



Priorités scientifiques et techniques

Guide de recommandations
techniques HUMIBATex
Prise en compte des risques
hygrothermiques en réhabilitation
du bâti existant

HUMIBATex

ANR

Cerema

CETHIL
UMR 5008

LOCIE
Laboratoire d'Optique
et de Caractérisation
des Interfaces

LaSIE
CSTB
le futur en construction

VENTILAIRSEC
La ventilation dans le bon sens
ISOVER
SAINT-GOBAIN

aldes

CSTB
ÉDITIONS

**Guide de recommandations
techniques HUMIBATex
Prise en compte des risques
hygrothermiques en réhabilitation
du bâti existant**

Établissement public au service de l'innovation dans le bâtiment, le CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment exerce quatre activités clés : la recherche, l'expertise, l'évaluation, et la diffusion des connaissances, organisées pour répondre aux enjeux de développement durable dans le monde de la construction. Son champ de compétences couvre les produits de construction, les bâtiments et leur intégration dans les quartiers et les villes.

Avec plus de 900 collaborateurs, ses filiales et ses réseaux de partenaires nationaux, européens et internationaux, le CSTB est au service de l'ensemble des parties prenantes de la construction pour faire progresser la qualité et la sécurité des bâtiments.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille, 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).

COLLECTION RECHERCHE – EXPERTISE

**Guide de recommandations
techniques HUMIBATex
Prise en compte des risques
hygrothermiques en réhabilitation
du bâti existant**

Ce document a été rédigé par les partenaires du projet ANR « Bâtiment et villes durables », édition 2011, HUMIBATex (2012-2016), « Comment prédire les désordres causés par l'humidité ? Quelles solutions techniques pour rénover le bâti existant ? ».

Coordinateur du projet : CSTB

Contributeurs : ALDES, Cerema, CETHIL, CSTB, LaSIE, LOCIE, SAINT GOBAIN, VENTILAIRSEC

Couverture : Cerema

Photographies : Cerema fig. 3 et 4 p16

Nous remercions les partenaires du projet cités ci-dessous ayant participé à la rédaction de ce guide ainsi que leurs collaborateurs.

ALDES : Serge Buseyne

Cerema : Julien Borderon, Julien Burgholzer, Teddy Connan, Jordan Gauvrit, Sihem Tasca Guernouti

CETHIL : Abdelkrim Trabelsi

CSTB : Géraldine Garnier, Rofaida Lahrech, Claude Pompeo

SAINT GOBAIN : Jérôme Gilles

LaSIE : Mohammed Yacine Ferroukhi, Karim Limam

LOCIE : Simon Rouchier

VENTILAIRSEC : Mireille Rahmeh

Nous remercions également l'équipe Edition du CSTB pour le travail effectué en collaboration avec le binôme [Julien Borderon (Cerema) – Géraldine Garnier (CSTB)] pour éditer ce guide technique.

Contact : Coordinateur du projet, Géraldine Garnier (geraldine.garnier@cstb.fr)

Retrouvez l'ensemble des publications de la collection RECHERCHE – EXPERTISE sur www.cstb.fr

Sommaire

Introduction	7	Partie C	
Partie A		Méthode d'analyse	33
La réhabilitation des bâtiments.....	9	1. Généralités.....	35
1. Enjeux et réglementations.....	11	2. Les outils utilisés.....	35
1.1 Contexte législatif du bâtiment		2.1 Hypothèses des simulations effectuées	37
depuis 1850	11		
1.2 Les réglementations thermiques	13	Partie D	
1.3 La rénovation thermique		Recommandations sous forme	
et la qualité de l'air intérieur	14	de questions-réponses argumentées	43
1.4 Spécificités du bâti ancien	16	1. La gestion du climat intérieur	46
1.5 Une réhabilitation réussie d'un bâtiment		2. La paroi	64
existant : une approche globale	17	3. L'isolant	82
2. Objectifs et limites du guide	19	4. Le pare-vapeur	89
		5. Illustrations communes	
		aux quatre chapitres	95
Partie B		5.1 Illustration A : Paroi en pan	
Comprendre l'humidité et le transfert		de bois-torchis	96
d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment... 21		5.2 Illustration B : Paroi brique	101
1. Principes et phénomènes physiques	23	6. Conclusion	107
1.1 Grandeurs caractéristiques.....	23		
1.2 Diffusion de vapeur d'eau et transfert d'eau		Annexes	117
liquide par capillarité	24	1. Annexe 1 Étude de cas : paroi ancienne	
1.3 Mécanisme de fixation de l'humidité		en briques pleines	119
dans les matériaux poreux.....	24	2. Annexe 2 Bases de données matériaux	
1.4 Propriétés hygrothermiques.....	25	pour les simulation.....	131
2. Sollicitations intérieures et extérieures	27	3. Références bibliographiques	141
2.1 Climat intérieur	27		
2.2 Climat extérieur	28		
2.3 Impact de la perméabilité à l'air			
de l'enveloppe	29		
3. Causes et conséquences de la pollution de			
l'air intérieur.....	30		

