apporter une correction thermique sur les murs de refend. Toutes les variantes testées permettent d'éviter le point de rosée, mais afin de réduire en même temps le pont thermique au maximum il est recommandé une correction thermique de résistance environ $1 \text{ m}^2.\text{K/W}$ sur une largeur de 60cm.

c. Simulation 2D de mur en pierre très dure (« groupe 3 »)

Objet

L'isolation par l'intérieur d'un mur à base de pierres très fermées à la diffusion de vapeur est problématique. En effet, ce mur ne peut laisser passer ou très peu la vapeur d'eau. Cette vapeur d'eau va s'accumuler à l'interface mur /ITI. Il est intéressant d'étudier plus précisément ce cas en faisant varier type d'isolant, pare/freine-vapeur et d'en analyser les risques. Cette étude a déjà été réalisée, nous en résumerons les conclusions. Dans une seconde partie, nous étudierons des solutions susceptibles de limiter les risques liés au transfert de vapeur d'eau. Nous simulerons ainsi le comportement d'un ITI avec lame d'air ventilée entre le mur et l'isolant. Puis nous étudierons la solution béton cellulaire allégée Multipor collé directement sur ce mur.

Nous résumons ici une partie du rapport de stage de Tristan Boissonneau. Lors de son stage à Enertech, il a effectué un travail de simulations hygrothermiques sur les murs anciens ayant subi une rénovation thermique performante. Une rénovation performante s'entend dans le cadre de notre étude, avec une résistance thermique minimale de 4,5 m².K/W.

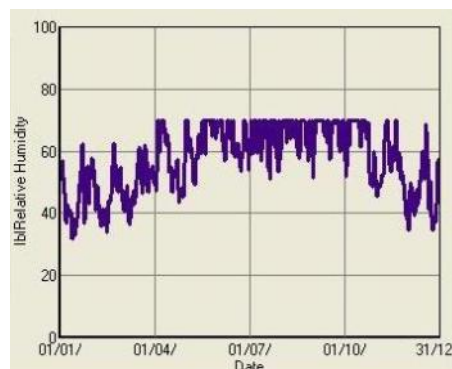
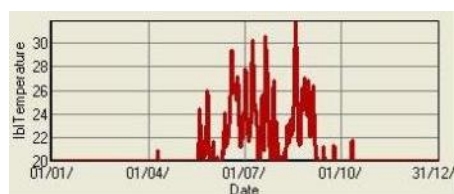
Les simulations ont été effectuées avec WUFI 2D afin de bien prendre en considération le joint de pierre notamment.

NB : les résultats présentés ici ne sont qu'une partie des simulations réalisées. Nous avons effectué de nombreux tests de résilience en faisant varier les climats intérieurs et extérieurs, les matériaux, le facteur d'accroche de la pluie, etc. afin de s'assurer de la robustesse des résultats présentés ici.

Hypothèses de modélisation

Données climatiques

- Climat extérieur : Climat de Nancy sur WUFI de 1996, puis Climat Météonorm 1991-2011
- Climat intérieur : Pour l'étude principale, le premier climat a été utilisé, puis pour les simulations complémentaires (paragraphe 3 et suivants), nous avons utilisés la norme ASHRAE
 - o Climat intérieur 1 : selon la norme allemande WTA 6-2-01 /E
 - o Climat intérieur 2 : simulé conformément à la norme ASHRAE 160 P



Ce climat est basé sur le climat extérieur, avec une consigne de chauffage à 20°C, un décalage de température qui génère les surchauffes en été, et une humidité intérieure calculée avec un apport d'humidité, le renouvellement d'air et le volume du bâtiment. Nous avons pris les hypothèses suivantes : logement de 70m², avec 1 chambre, et un taux de ventilation à 0,6 vol/h. Les valeurs de HR sont coupées à 70%.

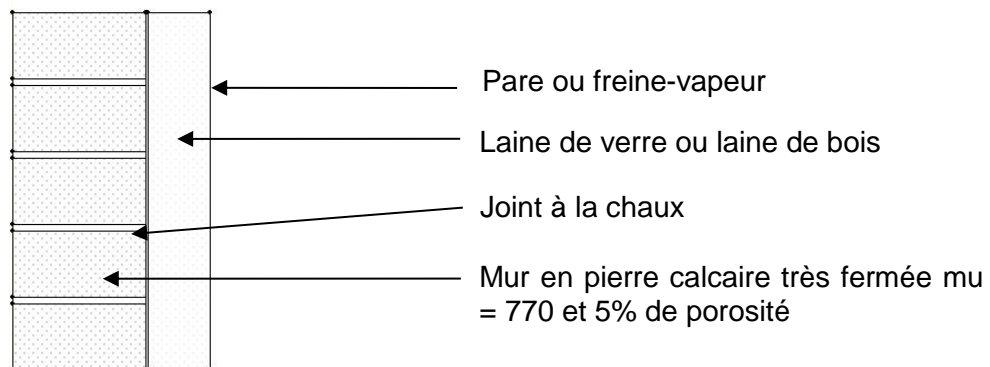
Configuration du mur étudié

Il s'agit d'un mur en pierre dur et très fermé, trouvée dans la base de données matériaux de WUFI : calcaire très dur avec un mu de 770 et 5% de porosité.

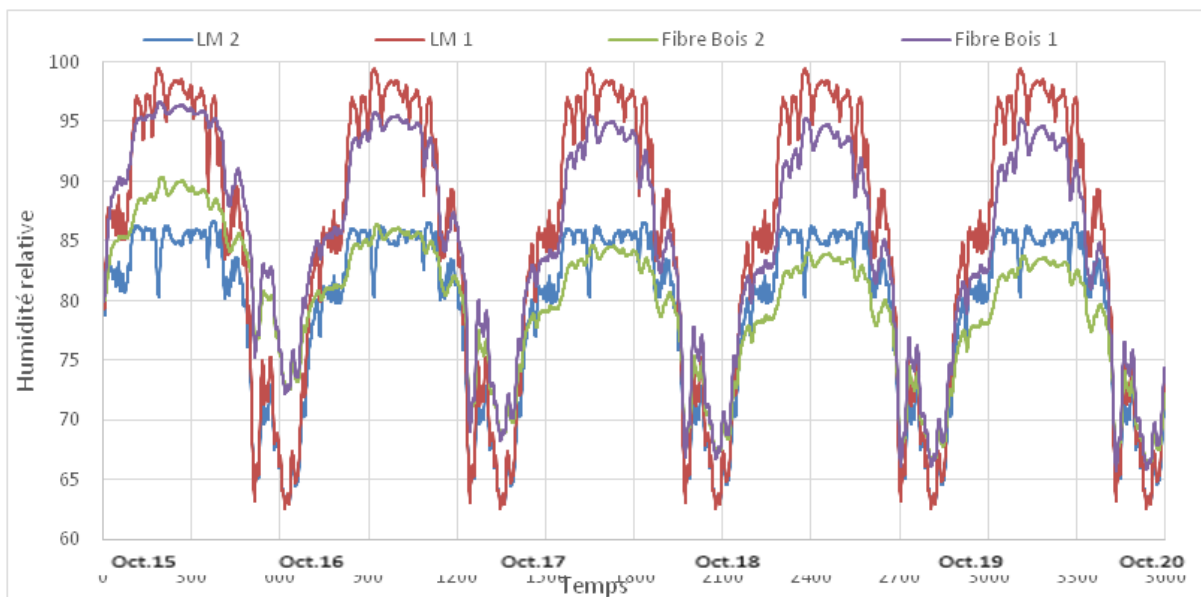
Constitution de la paroi, dans le tableau ci-dessous :

	Éléments de la paroi (de l'extérieur vers l'intérieur)	Épaisseur (mm)	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Facteur de résistance à la diffusion μ
1	Pierre fermée (400 mm x 200mm)	400	0.7	770
2	Enduit à la chaux (A = 3 kg/m ² h0.5) 20mm d'épaisseur entre les pierres	400	0.7	7
3	Laine de verre Isover GW Integra ZKF 032 / ou Laine de bois Pavaflex	150 / 180	0.032 / 0.039 R=4,5	1 / 1.35
4	Pare-vapeur / ou freine-vapeur hygrovariable de type Isover Vario XtraSafe	1	2.3 / 2.3	50000 / 40 à 27000

Exposition à la pluie : valeur par défaut de WUFI : facteur 0,7 (mur vertical, sans débord de toit)



Résultats pour une ITI classique



Humidité relative dans l'isolant laine de verre et laine de bois en 2 points (1 : interface isolant/mur, 2 : 1cm dans l'isolant/mur)

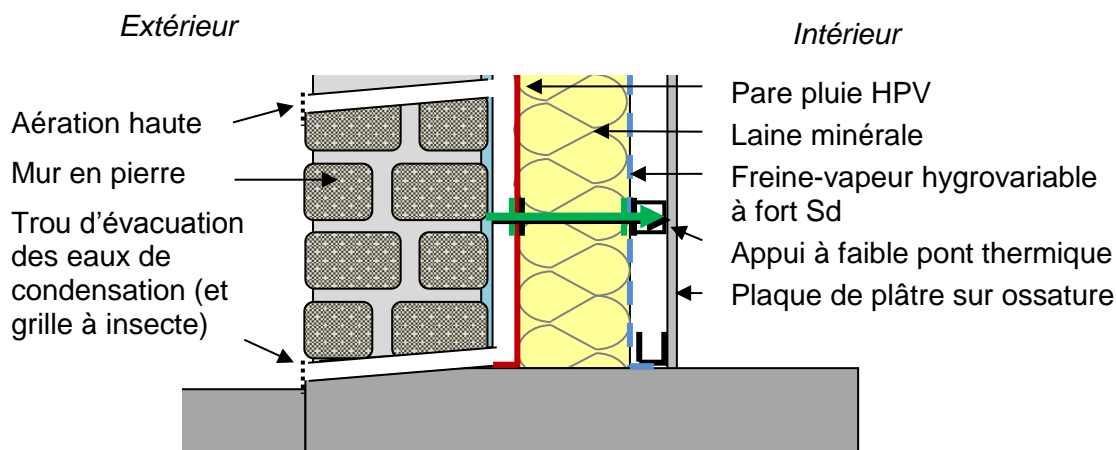
Les premières simulations d'un mur à base de pierres très fermées (calcaire dur avec $\mu = 770$) + ITI (LV ou fibre de bois) avec ou sans frein-vapeur ou PV, ont montré une problématique d'HR élevée >95% à l'interface isolant/mur et >85% sur les premiers centimètres d'isolant en contact avec le mur, et ceci sur une période assez longue (3 à 4 mois). Le freine-vapeur hygrovariable améliorant quelque peu la situation mais à la marge, le séchage par la surface intérieur ne suffisant pas à faire diminuer cette humidité relative sous la barre des 85%.

Ces simulations nous ont amené à envisager une solution avec lame d'air ventilée et cunette de récupération des condensats.

Solution ITI avec lame d'air ventilée

Description de cette solution

Il s'agit de créer une lame d'air ventilée entre l'isolant et le mur afin d'évacuer l'humidité excessive mise en évidence précédemment :



Cette solution n'est pas un procédé traditionnel, ni sous avis technique, mais elle se rapproche des double-murs cités dans le DTU 20.1 Partie P1-1 exemple de la figure 51

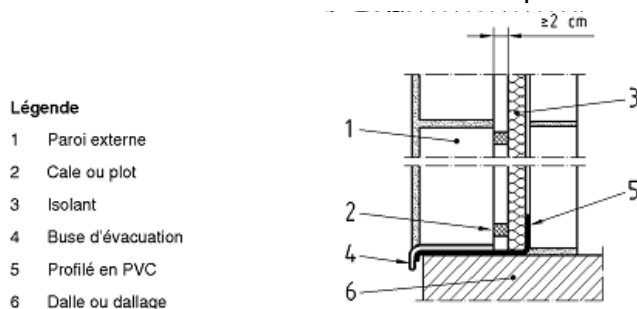


Figure 51 Paroi extérieure en maçonnerie enduite

Ces panneaux doivent être posés de façon à ménager, entre leur face externe et la face interne de la paroi extérieure, une lame d'air d'au moins 2 cm, à l'aide de cales ou plots imputrescibles, ou toutes autres solutions satisfaisant cette disposition (le cas de la Figure 50 b) n'est pas admis).

Il est particulièrement important d'éviter les balèvres de mortier du côté de la lame d'air des murs du type IIb ou III (NF DTU 20.1 P3 — Guide pour le choix des murs) car ces balèvres risquent de conduire l'eau vers l'intérieur.

Cette solution fonctionne, c'est même une solution préconisée par le DTU pour un climat très humide type bord de mer et des murs de pierre très fermée.

Cependant elle n'est pas simple à mettre en œuvre. La lame d'air doit être ventilée, par le biais de trous effectués dans le mur en partie haute et basse. D'autre part, l'eau susceptible de se condenser doit pouvoir être évacuée en pieds, via des cunettes ...

C'est donc un procédé complexe et coûteux.

C'est pourquoi nous avons envisagé une autre solution, l'enduit de redistribution.