Introduction

Ce guide de recommandations techniques pour la prise en compte des risques hygrothermiques en réhabilitation du bâti existant est constitué de 4 parties distinctes.

A – La réhabilitation des bâtiments

Cette partie fait un état des lieux du contexte réglementaire et traite de la démarche du guide pour répondre à la problématique de l'humidité dans les logements existants.

B – Comprendre l'humidité et le transfert d'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment

Cette partie propose une explication des différents phénomènes physiques se produisant dans un bâtiment existant ainsi que les conséquences liées à la modification de l'enveloppe. L'humidité et la perméabilité à l'air sont abordées de manière simplifiée pour une compréhension rapide. Les développements de risques potentiels dans le bâtiment avec leurs causes et conséquences sont exposés afin de sensibiliser à l'importance de la prise en compte de ces paramètres.

C – Méthode d'analyse

Cette partie a pour objectif de décrire la démarche utilisée pour définir les solutions de réhabilitation adaptées à différentes configurations de bâtiments existants. Les outils de simulations et la méthode d'analyse sont décrits. Les résultats obtenus sur les parois traitées (béton, brique, pierre, pan de bois-torchis) ont été analysés et sélectionnés pour mettre en évidence les éléments essentiels à prendre en compte lors d'une réhabilitation. Une étude de cas est présentée en annexe sur la paroi en brique pour démontrer le potentiel de la démarche de travail développé dans le projet HUMIBATex.

D – Recommandations sous forme de questions-réponses argumentées

Cette partie présente les principales recommandations pour réhabiliter un bâtiment existant et éviter les risques de pathologies liés à l'humidité. Elle a été rédigée sous forme de « Questions-Réponses » argumentées à l'aide de solutions techniques, résultats des simulations réalisées au cours du projet. Pour une meilleure cohérence, les questions ont été regroupées dans 4 chapitres :

CHAPITRE 1 – La gestion du climat intérieur

CHAPITRE 2 – La paroi

CHAPITRE 3 – L'isolant

CHAPITRE 4 – Le pare-vapeur

PARTIE A

La réhabilitation des bâtiments

L'effort d'économie d'énergie dans le secteur du bâtiment représente un des gisements les plus importants dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre (GES). Sur ce secteur, le renouvellement du parc de logement est de l'ordre de 1 % par an. Donc pour de nombreuses années, l'essentiel des résidences françaises sera composé de bâtiments déjà existants. Pour le secteur tertiaire le renouvellement est de l'ordre de 3 % par an. En première approche, nous pouvons considérer que le parc est constitué d'un tiers de bâtiments construits avant la seconde guerre mondiale, dits « bâtiments anciens », d'un tiers de bâtiments construits entre 1948 et 1975 et le troisième tiers construit après 1975. Le chemin vers la sobriété énergétique passe par des actions adaptées sur l'ensemble des bâtiments existants.

L'amélioration énergétique d'un bâtiment existant confronte les acteurs de la rénovation à différents problèmes. Le montage du projet dans le respect des réglementations (thermiques, de ventilation, etc.) se fait au cas par cas à l'aide des architectes, bureaux d'études, chefs de projet et autres professionnels du bâtiment qui étudient et proposent différentes solutions pour parvenir aux performances visées. Les problèmes majeurs pouvant survenir suite à une réhabilitation relèvent souvent de phénomènes liés à l'humidité et à la perméabilité à l'air dans le bâtiment. En modifiant l'enveloppe, tout le système du bâtiment est changé, en commençant par ses propriétés thermiques mais surtout son comportement vis-à-vis des transferts de vapeur d'eau. Selon une étude de l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Études Économiques), l'humidité est le problème le plus fréquemment rencontré au sein des logements français. Les problématiques d'humidité dans le bâtiment touchent plus de 25 % des logements en France d'après l'AQC (Agence Qualité Construction).