Résultats pour une ITI avec enduit de « redistribution »

Description de cette solution

Nous étudierons ici le fait d'interposer entre l'isolant et le mur, un enduit que nous appellerons de « redistribution » qui aura deux rôles : accumuler de l'eau liquide au niveau du mur où se produit

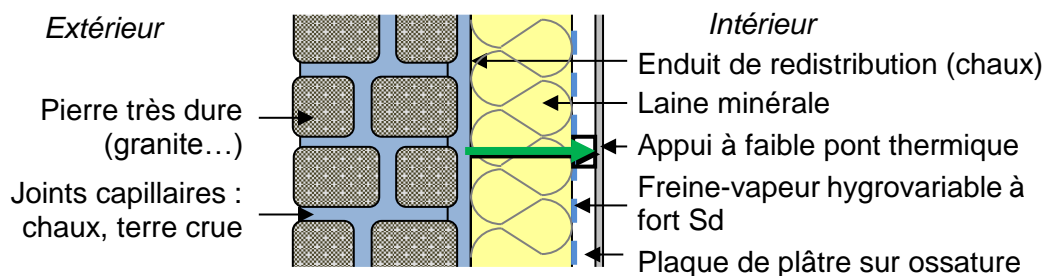
de la condensation superficielle, et redistribuer cette eau via les joints essentiellement et coté isolant essentiellement l'été.

Nous choisissons des enduits à la chaux et un enduit à la terre (argile) qui ont de bonnes capacités d'accumulation et de redistribution.

	Éléments de la paroi (de l'extérieur vers l'intérieur)	Épaisseur (mm)	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Facteur de résistance à la diffusion μ
1	Pierre fermée (400 mm x 200mm)	400	0.7	770
2	Enduit à la chaux (A = 3 kg/m ² h ^{0.5}) 20mm d'épaisseur entre les pierres	400	0.7	7
3	Enduit de redistribution : enduit à la chaux ou à l'argile de 30mm d'épaisseur	30	0.7	7
4	Laine de bois Pavaflex ou Laine de verre GW Integra ZKF 32	180 / 145	0.039/0.032 R=4,5	1 / 1
5	Freine-vapeur hygrovariable de type Isover Vario XtraSafe	1	2.3	40 à 27000

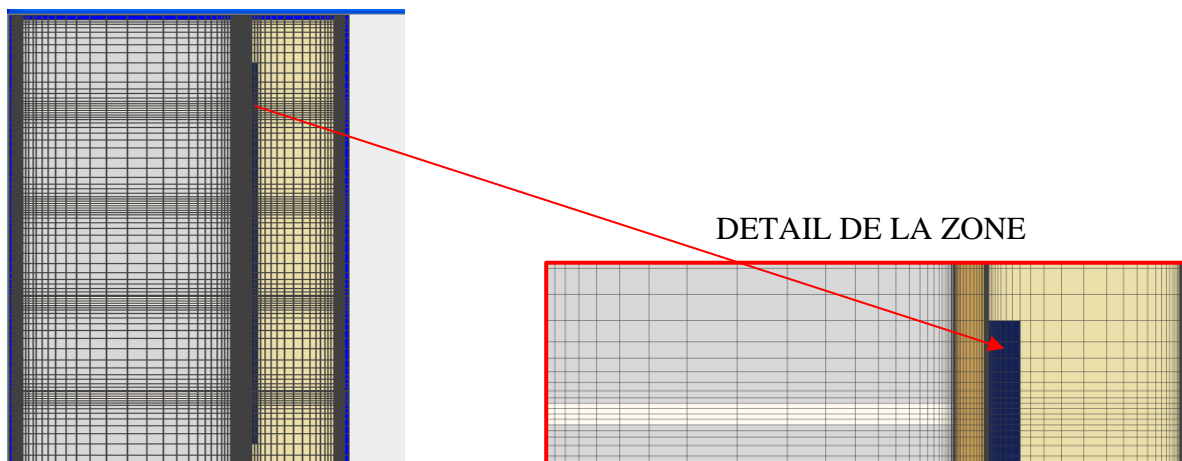
Exposition à la pluie : facteur 0,7

Schéma :



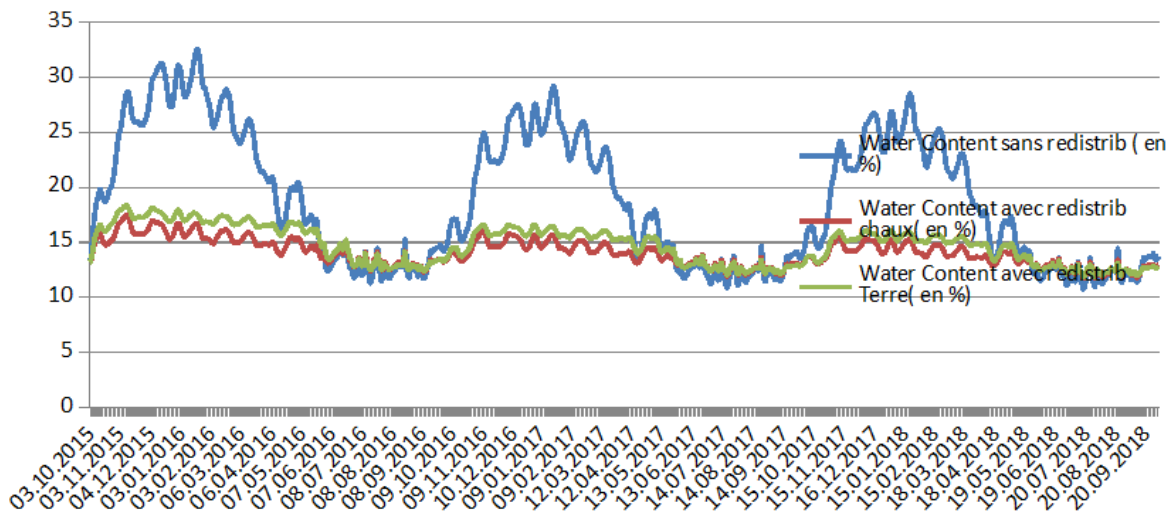
Résultats

Nous visualisons ce qu'il se passe dans les 3 premiers centimètres de l'isolant en contact avec cet enduit, sur une durée de simulation de 3 ans.



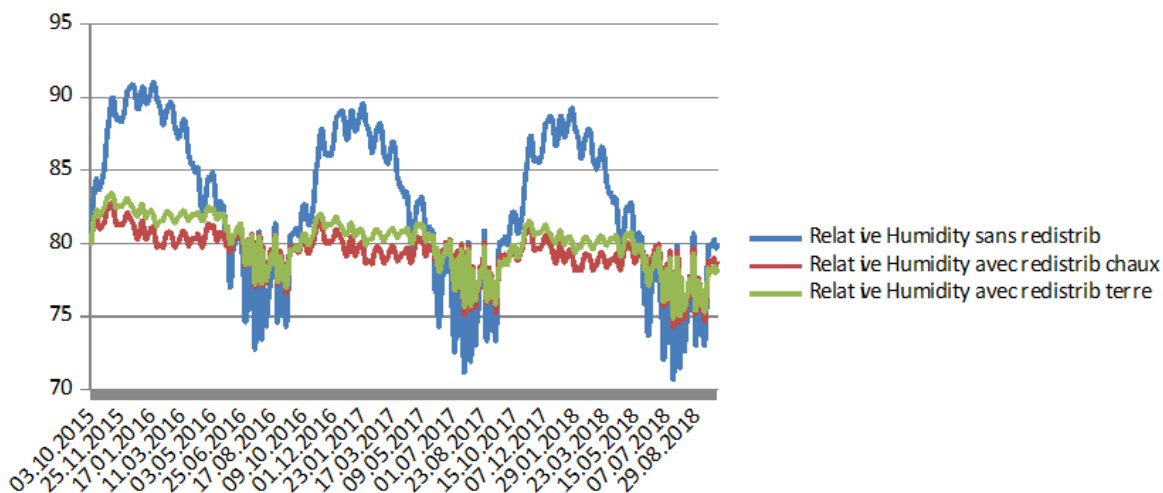
Nous comparons les résultats pour ce mur avec deux types d'enduit de redistribution avec un mur sans enduit de redistribution et pour deux types d'isolant : un isolant fibre de bois et un isolant laine de verre.

Résultats pour un mur avec Isolant laine de bois avec deux types d'enduit de redistribution



Graphes : Pourcentage d'eau contenu dans les 3 premiers centimètres d'isolant en fonction du temps pour un mur sans enduit de redistribution et un mur avec enduit de redistribution à base de chaux et un mur avec enduit à base de terre

Nous constatons l'effet des enduits de redistribution, ces derniers permettent de diminuer de 15% l'eau contenue dans les 3 premiers centimètres d'isolant dans les périodes de octobre à avril. Le comportement des deux enduits est similaire ; léger avantage à l'enduit chaux pour son « efficacité ». Qu'en est-il de l'humidité relative dans cette zone ?



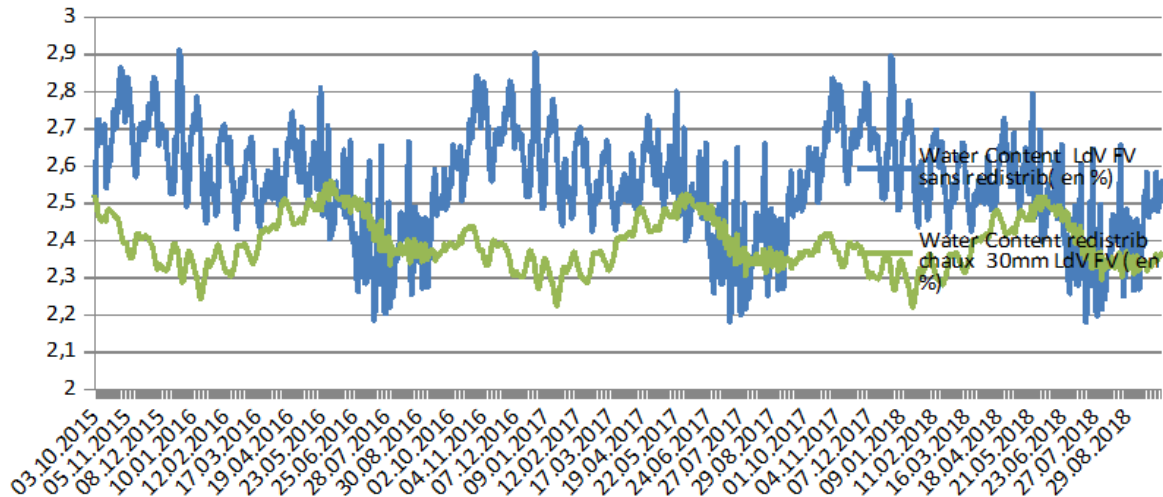
Humidité relative dans les 3 premiers centimètres d'isolant en fonction du temps pour un mur sans enduit de redistribution et un mur avec enduit de redistribution à base de chaux et un mur avec enduit à base de terre

De même l'humidité relative diminue dans les périodes critiques (de mi octobre à mi mars) passant d'une humidité relative comprise entre 85% à 92% dans les premiers centimètres d'isolant laine de bois en contact avec le mur à une humidité relative d'environ 80% ou moins au bout de 3ans avec un enduit de redistribution.

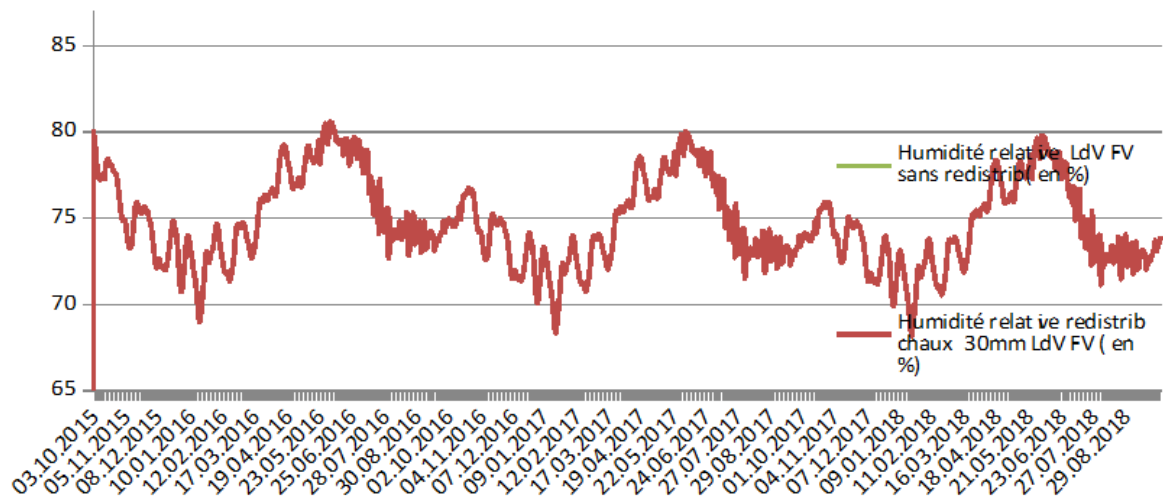
Ces simulations démontrent bien l'efficacité de l'enduit de redistribution avec une laine de bois.

Résultats pour un mur avec isolant laine de verre avec et sans enduit de redistribution à la chaux

On cherche ici à tester si la laine de verre donne également des résultats satisfaisants :



Pourcentage d'eau contenu dans les 3 premiers centimètres d'isolant laine de verre en fonction du temps pour un mur avec et sans enduit de redistribution à base de chaux



Humidité relative dans les 3 premiers centimètres de l'isolant laine de verre en fonction du temps pour un mur avec et sans enduit de redistribution à base de chaux

Les graphiques ci-dessus parlent d'eux-mêmes quant à l'intérêt d'un tel enduit de redistribution. La capacité d'absorption d'eau liquide de ces enduits puis de redistribution, permet de limiter les quantités d'eau contenues sur les premiers centimètres de l'isolant en contact avec le mur. Ceci permet de dire qu'un tel enduit de redistribution va permettre de rendre plus pérenne l'isolant dans le temps dans le cadre d'une isolation par l'intérieur sur un mur en pierre fermée.

Enduit terre ou enduit à la chaux se comportent de façon similaire. On aura tendance à préconiser l'enduit à la chaux pour son efficacité un peu plus importante et surtout son aspect structurant et sa moins grande sensibilité à l'eau.

Au niveau de l'isolant, la laine de bois et la laine de verre donnent des résultats comparables toutes choses égales par ailleurs. La laine de verre semble se comporter mieux, car le nombre de jours à 80% d'HR est plus faible, ce qui traduit a priori l'absence d'effet « éponge ». Ainsi une laine minérale rigide nous semble a priori un peu plus pérenne qu'une laine de bois.

ITI isolant de type béton cellulaire collée

Il s'agit d'une alternative aux solutions décrites ci-dessus, qui se rapproche de la solution ITI avec enduit de redistribution. En effet, l'isolant ici va être en contact continu avec le mur. Cet isolant

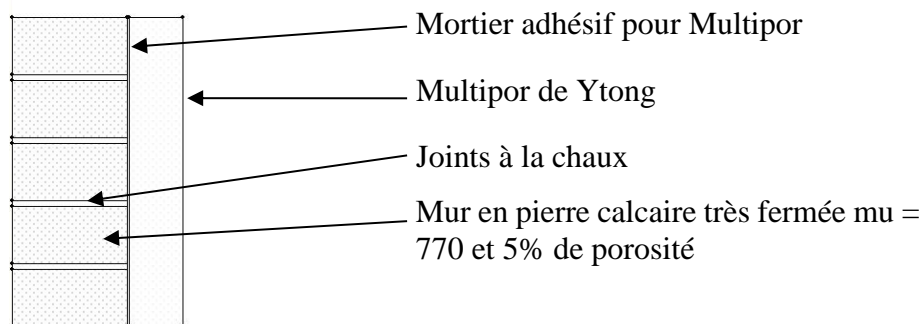
est très poreux et ouvert à la diffusion de vapeur, il a de bonnes propriétés de redistribution. C'est un matériau capillaire mais non hygroscopique (sa perméance ne varie pas avec l'humidité relative et il ne capte pas d'eau) et qui a une bonne redistribution.

Configuration du mur étudié

La constitution de la paroi est détaillée dans le tableau ci-dessous :

	Éléments de la paroi (de l'extérieur vers l'intérieur)	Épaisseur (mm)	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Facteur de résistance à la diffusion μ
1	Pierre fermée (400 mm x 200mm)	400	0.7	770
2	Enduit à la chaux ($A = 3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$) 20mm d'épaisseur entre les pierres	400	0.7	7
3	Mortier adhésif pour Multipor , 8mm d'épaisseur	8	0.155	15.1
4	Multipor	185	0.04 R=4,5	4.1

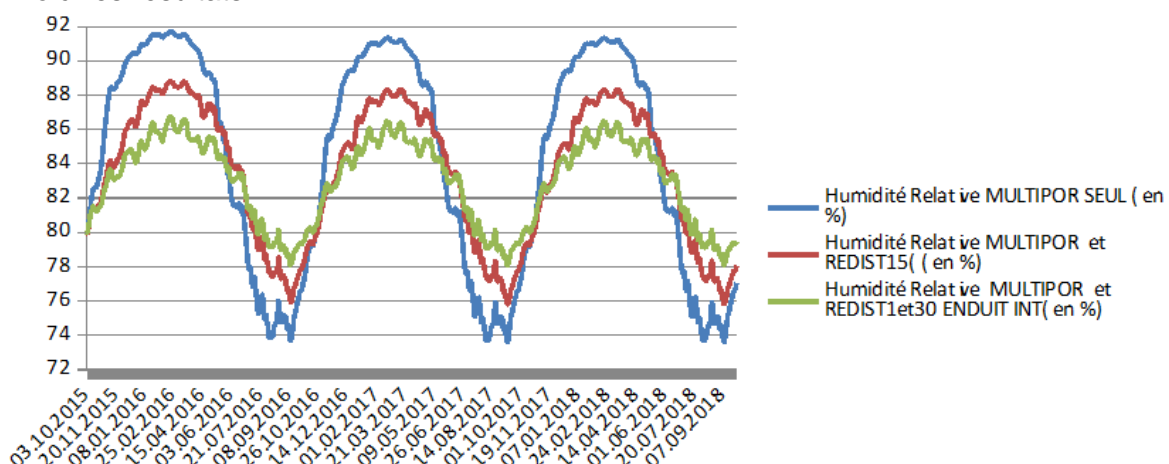
Exposition à la pluie : facteur 0,7



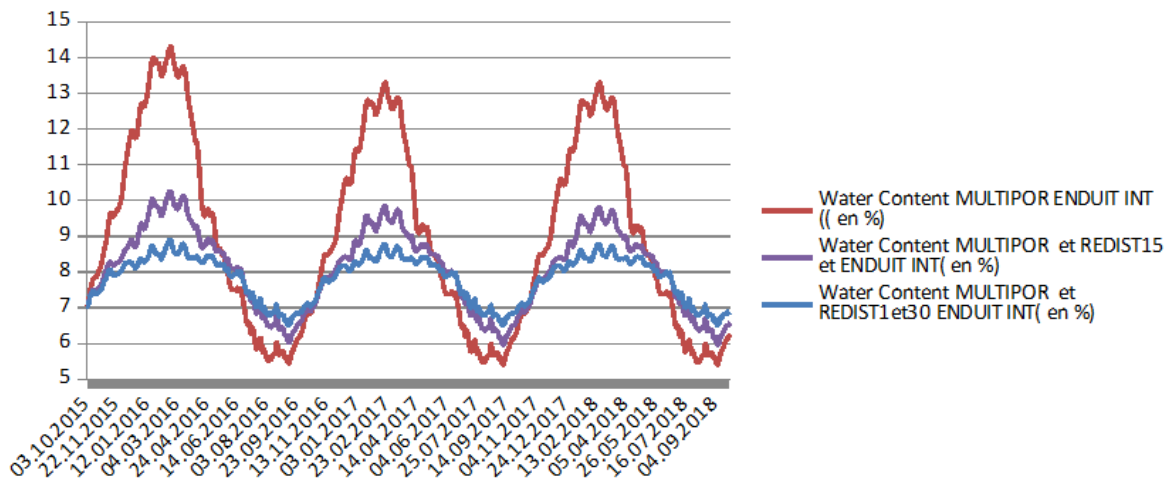
Résultats

L'isolant en béton cellulaire Multipor est collé avec sa colle Multipor Adhésive sur le mur. Nous analysons le pourcentage d'humidité relative dans les 3,5 premiers cm du Multipor coté mur. Puis nous interposons entre ce Mutipor + colle et le mur un enduit de redistribution d'épaisseur 15 ou 30 mm comme décrit ci-dessus.

En voici les résultats :



Humidité relative dans les 3,5 premiers centimètres d'isolant Multipor en fonction du temps pour un mur avec et sans enduit de redistribution à base de chaux



Pourcentage d'eau contenue dans les 3.5 premiers centimètres d'isolant Multipor en fonction du temps pour un mur avec et sans enduit de redistribution à base de chaux

Nous constatons :

- Pour le mur sans enduit de redistribution entre l'isolant et le mur une humidité relative maximale très élevée de l'ordre de 92%, et une quantité d'eau de 14%
- Pour le mur avec enduit de redistribution de 15 mm, cette humidité relative maximale descend à 88 % et pour un enduit de 30mm, cette humidité relative diminue à 86%, quant à elle la quantité d'eau maximal diminue à 10 % et 9 % pour un enduit de redistribution de 15 et 30 mm.

Les enduits de redistribution permettent donc d'amortir les variations d'humidité relative et d'eau contenue dans les premiers centimètres de l'isolant en contact avec la face du mur en pierre coté intérieur.

Conclusions

L'enduit de redistribution a le même effet que pour un isolant classique. Il joue le rôle d'amortisseur « hydrique » en absorbant l'eau en excès lors des phases hivernales (phase de condensation entre isolant et mur). Etant donné que cette « capacité » doit se décharger l'été, c'est certainement pour cela que le niveau de HR ou de quantité d'eau dans les premiers centimètres de l'isolant n'est pas si bas dans les périodes de séchage du mur (été). Lors de cette période de séchage la quantité d'eau dans l'isolant est plus importante (mais sans risque pathologique) avec enduit de redistribution que sans !

Cependant avec le Mutipor, on peut se poser la question du risque de moisissure pour un niveau d'humidité relative supérieur à 80%

Conclusion générale de l'étude ITI sur mur en pierre très dure (groupe 3)

Cette étude a mis en évidence qu'il n'est pas possible d'isoler de façon classique un mur en pierre très dure, car sa résistance à la migration de vapeur est trop importante.

Plusieurs solutions ont montré leur efficacité (par ordre de préférence) :

- Dans le cas où les joints sont en chaux ou en terre crue, un enduit de redistribution d'environ 3 cm appliqué sur l'intérieur du mur permet de rediriger l'humidité vers les joints et d'éviter les pathologies, avec une laine minérale (préférable a priori) ou une laine de bois, et dans tous les cas un freine-vapeur hygrovariable à fort Sd.
- Une variante en béton cellulaire isolant est également possible (mais techniquement difficile à mettre en œuvre sur un mu non plan et non vertical).
- Enfin, si les joints sont non capillaires (ciment...), il semble plus prudent de rester sur un double mur avec une lame d'air ventilée et cunette d'évacuation des condensats.

d. Simulation 2D de dalle hourdi sur mur poreux

Objet

Cette note décrit les résultats de simulations des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi verticale à base de mâchefer isolée par l'intérieur au niveau du plancher intermédiaire de type poutrelles-hourdis. Le programme de simulation utilisée est WUFI 2D.

L'objectif est de voir si il y a une problématique liée à un transfert de vapeur dans le mur via un mauvais rebouchage béton au niveau de la liaison mur/ poutrelle hourdis/dalle de compression. Nous souhaitons simuler ce mauvais rebouchage et donc cette mauvaise étanchéité à l'air et à la vapeur.

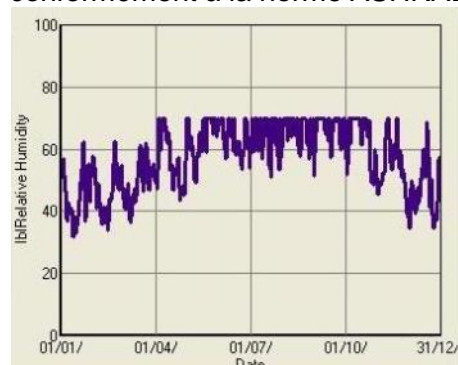
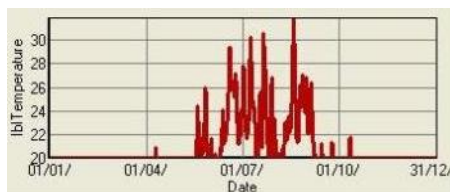
La littérature parlant très peu du mâchefer, nous nous sommes donc heurtés à un manque de données sur celui-ci. Ainsi pour simuler ce matériau, nous avons pris un matériau structurel poreux : une pierre en calcaire tendre ouverte à la diffusion de vapeur.

Hypothèses de modélisation

Les simulations sont effectuées sous WUFI -2D, sur une durée de 3 ans.