1. Enjeux et réglementations

1.1 Contexte législatif du bâtiment depuis 1850

Les lois et réglementations sur le bâtiment ayant beaucoup évolué dans le dernier siècle, une chronologie semble intéressante afin de comprendre l'évolution des modes constructifs.

- 1850 : première loi de salubrité publique concernant le logement ouvrier, droit aux municipalités de définir les travaux à effectuer pour assainir les logements.
- 1859 : les immeubles peuvent avoir cinq étages (20 m) en étant surmontés de combles brisés.
- 1889 : la société française des Habitations à Bon Marché (HBM) voit le jour.
- 1902 : renforcement des obligations sanitaires ; plafonnement des hauteurs à 31 m ; augmentation de profondeur des saillies et balcons et augmentation de la surface minimale des cours intérieures.
- 1906 : droit aux communes et départements de consacrer des prêts aux sociétés pour la construction de HBM. Obligation de disposer d'un conduit de fumée dans chaque cuisine et pièce à vivre.
- 1910 : crise du logement.
- 1918 : exonération des loyers pour les locataires dont le chef de famille est mobilisé par la guerre, création d'un délit de manque d'entretien et d'insalubrité.
- 1928 : programme de construction pour faire face à la crise du logement, 260 000 logements collectifs construits de 1928 à 1933.

- 1937 : règlement sanitaire de la ville de Paris, entrée d'air dans toutes les pièces disposant d'un appareil à combustion (1 dm^2) obligatoire, conduit de fumée dans chaque pièce principale, aération directe et permanente sur l'extérieur dans les cabinets d'aisance.
- 1939 : crise économique, le bâtiment est frappé de plein fouet.
- 1944 : création du Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme (MRU), outil de planification et de gestion pour intervenir dans la reconstruction du pays de manière dirigiste.
- 1948 : priorité au logement ; création du CSTB pour la mise au point de procédés industriels innovants.
- 1950 : les HBM deviennent les Habitations à Loyers Modérés (HLM).
- 1954 : plan « courant » fixant la construction de 240 000 logements par an.
- 1955 : apparition des conduits shunt, généralisation à toute la France du principe d'aération de 1937.
- 1957 : création des Zones à Urbaniser en Priorité (ZUP).
- 1958 : augmentation du plan de construction à 300 000 logements par an, forte industrialisation, normalisation et productivité. L'aération des logements est intégrée au Code de la Construction et de l'Habitation.
- 1969 : principe de la ventilation générale et permanente par balayage, apparition de la Ventilation Naturelle (VN) et de la Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC).
- 1970 : création de villes nouvelles pour faire face aux Zones à Urbaniser en Priorité (ZUP), ces dernières ont contribué à résorber les carences en logement mais n'ont pas permis la création de quartiers dynamiques.

■ *Réglementation bâtiments neufs :*

- 1974 : premier choc pétrolier. (Installation des premières VMC gaz).
- 1988 : RT 1988, la deuxième réglementation thermique s'applique aux bâtiments neufs résidentiels et non résidentiels.
- 2000 : RT 2000, réduction de la consommation maximale de 20 % des bâtiments résidentiels comparé à la RT 1988 et de 40 % pour le tertiaire.
- 2005 : RT 2005, amélioration de 15 % de la performance thermique du neuf, après différents arrêtés la réglementation s'étend aussi à la rénovation.
- 2006 : test d'infiltrométrie des bâtiments selon la norme NF EN 13829.
- 2012 : RT 2012, la consommation maximale d'une habitation neuve doit être de $50 \text{ kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2.\text{an}$ (modulée selon la région et l'altitude), perméabilité à l'air (indice $Q4P_{\text{a-surf}}$) de $0.6 \text{ m}^3/(\text{h}.\text{m}^2)$ en maison individuelle et $1 \text{ m}^3/(\text{h}.\text{m}^2)$ en bâtiment collectif.

■ *Réglementation bâtiments existants :*

- Un dispositif réglementaire mis en place en 2007 s'applique aux bâtiments résidentiels et tertiaires existants et vise à améliorer significativement la performance énergétique d'un bâtiment à l'occasion de travaux.
- Il existe deux types de réglementations pour les bâtiments existants, en fonction de l'année de construction de celui-ci, de sa surface et du montant des travaux entrepris : la RT « globale » ou la RT dite « élément par élément ».