Données climatiques

- Climat extérieur : Fichier météo de Nancy 1991-2011 : Base de données Météonorm (sans modifier la température en été)
- Climat intérieur : Le Climat intérieur est simulé conformément à la norme ASHRAE 160P



Maison de 70m² habitée par 3 personnes
Renouvellement d'air = 0.5 vol/h

Configuration du mur étudié

La constitution de la paroi est détaillée dans le tableau ci-dessous :

	Eléments de la paroi (de l'extérieur vers l'intérieur)	Ep. (mm)	porosité	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Facteur de résistance à la diffusion μ	Résistanc e à la vapeurSd (m)
1	Enduit à base de chaux A= 3 kg/(m ² .h ^{0.5}) ou enduit minéral A= 0.1 kg/(m ² .h ^{0.5}) ou enduit Ciment 0.51 kg/(m ² .h ^{0.5})	15	0.3/0.24/0,3	0.7/0.8/1.2	7/25/25	0.1/ 0.38/ 0.38
2	Mur poreux / Mâchefer (simulé par pierre calcaire tendre grès Baumberger)	300	0.23	1.7	20	6
3	ITI Laine minérale ISOVER ZW Integra ZKF 32	150	0.95	0.032	1	0.15
4	Dalle de compression	63	0.18	1.6	92	
5	Lame d'air simulant le manque de béton et d'isolant au niveau du contact hourdis/mur					
6	Membrane Vario KM Duplex	1	0.11	1	280-4000	0.28-4

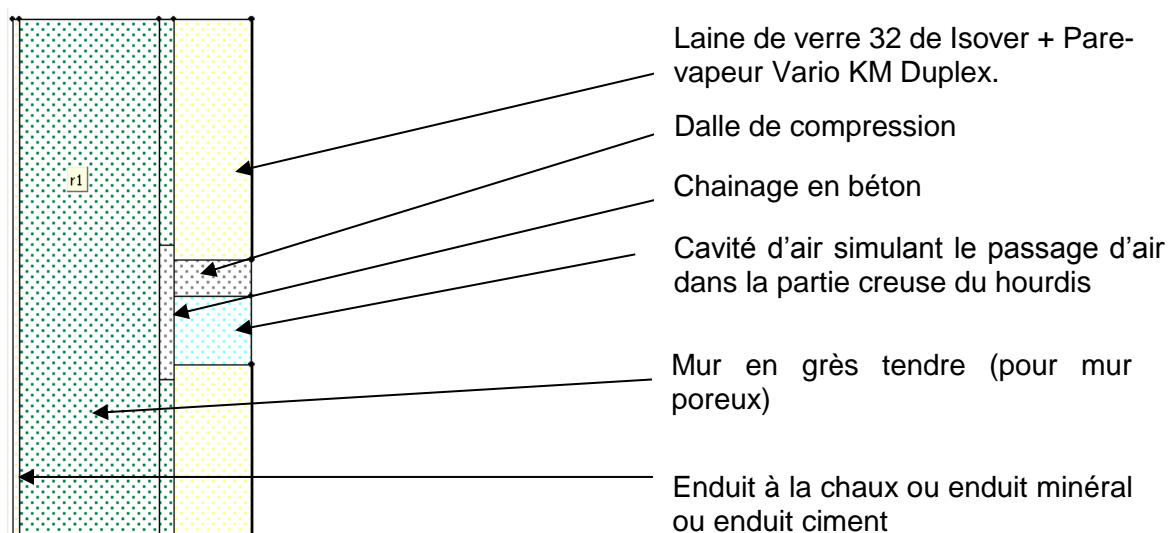
Caractéristiques des matériaux de la paroi

L'humidité relative initiale des matériaux est prise égale à 80%.

Nous avons alors fait le choix de prendre une pierre calcaire tendre (poreuse, avec un μ faible de 20) susceptible d'accumuler de l'eau et ouverte à la transmission de vapeur.

L'isolation intérieure est de type Laine de verre (conductivité thermique de 0,032 W/(m.K)) avec une épaisseur de 150 mm afin d'atteindre $R = 4,5 \text{ m}^2.\text{K/W}$. Un pare-Vapeur Isover Vario KM Duplex vient recouvrir l'isolant coté intérieur.

Nous simulons une cavité d'air (130mm de haut et 150mm de large) sous la dalle de compression par laquelle vont s'effectuer les transferts de vapeur d'eau.



Vue en coupe du mur simulé

A noter que nous avons considéré un chaînage en béton entre le mâchefer et la poutrelle-hourdis. Son épaisseur est volontairement faible, vu l'incertitude sur les pratiques de l'époque (ce béton

a un effet pare-vapeur qui protège le mur de l'humidité apportée par la circulation d'air dans le hourdis).

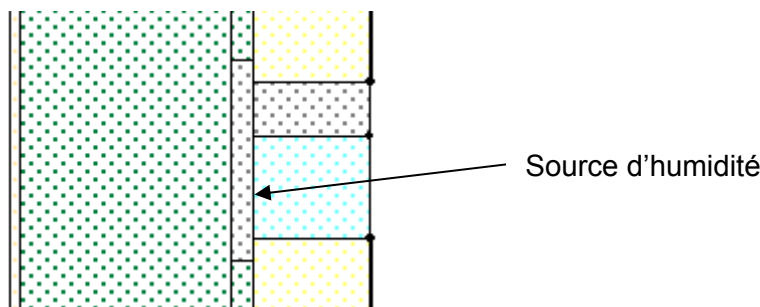
Simulation d'une source de vapeur au niveau de la lame d'air

Afin de simuler le passage supplémentaire de vapeur d'eau due aux manques d'étanchéité à l'air à ce niveau, nous incluons une source de vapeur.

Les hypothèses prises sont les suivantes :

- Logement de 70m² : 7 x 10m, 3 personnes
- Hypothèse haute issue du livre « La condensation dans le bâtiment » - Yves Couasnet, Q= 285 g/h en moyenne
- Hypothèse basse : 3 personnes au repos dégagent 60g de vapeur /h → 180g/h au total
- Les fuites se trouvent sur toute la périphérie (les 4 cotés) du mur = 34 ml
- On estime qu'il y a compétition entre la VMC et ces fuites d'air
 - o n50 = 3 vol/h → débit de fuite = 3/20= 0,15vol/h
 - o débit due à la ventilation mécanique = 0,5 vol/h
 - o conclusion : 30 % de la vapeur dégagée par les occupants s'échappe via les fuites en périphérie.

Nous déterminons ainsi une source de vapeur d'eau haute et basse de respectivement : 2.51g/(h.ml) et 1.6g/(h.ml) que nous incluons comme source au niveau de l'interface lame d'air/mur mâchefer.



Analyse des risques

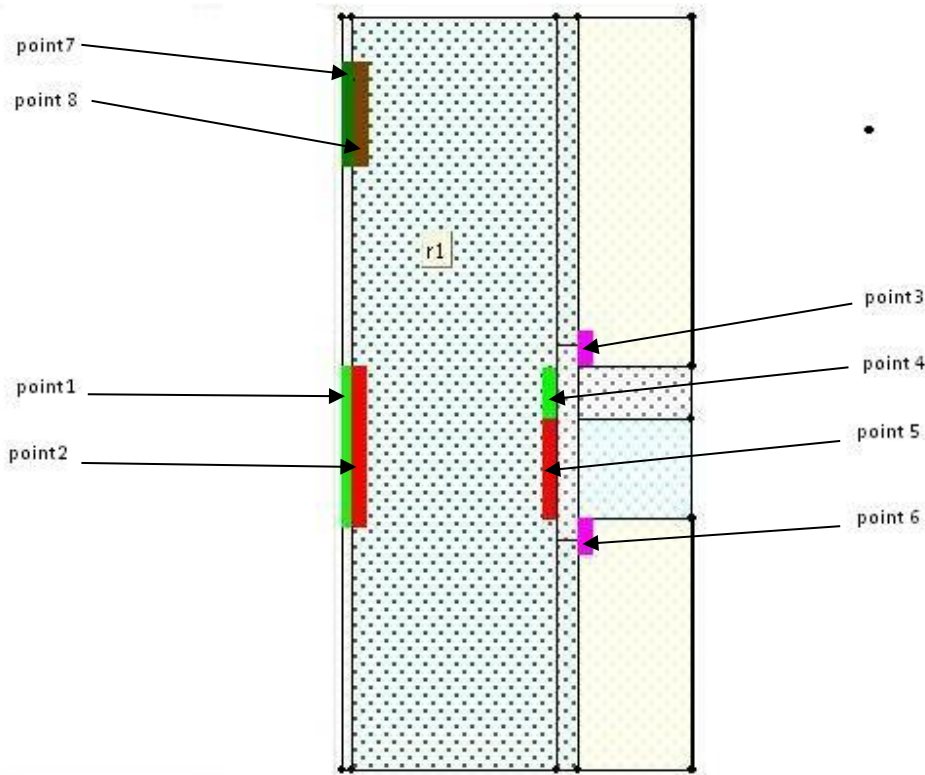
Les phénomènes que l'on peut craindre sont des teneurs en eau élevées dans les composants de la paroi et des valeurs d'humidité relative élevées. Ces phénomènes peuvent être à l'origine de condensation et provoquer des pathologies dans le système constructif (pourrissement des isolants, développement de moisissures sur les parois, gel des bétons ou pierre puis écaillage et diminution des performances mécaniques...). De plus le pont thermique provoqué par cette poutrelle amplifie le phénomène de point froid, et ajouté à la mauvaise étanchéité au niveau de cette jonction, il est intéressant de savoir si des pathologies sont susceptibles d'apparaître.

Pour analyser les résultats de la simulation, les paramètres suivants sont étudiés :

- Le **risque de gel de l'enduit et du mâchefer** dans sa partie extérieure : On considère qu'il **y a risque de gel lorsque deux conditions** sont réunies : une humidité relative > 95% (les capillaires sont saturés) et une **température négative**.
- **l'humidité relative** à l'interface béton/isolant intérieur : Cette interface est un point critique du système constructif. En hiver, la vapeur d'eau produite à l'intérieur notamment par les occupants migre de l'intérieur vers l'extérieur. Les risques de condensation sont importants lorsque l'humidité relative est supérieure à 85% sur une longue période (supérieure à plusieurs jours).

Résultats de simulation

Nous avons visualisé ce qu'il se passe en termes de transfert de vapeur d'eau au niveau de chacune des zones schématisées ci-dessous :



Nous visualiserons dans ce document les données les plus intéressantes.

Evaluation du risque de gel selon le type d'enduit extérieur

On regarde principalement ce qu'il se passe au niveau des points 1, 2, 7 et 8 du point de vue du risque de gel que l'on appréciera via le **nombre d'heures** où l'humidité relative de cette zone est supérieure à 95% et la température inférieure à 0°C.

Nous avons fait varier et sélectionner trois types d'enduits extérieurs :

		ITI LDV 150mm		ITI FDB 170mm	
		sourcebasse			
		Enduit minéral A = 0.1 kg / (m ² .h0.5)	Enduit ciment A = 0.51kg / (m ² .h0.5)	Enduit chaux A = 3kg / (m ² .h0.5)	Enduit chaux A = 3kg / (m ² .h0.5)
Étiquettes de lignes		Somme de RISQUE GEL : condition T<=0°C et HR>=95%	Somme de RISQUE GEL : condition T<=0°C et HR>=95%	Somme de RISQUE GEL : condition T<=0°C et HR>=95%	Somme de RISQUE GEL : condition T<=0°C et HR>=95%
Point 1	Total général	0	saturation	80	82
Point 2	Total général	0	saturation	0	0
Point 7	Total général	0	saturation	100	102
Point8	Total général	0	saturation	0	0

Synthèse des résultats concernant le risque de gel, avec ITI en laine de verre, pour différents enduits, et test en laine de bois avec enduit chaux.

Nota : En ce qui concerne l'enduit ciment, la simulation fonctionne sans source d'humidité mais diverge dès qu'il y en a une, même basse. On voit dans les résultats de simulation avant divergence que le mur devient saturé en eau.

Conclusions partielles sur le gel :

Le paramètre le plus important est la pénétration d'eau via l'enduit jusqu'au mâchefer, nous nous apercevons ici que plus l'enduit a une succion faible donc un A faible moins l'enduit est sensible au gel. **Un enduit respectant le critère de [\[RAGE\]](#) soit $A < 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ permet de protéger le mur du risque de gel.**

D'autre part le mur dans ses premiers centimètres extérieurs (sous l'enduit) ne présente pas de risque de gel (avec les conditions $T < 0^\circ\text{C}$ et $\text{HR} \geq 95\%$). La structure n'est jamais mise en danger (en considérant que l'enduit a un rôle sacrificiel et doit être renouvelé régulièrement)

Remarque sur les enduits à base de chaux :

Il semble que pour les enduits à la chaux, nous n'ayons pas les bons critères pour valider l'aspect risque de gel donc de pathologie (craquelure, décollement...)

En effet, le critère $\text{HR} > 95\%$ et $T < 0^\circ\text{C}$ ne semble pas être adapté aux enduits à base de chaux. D'après la bibliographie que nous avons pu trouver sur les enduits à base de chaux (cf [annexe 3](#) sur les enduits à la chaux), d'autres facteurs apparaissent importants : la porosité (présence de « grands » pores permettant une résistance accrue au gel et un stockage des sels solubles, résistance mécanique faible (dit autrement : souplesse) de ce type d'enduit, etc. D'autre part le DTU 26.1 et l'historique de l'usage de la chaux dans le bâtiment nous font dire que les mortiers à base de chaux (aérienne et/ou hydraulique naturelle NHL) sont adaptés à leurs usages et ne présentent pas forcément de pathologie telle que voudrait le faire dire le critère de gel que nous avons utilisé.

Evaluation du risque à l'Interface béton/isolant intérieur

Au niveau de cette interface sensible à la condensation en ITI, nous effectuons une comparaison des résultats de simulation en faisant varier divers paramètres : type d'enduit, type d'isolant, type de membrane, avec ou sans traitement de cette fuite (c'est-à-dire avec ou sans source de vapeur).

Variante sur les enduits extérieurs

Nous effectuons une comparaison des résultats de simulation pour les points 3 et 3B, en termes d'humidité relative. Il s'agit des premiers centimètres (2,5 cm) de l'isolant en contact avec le mur.

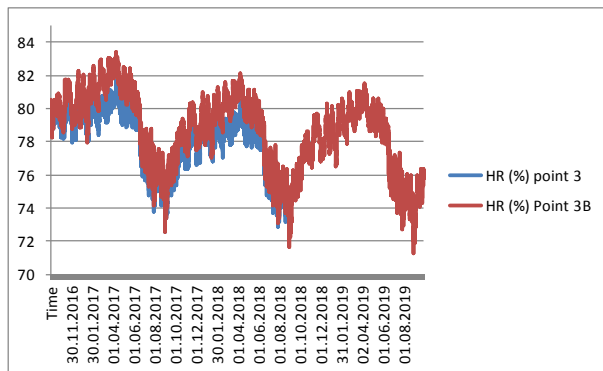
Si celui-ci est à plus de 85% pendant plusieurs jours et que cela se répète sur les 3 ans de simulation, nous estimons qu'il va se dégrader et perdre ses qualités.

Nous effectuerons des comparaisons avec ou sans source de vapeur d'eau, afin de voir si le mur fonctionnerait malgré le pont thermique avec une étanchéité à l'air parfaite. Nous visualiserons ainsi l'impact des fuites dans l'épaisseur du plancher poutrelle hourdis sur le fonctionnement du mur.

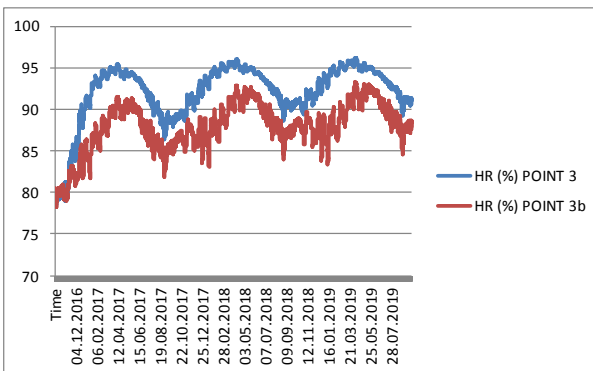
Les résultats sont résumés ci-après.

Enduit à la chaux

Enduit Chaux A = 3 sans source



Enduit Chaux A = 3 avec source basse



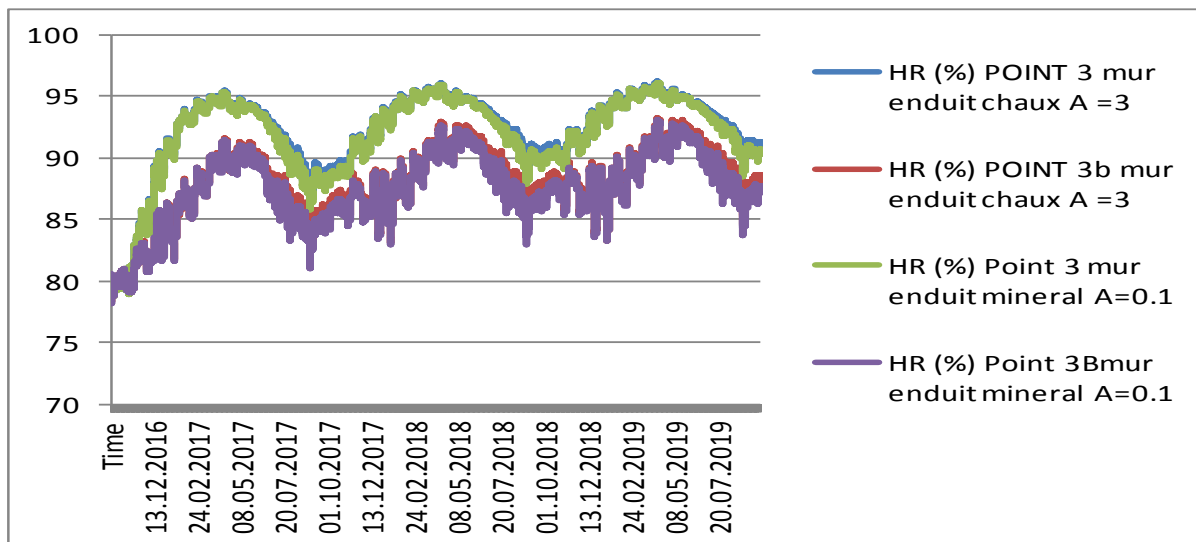
Humidité relative dans l'isolant laine de verre en 2 points 3 et 3b en fonction du temps

La fuite au niveau de la poutrelle hourdis perturbe le fonctionnement du mur, il y a augmentation de la condensation à l'interface Isolant/ mur. Ce qui n'est pas le cas pour le mur sans la fuite au niveau de la poutrelle, où l'isolant sèche et tend vers une HR inférieure à 80%.

L'humidité relative pour les points 3 et 3b varie alors entre 85 et 95% continuellement pour le mur avec source. De plus l'humidité relative augmente au cours des années. Cela va avoir des conséquences néfastes sur l'isolant et ses performances.

Enduit minéral avec A = 0.1

On compare ici les résultats entre l'enduit à la chaux précédent dont le $A=3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ et un enduit minéral dont le $A = 0.1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$, aux points 3 et 3b et pour un mur avec source de vapeur d'eau, afin de voir si la conclusion précédente reste valable en présence d'une bonne protection à la pluie.



Humidité relative dans l'isolant laine de verre en 2 points 3 et 3b en fonction du temps pour un mur (avec source de vapeur au niveau poutrelle) avec deux types d'enduits (à la chaux $A=3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ et minéral $A=0.1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$).

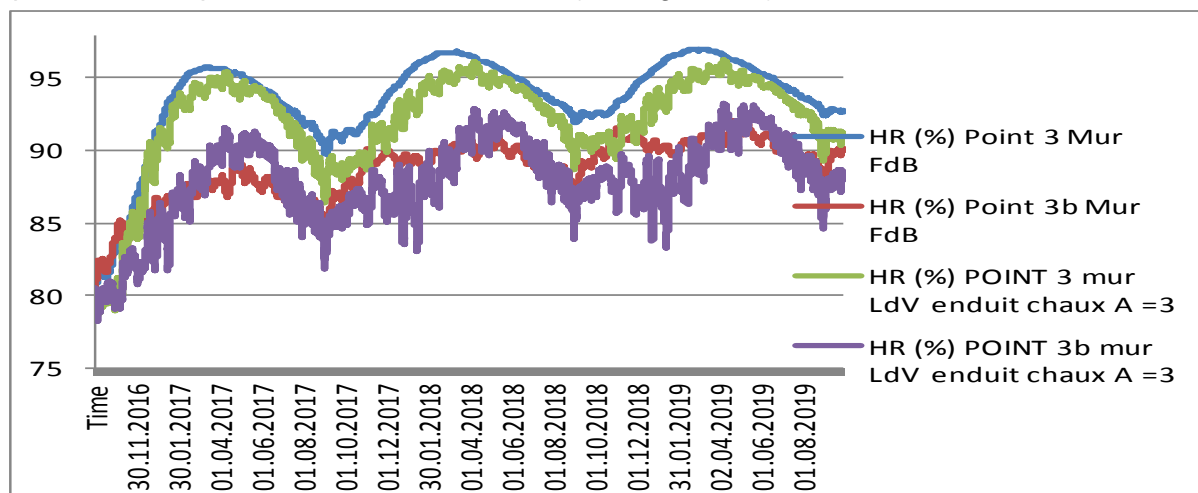
On n'observe pas de différence de résultats, le mur se comporte de la même manière quelque soit la nature de l'enduit.

L'humidité relative pour les points 3 et 3b varie alors entre 85 et 95% continuellement pour le mur avec source. Cela va avoir des conséquences sur l'isolant et ses performances. De plus l'humidité relative augmente au cours des années.

Conclusion : la source de vapeur donc la fuite au niveau des poutrelles hourdis (et non la pluie) est bien la cause de cette augmentation de humidité relative au niveau des premiers centimètres d'isolant.

Variante sur les isolants

On compare à présent les résultats pour 150 mm de laine de verre Isover Integra ZKF 32 (150mm d'épaisseur) et 170mm d'épaisseur de laine de bois Pavaflex, pour des résistances thermiques équivalentes, et pour un même enduit chaux ($A=3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$) et avec une source d'humidité :



Comparaison de l'humidité relative dans l'isolant aux points 3 et 3b en fonction du temps pour la laine de verre et la laine de bois

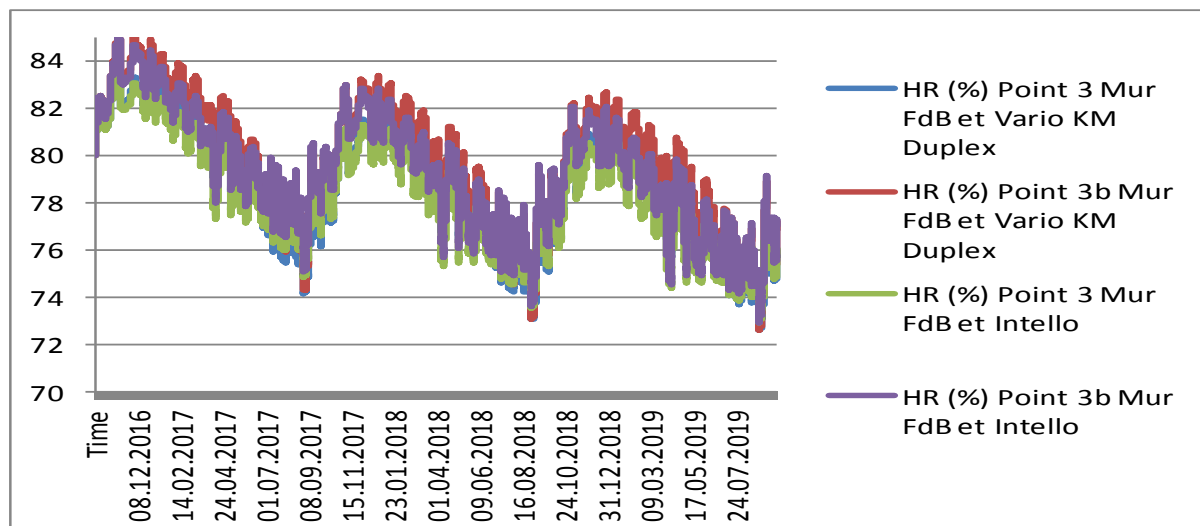
On n'observe pas de différence notable de résultats. La laine de bois se comporte plutôt moins bien au point 3 (effet « éponge »).

Pour les deux isolants, l'humidité relative pour les points 3 et 3b varie alors entre 85 et 95% continuellement pour le mur avec source. De plus l'humidité relative augmente au cours des 3 années de simulation. Cela va avoir des conséquences sur les deux types d'isolant et leurs performances.

Variante sur les membranes hygrovariables

Comparaison des résultats pour deux types de membranes hygrovariables : la membrane Isover Vario KM Duplex dont le Sd varie de 0,4 à 4m et la membrane Proclima Intello dont le Sd varie de 0.2 à 27 m.

Le mur est sans source (sans fuite). L'isolant est de la Fibre de bois (Pavaflex), car par expérience c'est sur les isolants hygroscopiques que l'on voit le plus d'effet entre hygrovariable à fort et faible Sd.



Comparaison de l'humidité relative dans l'isolant fibre de bois aux points 3 et 3b selon le type de freine-vapeur hygrovariable pour un mur sans source de vapeur au niveau poutrelle avec enduit extérieur à la chaux $A=3 \text{ kg/m}^2.h/2$

On n'observe pas de différence notable de résultats, la membrane Intello se ferme plus en hiver que la Vario KM Duplex et donc limite plus le passage de vapeur vers l'extérieur.

En l'absence de source, l'humidité relative pour les points 3 et 3b varie alors entre 85 et 73%. Et cette humidité relative diminue au fil des 3 années de simulation pour converger sous 80% d'HR, ce qui est un signe de bon fonctionnement de ce mur.

Conclusion générale de l'étude ITI sur mur poreux avec dalle hourdis

Si le critère de gel est résolu avec un enduit protégeant efficacement le mur de la pluie battante, en revanche aucune solution ne permet de garantir la pérennité de l'isolant en présence d'une source d'humidité.

Quelque soit le type d'enduit minéral ou à la chaux, et quelque soit le type d'isolant fibreux utilisé en ITI, nous nous apercevons que le mur est perturbé au niveau de son fonctionnement : sa teneur en humidité augmente plus que ce qu'il ne peut évacuer. A terme des désordres au niveau isolant vont intervenir (accumulation d'humidité, développement de moisissures, perte de performances thermiques).

En revanche, dès que la source d'humidité est annulée, le mur fonctionne correctement pour l'ensemble des variantes modélisées. Cette fuite dans l'épaisseur des hourdis doit donc impérativement être traitée afin d'assurer la pérennité du mur. Or en pratique cela semble quasiment impossible, car il faut traiter toutes les traversées de la dalle, que ce soit pour les réseaux d'eau de chauffage, d'évacuations, d'électricité, ou encore toutes les gaines techniques, qui sont autant d'entrées d'air qui débouchent sur la liaison hourdis – mur.