1.2 Les réglementations thermiques

Dans le cadre du protocole de Kyoto en 1998, l'Europe s'est engagée à réduire de 8 % le niveau des émissions de gaz à effet de serre par rapport au niveau de 1990, pour la période 2008-2012. Afin de lutter contre le réchauffement climatique, la France a par ailleurs pris l'engagement de diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050 (loi POPE du 13 juillet 2005). Pour atteindre ces objectifs, la maîtrise de l'énergie consommée dans le secteur du bâtiment (le plus stratégique avec celui des transports) est indispensable.

Plus récemment, le Grenelle de l'environnement a fixé un objectif précis (réduction des consommations énergétiques des bâtiments de 38 % d'ici 2020) et des modalités concrètes dans le cadre du « plan bâtiment grenelle ». Ainsi, réglementairement :

- Depuis 2012, tous les nouveaux bâtiments sont à « basse consommation » (BBC). L'objectif chiffré étant de 50 kWh/m²/an en moyenne. En 2020, ils seront tous « à énergie positive » (BEPOS). Un label préfigurant ce nouveau palier est disponible depuis le 17 novembre 2016 : le label E+ C- pour une meilleure prise en compte de l'environnement et moins de dioxyde de carbone rejeté.
- Sur un ensemble de 31 millions de logements (dont 4,5 millions de logements sociaux, 7 millions de logements en copropriété et 18 millions de maisons individuelles), la loi Grenelle 1 fixe un rythme de 400 000 logements à rénover par an à compter de 2013 et 800 000 logements sociaux les plus énergivores à rénover d'ici 2020.
- Les bâtiments de l'État et de ses établissements publics doivent engager leur rénovation pour se montrer exemplaires.

Enfin, à l'automne 2015, la loi de transition énergétique a fixé comme objectif de rénover 500 000 logements par an. Cet objectif de massification pose nécessairement la question des pathologies liées à l'humidité.

D'un point de vue économique, le parc de bâtiments existants se caractérise par (Tableau 1) :

- son ancienneté (dans le tertiaire, la majorité du parc a été construite avant 1980 et dans le résidentiel avant 1975) (source : MELTLM, Compte logement 2002) ;
- sa forte capacité d'évolution (pour les logements, environ 45 % du parc est l'objet chaque année d'intervention pour l'amélioration ou l'entretien).

Tableau 1 : Répartition du parc de logements en France

	Logements construits avant 1948	Logements construits entre 1949 et 1975	Logements construits entre 1975 et 1998	Total
Part	33 %	33 %	34 %	29,6 millions

Les logements datant d'avant 1975 restent donc encore très perfectibles au niveau énergétique et représentent 75 % de la consommation d'énergie finale de chauffage. On estime par ailleurs que le parc existant aujourd'hui représenterait toujours 2/3 du parc de 2050 [Habitat et développement durable : bilan rétrospectif et prospectif, avril 2001]. Pour atteindre les objectifs français, l'essentiel de l'effort doit donc porter sur l'amélioration des bâtiments existants.

Paradoxalement, un manque de connaissances caractérise aujourd'hui le parc bâti existant. L'efficacité énergétique des bâtiments existants n'est réglementée en France que depuis 2007. Les modèles et les solutions techniques de rénovation sont encore pour la plupart à développer, en particulier pour le bâti ancien, qui emploie des matériaux et techniques particulières, qui sont abordés dans ce guide.

1.3 La rénovation thermique et la qualité de l'air intérieur

La Figure 1 présente l'évolution des réglementations thermique et aéraulique au cours du temps.