Annexe 3 : Classification des enduits et imperméabilisants

Objet

La perméance à la vapeur et l'absorption d'eau liquide des enduits et imperméabilisants de façade jouent un rôle très important dans les solutions techniques proposées dans ce rapport. Nous avons jusqu'ici cité les valeurs Sd et A visées, mais ces données ne sont pas toujours présentes dans la documentation technique des produits. C'est pourquoi dans cette annexe nous présentons les différentes classifications caractérisant ces grandeurs, pour les différents types d'enduits et d'imperméabilisant.

Il convient d'être vigilants, car les différentes familles de produits répondent à des normes différentes et des classifications qui se ressemblent mais qui correspondent à des valeurs différentes !

Le cas particulier des enduits à la chaux fait l'objet d'un paragraphe spécifique.

Enduits


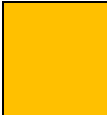
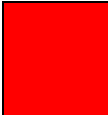
On distingue les enduits minéraux, dont le liant principal est la chaux ou le ciment et qui répondent à la norme NF EN 998-1 d'une part, et les enduits organiques qui répondent à la norme NF EN 15824 d'autre part.

Les seuils établis dans les classifications correspondantes sont synthétisées dans le tableau suivant :

	Perméance à la vapeur	Absorption d'eau par capillarité	Compression
Enduits minéraux NF EN 998-1	Autres (GP, LW, CR, OC) : cf valeur déclarée	Wc 0 : non spécifié	CS I : 0,4 à 2,5 N/mm ²
		Wc 1 : $A \leq 3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$	CS II : 1,5 à 5,0 N/mm ²
	Enduit d'assainissement (R) : $\mu \leq 15$ *	Wc 2 : $A \leq 1,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$	CS III : 3,5 à 7,5 N/mm ²
	Enduit d'isolation thermique (T) : $\mu \leq 15$ *		CS IV : $\geq 6 \text{ N/mm}^2$
Enduits organiques NF EN 15824	V1 : $S_d < 0,14 \text{ m}$	W1 : $A > 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$	NC
	V2 : Sd de 0,14 à 1,4 m	W2 : A de 0,1 à 0,5 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$	NC
	V3 : $S_d \geq 1,4 \text{ m}$	W3 : $A \leq 0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$	NC

* donc $S_d \leq 0,5 \text{ m}$ pour une épaisseur jusqu'à 3,3cm

Légende des couleurs :

	Valeur conforme à $S_d \leq 0,5 \text{ m}$ et $A \leq 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$		Ce classement ne permet pas de conclure : rechercher la valeur A ou Sd		Produit non conforme aux valeurs citées.
---	--	---	--	---	--

Par ailleurs, la norme NF EN 13914-1 présente des exigences et des recommandations relatives à la construction, à la conception et aux matériaux utilisés, au choix des mélanges et à la mise en œuvre des enduits à base de ciment, de chaux ou de liants organiques sur des supports extérieurs. Ses tableaux 1 et 2 présentent une vue d'ensemble des propriétés générales des enduits par famille de produits :

Désignation	Description	Catégorie type indicative de résistance à la compression selon EN 998-1	Exemple d'application
Mortier à chaux aérienne	Mortier d'enduit avec une chaux aérienne en tant que principal liant actif	CS I ou inférieure	Structure faible *, conservation des bâtiments historiques
Chaux hydraulique (NHL, HL)	Mortier d'enduit avec une chaux hydraulique en tant que principal liant actif	CS I / CS II	La plupart des applications, conservation des bâtiments historiques
Chaux hydratée et ciment	Mortier d'enduit contenant de la chaux hydratée et du ciment	CS II / CS III	La plupart des applications, plinthes
Ciment	Mortier d'enduit avec ciment en tant que liant de base	CS III / CS IV	Zone extérieure (plinthes, murs extérieurs de caves)

* comprendre murs anciens, qui travaillent en permanence. A priori les murs en pisé ne sont pas abordés dans les documents normatifs (voir ci-après le paragraphe sur la chaux).

Il est intéressant de noter dans ce tableau que sont adaptés aux murs anciens des enduits de faible résistance à la compression, autrement dit **des enduits qui conservent une certaine souplesse (CS I)**

Spécificité des enduits chaux

Problématique : les enduits à la chaux absorbent trop l'eau liquide ($A = 3 \text{ à } 11 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ dans la base de données de WUFI et la bibliographie consultée) et ne répondent donc pas au critère défini par [RAGE](#) de $A \leq 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$. Or ces enduits sont unanimement reconnus comme les plus adaptés à la rénovation des murs anciens. Comment expliquer cet écart ?

Référence : voir l'article « [Enduits à la chaux et réglementation](#) » par [Luc Van Nieuwenhuyze](#), dans la revue Maison Paysannes de France n° 177, 2 pages, 2010.

<http://maisons-paysannes.org/wp-content/uploads/2013/09/Revue-MPF-177-Luc-Van-Nieuwenhuyze-DTU-chaux.pdf>

Cet article résume bien la difficulté de prendre en compte les spécificités du bâti ancien et de techniques traditionnelles comme les mortiers de chaux préparés sur chantier dans les textes normatifs comme le DTU 26.1.

On rappelle qu'il existe plusieurs types de chaux (NF EN 459-1) :

Chaux	Sous-famille		Particularités
Aérienne	CL	Chaux calcique	La carbonatation des hydrates en contact avec le dioxyde de carbone présent dans l'air forme du carbonate de calcium (d'où le nom de chaux aérienne).
	DL	Chaux dolomitique	
Hydraulique	NHL	Chaux hydraulique naturelle	Les chaux hydrauliques ont la propriété de faire prise et de durcir lorsqu'elles sont mélangées à de l'eau et par réaction avec
	NHL Z	Mélange chaux et ciment	

	HL	Mélange chaux et autre (ciment pouzzolane, adjuvant...)	le dioxyde de carbone présent dans l'air (carbonatation). Les chaux hydrauliques sont classées en fonction de leur résistance mécanique à la compression à 28 jours : classe 2 (2 à 7 MPa*), 3,5 (3,5 à 10 MPa) et 5 (5 à 15 MPa)
	FL	chaux formulée : chaux aérienne et/ou chaux hydraulique naturelle avec des matériaux hydrauliques et/ou pouzzolaniques ajoutés	

* 1 MPa = 1 N/mm². Les classe CS I et CS II d'enduits sont donc équivalentes en résistance mécanique à la compression à une chaux NHL 2 par exemple.

On retrouve également dans l'article cité précédemment l'importance de la souplesse des enduits sur le bâti ancien qui continue de travailler. Ainsi l'auteur recommande que **la classe de résistance 3,5 est le maximum adapté au bâti ancien.**

A la lecture de différents documents, notamment :

- Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti, étude du comportement hydromécanique, Thèse de Charlotte Walbert à l'université de Cergy Pontoise, en collaboration avec notamment le LRMH, publiée en 2016, 188p ;
- Mémento sur les Altérations de la pierre, de Philippe Bromblet pour PierreSud et CICRP, 2010, 26p ;
- Guide « Altérations de la pierre » de l'association MEDISTONE, 2010, 32p ;

On comprend que la rupture au gel des murs anciens et de leurs enduits est un phénomène complexe mettant en jeu la porosité, la taille des porosités et les connexion capillaires entre elles, ainsi que la résistance mécanique et le module d'élasticité.

C'est pourquoi il apparaît que les seuls critères de perméance Sd et d'absorption d'eau A ne suffisent pas à modéliser les phénomènes qui se produisent notamment dans les enduits chaux, et leur permettent de résister au gel au-delà de 95% d'HR et sous 0°C.

Malheureusement les bibliographies étudiées ne mettent en avant aucun critère qui puisse être simulé avec WUFI.

Par prudence, nous ne sommes donc pas en mesure de conclure sur l'utilisation de chaux sous forme de liant pour mortier, mélangé à du sable sur chantier, notamment pour les [simulations concernant les plancher intermédiaires en poutrelle-hourdis](#) sur mur poreux.

Il est possible que ses propriétés mécaniques (élasticité) lui permettent de résister au gel dans les conditions testées dans [nos simulations](#) (95% HR et T°<0°C) – nous n'avons trouvé aucune bibliographie sur ce point précis. En tout cas, la chaux est considérée généralement comme un enduit protecteur et sacrificiel qui a vocation à être renouvelé régulièrement. C'est donc une solution possible sous réserve de prévoir son entretien régulier.

En tout état de cause, la pertinence d'un bon usage de bonnes chaux en enduit sur les bâtiments anciens est largement démontrée sur le terrain, par les retours d'expérience. La difficulté que nous rencontrons est d'une part de modéliser son comportement et d'autre part de disposer de références normatives adaptées pour encadrer sa bonne mise en œuvre.

Par défaut, nous avons étudié les fiches techniques de mortiers préparés à base de chaux du commerce, recommandés pour les murs anciens, pour identifier les produits les moins absorbants pour la pluie battante : le résultat est présenté dans le tableau de la page suivante.

Comparaison des mortiers d'enduit préparés à base de chaux, recommandés par leur fabricant pour le bâti ancien :

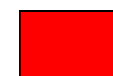
Fabricant	Nom commercial	Description	Ep (mm)	Support	Perméance	Sd	Absorption d'eau	A	Compression
Weber	weber.mep plus	Corps d'enduit allégé à la chaux aérienne		brique, pierre, pisé, adobe, mâchefer	NC	NC	W1 selon EN 15824	NC	CS II
	weber.cal PF	Enduit de finition à la chaux aérienne	8 à 10	weber.mep plus	NC	NC	W1 selon EN 15824	NC	CS II
	weber.cal F	Enduit de parement épais, manuel, grain fin	5 à 7	weber.mep plus	NC	NC	W1 selon EN 15824	NC	CS II
	weber.cal G	Enduit de parement épais, manuel, grain coloré gros	5 à 7	weber.mep plus	NC	NC	W1 selon EN 15824	NC	CS II
	weber.SPH K	Chaux aérienne formulée et colorée	5 à 10	weber.mep plus	NC	NC	W1 selon EN 15824	NC	CS II
Parexlanko	Chaux patrimoine	chaux hydraulique naturelle blanche NHL 3,5		brique, pierre tendre à dure, pisé, adobe, mâchefer, torchis...	NC	NC	NC	NC	NHL 3,5
	Parlumière clair	sous-enduit de restauration À la CHauX		pierre yc tendre, pisé adobe, mâchefer, torchis	V1	0,12 m	Wc0 selon EN 998-1		CS I
	Parlumière fin	enduit de parement à la chaux - grain fin	10 mm	parlumière clair ou parlumière sth	V1	0,10 m	Wc0 selon EN 998-1		CS I
	Parexal	Enduit de restauration à la chaux – grain fin	10 à 50mm	Pierre yc tendre, pisé adobe, mâchefer, torchis	V1	0,10 m	Wc2 selon EN 998-1	A<1,5	CS I



Valeur conforme à $Sd \leq 0,5 \text{ m}$ et $A \leq 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$



Ce classement ne permet pas de conclure : rechercher la valeur A ou Sd



Produit non conforme aux valeurs citées.

On note que tous ces enduits ont une certaine souplesse, ce qui les rend adaptés aux murs anciens.

Pour beaucoup, l'absorption d'eau est trop importante par rapport au critère de [RAGE], ce qui indique qu'ils ne protègent pas assez le mur de la pluie pour assurer sa pérennité après isolation, notamment en présence de planchers intermédiaires bois ou poutrelle-hourdis.

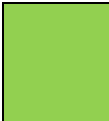
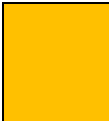

L'enduit Parexal semble le plus adapté. Il dispose de plus d'un DTA (7/16-1667) qui lui a été attribué depuis 2002 pour un domaine d'emploi qui couvre notamment : Supports anciens : Maçonneries de pierres, de moellons, de briques pleines ou perforées de terre cuite, Maçonneries d'éléments de faible cohésion : terre crue (adobe), pierres très tendres, briques foraines, Bétons de mâchefer ou de terre crue (pisé, torchis, bauge)...

Imperméabilisants de façade

Ces produits sont décrits par le NF DTU 42.1. Leur classement EVWA, éventuellement complété par les lettres G, S et C (GESVWAC), est défini par la norme NF EN 1062-1 (peintures et vernis). La perméance et l'absorption d'eau sont caractérisés par :

	Perméance à la vapeur	Absorption d'eau par capillarité
Imperméabilisants de façade NF EN 1062-1	V0 : non classé	W0 : non classé
	V1 : $S_d < 0,14$ m	W1 : $A > 0,5$ kg/m ² .h ^{1/2}
	V2 : S_d de 0,14 à 1,4 m	W2 : A de 0,1 à 0,5 kg/m ² .h ^{1/2}
	V3 : $S_d \geq 1,4$ m	W3 : $A \leq 0,1$ kg/m ² .h ^{1/2}

Légende des couleurs :

	Valeur conforme à $S_d \leq 0,5$ m et $A \leq 0,2$ kg/m ² .h ^{1/2}		Ce classement ne permet pas de conclure : rechercher la valeur A ou S_d		Produit non conforme aux valeurs citées.
---	--	---	---	---	--

Pour choisir un imperméabilisant de façade, on choisira donc **avant tout un produit adapté au mur existant** (se faire conseiller par un professionnel qualifié), et par ailleurs un classement V1W3

Annexe 4 : Méthodologie de mesure du facteur d'absorption de la pluie battante A

Objet

La mesure à la pipe de Karsten est définie par la norme NF EN 16302 du 13 Mars 2013. Par ailleurs la norme NF EN 772-11 d'août 2011 définit les protocoles de mesure de l'absorption.

Cependant ces normes ne font pas le lien avec le facteur d'absorption de l'eau liquide A dont le seuil à $A = 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ est cité comme référence dans l'étude [RAGE], ni avec les grandeurs utilisées dans le logiciel WUFI.

De même la documentation de la pipe que nous avons achetée indiquait qu'il fallait faire la différence entre la valeur à 15min et la valeur à 5min, sans préciser ce que signifiait cette grandeur (*a priori* en ml...).

C'est pourquoi nous avons établi par les calculs et la méthodologie suivante des passerelles entre ces grandeurs, pour aboutir au final à un protocole très simple !



Ci-contre : exemple de pipe de Karsten (photo : Enertech)

Conclusion pratique

La valeur A en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ peut être lue directement avec une pipe de Karsten de diamètre 37mm en faisant la différence entre la quantité d'eau absorbée en ml à 15min et la valeur à 5 min :

$$A [\text{en kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}] = \text{Absorption à 15min} - \text{Absorption à 5 min} [\text{en ml}]$$

Justification Théorique

Source : aide de WUFI

Wufi utilise 2 coefficients : Dws est le coeff de transport liquide en succion : il est utilisé pendant la pluie. Dww est le coefficient de transport liquide en redistribution : il est utilisé après la pluie.

Wufi dispose pour certains matériaux de tables de Dws et Dww en fonction de l'humidité. Sinon il calcule Dws à partir du coefficient A (coefficient d'absorption) avec la formule :

$$D_{ws}(w) = 3.8 \cdot (A / w_f)^2 \cdot 1000^{(w/w_f)-1}$$

NB : dans WUFI, A est exprimé en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$, mais ici nous avons tout ramené en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ pour pouvoir nous comparer à la valeur cible $A = 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$.

Par ailleurs, la corrélation suivante est citée dans la bibliographie (et la norme EN 15801) :

$$\begin{aligned} \text{Absorption (t)} &= \text{Surface de la pipette} \cdot A \cdot \text{racine (t)} \\ [\text{en litre} = \text{kg}] & \quad [\text{en m}^2] \quad [\text{en kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}] \quad [\text{t en h}] \end{aligned}$$

Résultats

Nous avons utilisé cette formule et recréé un modèle par élément finis sous excel pour établir la relation entre la mesure à la pipe de Karsten et les grandeurs théoriques.

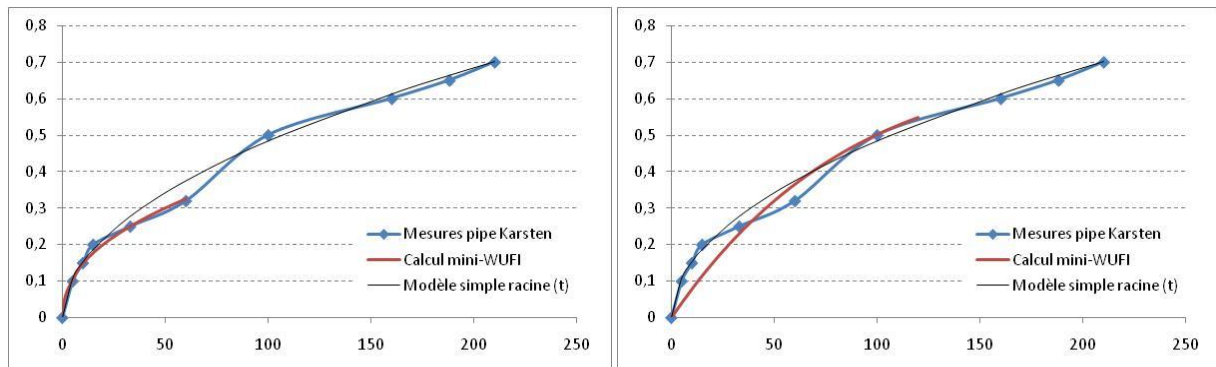
La principale difficulté était qu'en général on ne connaît pas la teneur en eau à saturation des matériaux w_f , utilisé dans la formule ci-dessus, ni la teneur en eau initiale $w(t=0)$.

Toutefois, en testant plusieurs corrélations possibles de la courbe d'absorption mesurée sur des cas pratiques, nous avons pu obtenir les corrélations suivantes :

Test 1 : calcaire dur

Calcaire 1	wf = 40 kg/m3	wf = 70 kg/m3	wf = 210 kg/m3
W (t=0) = 18	A = 0.10		
W (t=0) = 32	A = 0.19	A = 0.09	A = 0.04
W (t=0) = 54		A = 0,20	A = 0.05

Pour cet échantillon, la valeur A peut varier de 0,04 à 0,20 kg/m².h^{1/2} selon les hypothèses. La méthode simplifiée donne A = 0,08 à 0,1 kg/m².h^{1/2}. On peut donc conclure d'un intervalle de confiance de -50% / +100%. En tout état de cause, la valeur A est inférieure à 0,2.

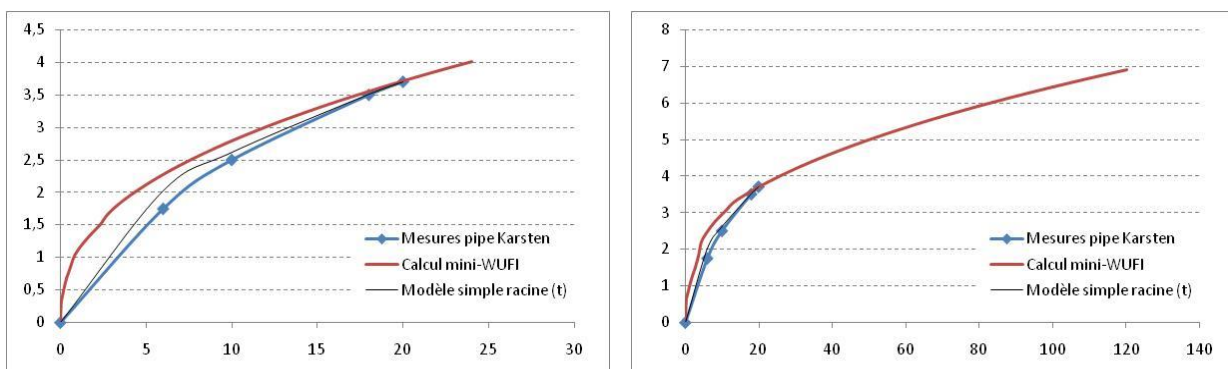


Exemple de courbe de corrélation (Calcaire 1, hypothèse $w(t=0) = 32$; wf = 40 et wf = 210)

Test 2 : calcaire tendre

Calcaire 2	wf = 40 kg/m3	wf = 70 kg/m3	wf = 210 kg/m3
W (t=0) = 19	A = 1,8	A = 1,4	A = 0,9
W (t=0) = 32		A = 1,6	
W (t=0) = 60		A = 4,7	A = 1,2

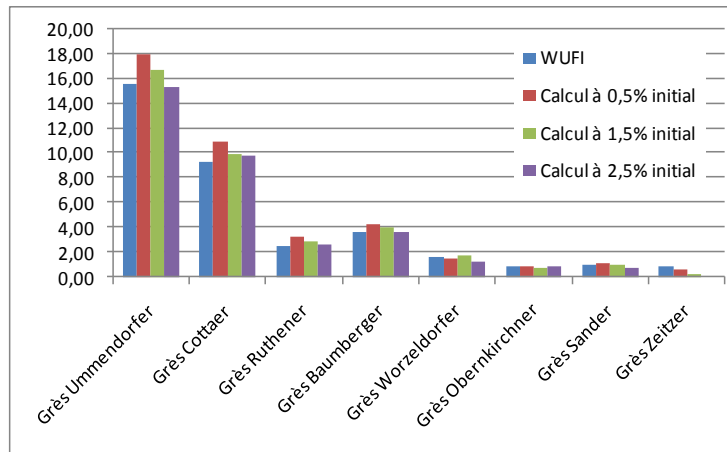
Pour cet échantillon, la valeur A peut varier de 0,9 à 4,7 kg/m².h^{1/2} selon les hypothèses. La méthode simplifiée donne A = 1,3 à 2,5 kg/m².h^{1/2}. L'intervalle de confiance est donc de -50% / +100% également. En tout état de cause, la valeur A est nettement supérieure à 0,2.



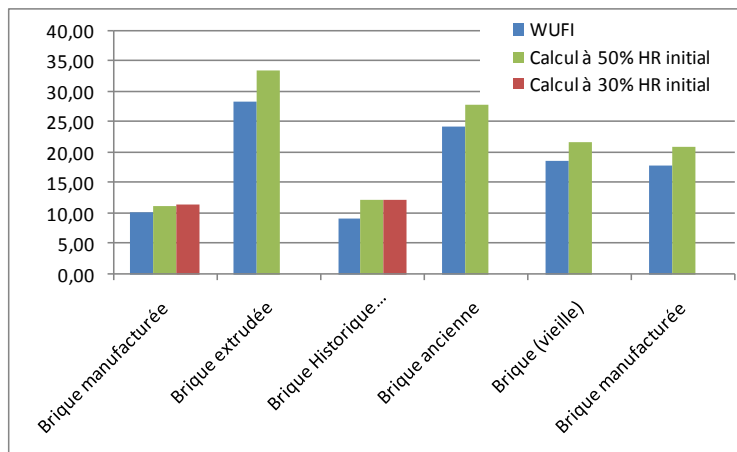
Exemple de courbe de corrélation (Calcaire 2, hypothèse $w(t=0) = 19$; wf = 40 et wf = 210)

L'incertitude sur wf et l'humidité initiale conduisent à une incertitude forte, mais l'approche simple avec le modèle A.racine(t) donne une valeur au centre de l'intervalle d'incertitude.

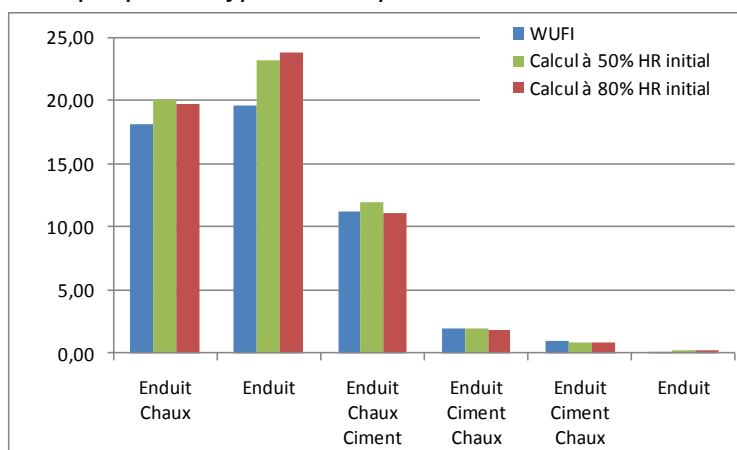
Voyant que la valeur absorption à 15min – absorption à 5min est au milieu des valeurs calculées pour ces deux échantillons, nous avons étudié par le calcul sur des pierres, briques et enduits bien documentés dans la base de données WUFI la corrélation entre cette valeur et la valeur A tabulée :



Valeur A calculée à partir de la base de données WUFI et valeur recalculée par le modèle d'absorption et la formule absorption à 15min – absorption à 5min pour différents Grès



Valeur A calculée à partir de la base de données WUFI et valeur recalculée par le modèle d'absorption et la formule absorption à 15min – absorption à 5min pour différentes briques (nb : w30 n'est connu que pour 2 types de briques, d'où l'absence de calcul pour les autres)



Valeur A calculée à partir de la base de données WUFI et valeur recalculée par le modèle d'absorption et la formule absorption à 15min – absorption à 5min pour différents enduits

La corrélation très correcte entre les valeurs pour chaque matériau testé nous permet de valider la méthodologie proposée.

Exemple de résultat de test à la pipe de Karsten avec la méthodologie proposée :

NB : le tableur utilisé pour ces tests est mis à disposition de tous avec ce rapport. Son usage est libre, en en citant la source.


Test 1 : calcaire dur (cf [analyse précédente](#))

Test à la pipe de Karsten



Tableau valable uniquement pour une pipette de diamètre 37mm.
Compléter les cases en jaune uniquement. Résultats en vert.

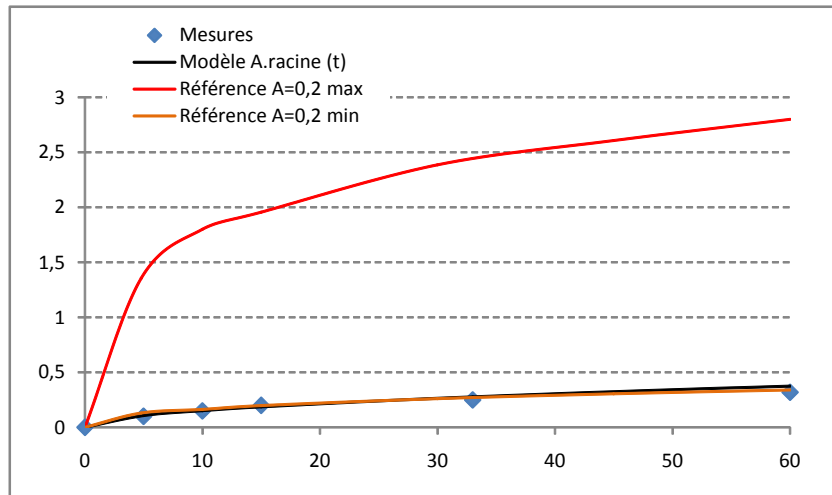
Outil réalisé par Enertech
Version du 10/08/2017

Echantillon :	Calcaire dur (nodule gris) Surface lisse, cassée en écaille.	Photo :	
Lieu :	Pont de Barret, enrochement		
Date :	09/08/2017		

Mesures

Modèle
 $A.t^{1/2}$

Temps (min)	ml	ml
0	0	0,00
5	0,1	0,11
10	0,15	0,15
15	0,2	0,19
33	0,25	0,28
60	0,32	0,37
100	0,5	0,48
160	0,6	0,61
188	0,65	0,66
210	0,7	0,70



Résultat :

Valeur A par la méthode 15-5 0,1 kg/m².h^{1/2}
 Valeur A par la méthode 15-5 interpolé 0,08 kg/m².h^{1/2}
 Facteur A méthode A.racine(t) 0,09 kg/m².h^{1/2}

Ces méthodes sur-estiment un peu le facteur A
Comparer également les points aux courbes de référence A=0,2.

NB : la courbe orange correspond à un matériau de $A=0,2 \text{ kg/m}^2.h^{1/2}$, avec une faible masse d'eau à saturation ($w_f=30 \text{ kg/m}^3$) et une humidité initiale très forte (80% de w_f).

La courbe rouge correspond à un matériau de $A=0,2 \text{ kg/m}^2.h^{1/2}$, avec une forte masse d'eau à saturation ($w_f=300 \text{ kg/m}^3$) et une humidité initiale nulle.

Test 2 : calcaire tendre (cf [analyse précédente](#))

Test à la pipe de Karsten



Tableau valable uniquement pour une pipette de diamètre 37mm.
Compléter les cases en jaune uniquement. Résultats en vert.

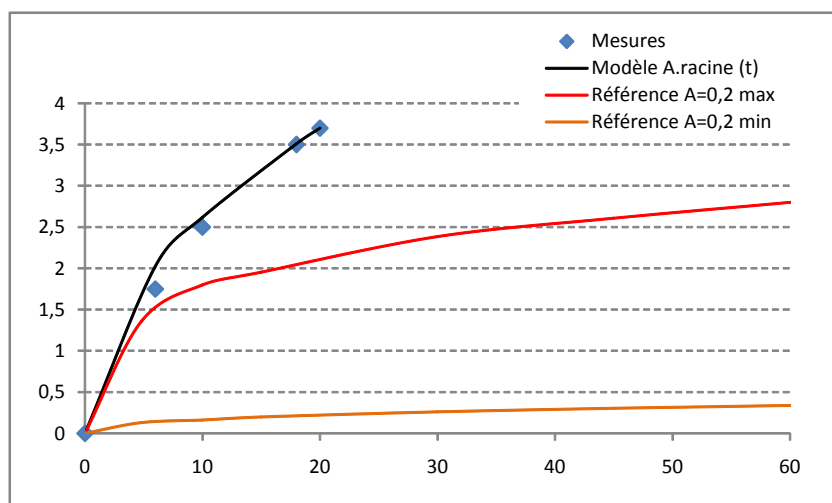
Outil réalisé par Enertech
Version du 10/08/2017

Echantillon :	Calcaire tendre (jaune) Surface un peu poudreuse, s'effrite.	Photo :	
Lieu :	Pont de Barret, enrochement		
Date :	09/08/2017		

Mesures

Modèle
 $A.t^{1/2}$

Temps (min)	ml	ml	ml
0	0	0	0,00
6	1,75		2,03
10	2,5		2,62
18	3,5		3,51
20	3,7		3,70



Résultat :

Valeur A par la méthode 15-5 2,5 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$
 Valeur A par la méthode 15-5 interpolé 1,35 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$
 Facteur A méthode A.racine(t) 1,49 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$

Ces méthodes sur-estiment un peu le facteur A

Comparer également les points aux courbes de référence A=0,2.

NB : la courbe orange correspond à un matériau de $A=0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$, avec une faible masse d'eau à saturation ($w_f=30 \text{ kg/m}^3$) et une humidité initiale très forte (80% de w_f).

La courbe rouge correspond à un matériau de $A=0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$, avec une forte masse d'eau à saturation ($w_f=300 \text{ kg/m}^3$) et une humidité initiale nulle.

Test à la pipe de Karsten



Tableau valable uniquement pour une pipette de diamètre 37mm.
Compléter les cases en jaune uniquement. Résultats en vert.

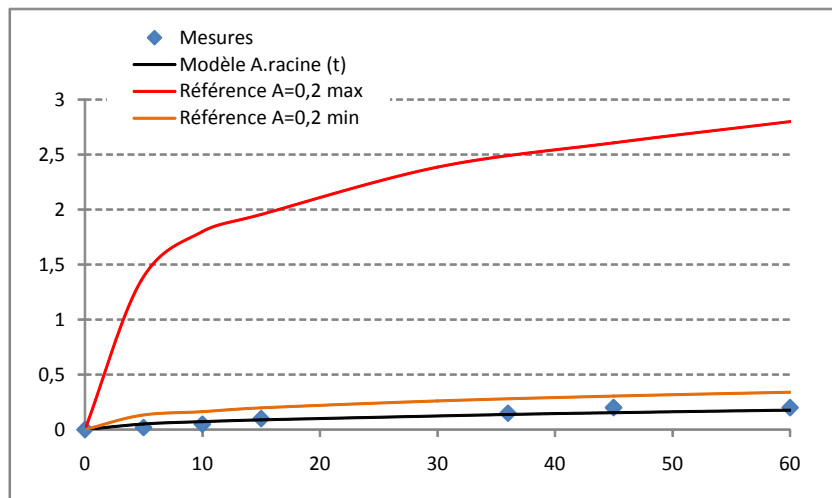
Outil réalisé par Enertech
Version du 10/08/2017

Echantillon :	Enduit à la chaux sur métal déployé et lame d'air. Enduit initial des bureaux, gratté.	Photo :	
Lieu :	Pont de Barret, bureaux façade Est		
Date :	10/08/2017		

Mesures

Modèle
 $A.t^{1/2}$

Temps (min)	ml	ml
0	0	0,00
5	0,02	0,05
10	0,05	0,07
15	0,1	0,09
36	0,15	0,14
45	0,2	0,15
60	0,2	0,18
120	0,25	0,25



Résultat :

Valeur A par la méthode 15-5	0,08 $\text{kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$
Valeur A par la méthode 15-5 interpolé	0,04 $\text{kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$
Facteur A méthode A.racine(t)	0,04 $\text{kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$

Ces méthodes sur-estiment un peu le facteur A
Comparer également les points aux courbes de référence A=0,2.

NB : la courbe orange correspond à un matériau de $A=0,2 \text{ kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$, avec une faible masse d'eau à saturation ($w_f=30 \text{ kg/m}^3$) et une humidité initiale très forte (80% de w_f).

La courbe rouge correspond à un matériau de $A=0,2 \text{ kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$, avec une forte masse d'eau à saturation ($w_f=300 \text{ kg/m}^3$) et une humidité initiale nulle.

Test à la pipe de Karsten



Tableau valable uniquement pour une pipette de diamètre 37mm.
Compléter les cases en jaune uniquement. Résultats en vert.

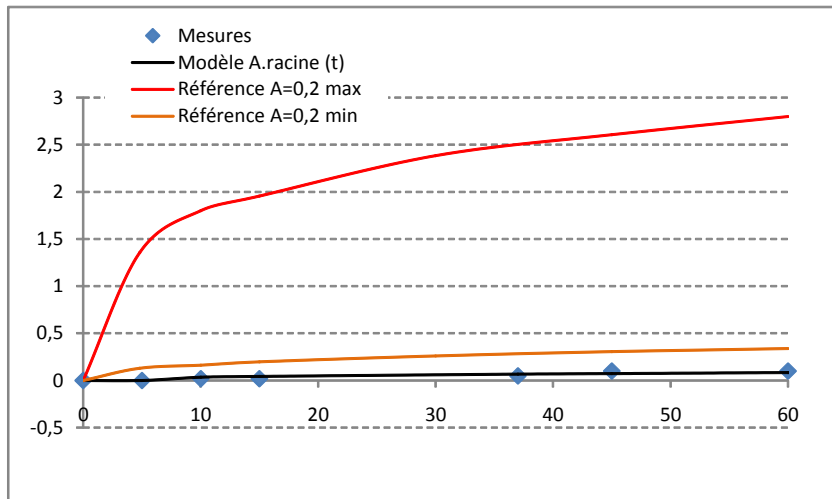
Outil réalisé par Enertech
Version du 10/08/2017

Echantillon :	Enduit à la chaux sur métal déployé et lame d'air. Enduit de réparation, plus souple et lisse.	Photo :	
Lieu :	Pont de Barret, bureaux façade Est		
Date :	10/08/2017		

Mesures

Modèle
 $A.t^{1/2}$

Temps (min)	ml	ml
0	0	0,00
5	0	
10	0,02	0,03
15	0,02	0,04
37	0,05	0,07
45	0,1	0,07
60	0,1	0,08
120	0,12	0,12



Résultat :

Valeur A par la méthode 15-5	0,02 $\text{kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$
Valeur A par la méthode 15-5 interpolé	0,02 $\text{kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$
Facteur A méthode A.racine(t)	0,02 $\text{kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$

Ces méthodes sur-estiment un peu le facteur A
Comparer également les points aux courbes de référence A=0,2.

NB : la courbe orange correspond à un matériau de $A=0,2 \text{ kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$, avec une faible masse d'eau à saturation ($w_f=30 \text{ kg/m}^3$) et une humidité initiale très forte (80% de w_f).


La courbe rouge correspond à un matériau de $A=0,2 \text{ kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$, avec une forte masse d'eau à saturation ($w_f=300 \text{ kg/m}^3$) et une humidité initiale nulle.

Test à la pipe de Karsten



Tableau valable uniquement pour une pipette de diamètre 37mm.
Compléter les cases en jaune uniquement. Résultats en vert.

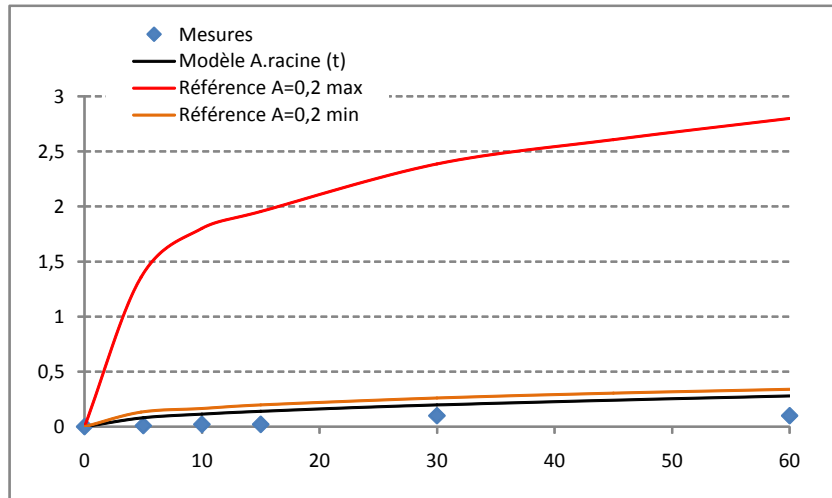
Outil réalisé par Enertech
Version du 10/08/2017

Echantillon :	Enduit ciment années 1980 Aspect taloché rugueux	Photo :	
Lieu :	Sauzet, maison Rieser		
Date :	10/08/2017		

Mesures

Modèle
 $A \cdot t^{1/2}$

Temps (min)	ml	ml
0	0	0,00
5	0,01	0,08
10	0,02	0,11
15	0,02	0,14
30	0,1	0,20
60	0,1	0,28
90	0,2	0,34
660	0,92	0,92



Résultat :

Valeur A par la méthode 15-5

0,01 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$

Valeur A par la méthode 15-5 interpolé

0,06 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$

Facteur A méthode A.racine(t)

0,06 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$

Ces méthodes sur-estiment un peu le facteur A.

Comparer également les points aux courbes de référence $A=0,2$.

NB : la courbe orange correspond à un matériau de $A=0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$, avec une faible masse d'eau à saturation ($w_f=30 \text{ kg/m}^3$) et une humidité initiale très forte (80% de w_f).

La courbe rouge correspond à un matériau de $A=0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$, avec une forte masse d'eau à saturation ($w_f=300 \text{ kg/m}^3$) et une humidité initiale nulle.