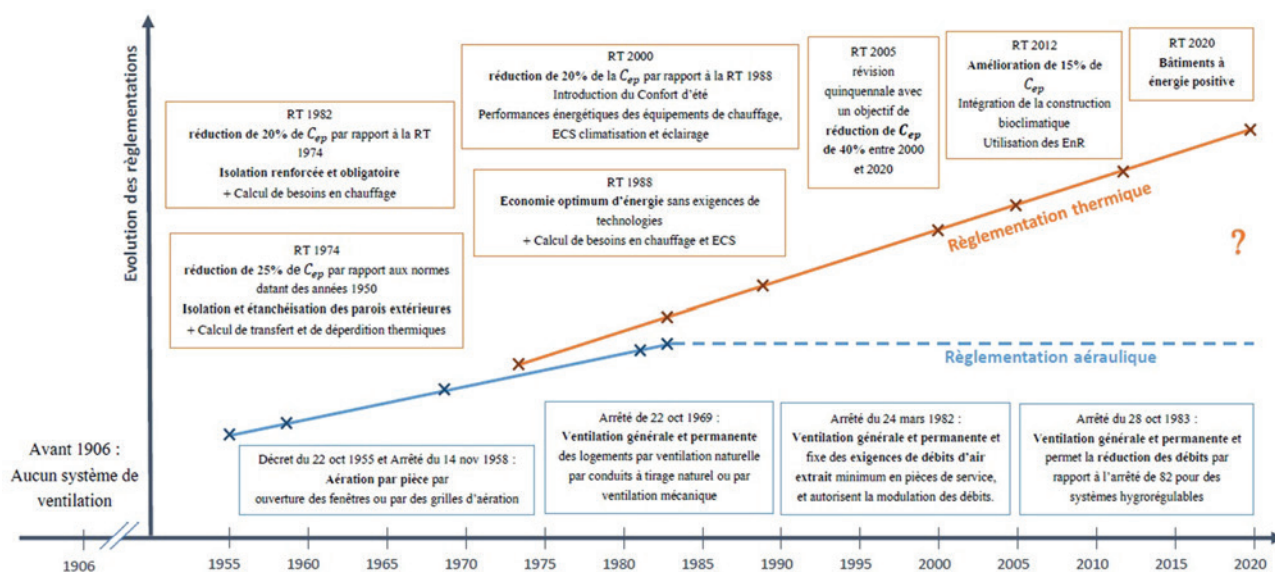


Figure 1 : Évolution des réglementations

La rénovation thermique d'un bâtiment peut aider à améliorer sa qualité d'air intérieur avec la pose d'un système de ventilation adapté, la suppression de zone de condensation sur des menuiseries simple vitrage ou des parois froides. Inversement, il est nécessaire d'être vigilant à ce que les actions de rénovation ou leur mise en œuvre ne dégrade pas cette qualité de l'air intérieur.

Une amélioration de l'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment réduit le renouvellement d'air naturel. Ainsi, les anciennes habitations, dans les mêmes conditions d'utilisation des systèmes de ventilation, sont mieux ventilées que les habitations neuves ou rénovées. Par conséquent, si les travaux de rénovation ne vérifient pas le bon fonctionnement et l'adéquation de la ventilation déjà existante ou ne prévoient pas un système adapté, la qualité de l'air à l'intérieur de l'habitation rénovée se dégrade. En conséquence, les polluants intérieurs s'accumulent et le taux d'humidité augmente, impactant ainsi la santé des occupants et la structure du bâtiment.

La ventilation constitue par ailleurs une dimension incontournable de la performance énergétique des bâtiments. Si elle n'est pas maîtrisée (ventilation naturelle mal conçue ou par simple ouverture des fenêtres), le débit d'air peut être alors très important et par conséquent augmenter les déperditions énergétiques. L'installation d'un système performant, adapté aux besoins et récupérant éventuellement l'énergie ou utilisant des sources renouvelables, permet de réduire encore sensiblement ces déperditions.

Globalement, les points de vigilance liés à la ventilation sont donc les suivants :

- Veiller à conserver ou à apporter un renouvellement d'air suffisant après rénovation. En effet, avant travaux des infiltrations d'air existaient et celles-ci contribuaient à ce renouvellement. Le changement des menuiseries et ou l'isolation vont considérablement réduire ces infiltrations.
- Veiller à ne pas installer un système d'isolation qui laisserait des zones intérieures ou des éléments de parois dans des conditions de température et d'humidité favorisant le développement de moisissures (ceci sera largement développé dans la suite).

Citons ici un extrait du rapport de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire (ANSES) sur le sujet (Figure 2) :

Le terme « moisissures » fait référence dans le langage courant aux taches apparaissant entre autres sur les aliments ou dans l'habitat, correspondant à un stade avancé de développement de champignons microscopiques. Des conditions favorables sont nécessaires pour leur développement dans les environnements intérieurs, notamment la présence d'humidité dans différents éléments du bâti (les cloisons, la matière isolante, les faux plafonds, etc.) qui peuvent être de natures différentes (carton, papier, tissu, etc.).

Il existe une très grande variété d'espèces fongiques (probablement plusieurs millions) qui se développent dans différentes conditions. Les moisissures produisent des structures de reproduction appelées spores ou conidies qui, une fois libérées, se retrouvent principalement en suspension dans l'air et assurent la dispersion des moisissures. En mycologie, le mode de production des spores, observé directement au microscope, est le principal élément d'identification des genres et espèces fongiques. Les moisissures sont aussi capables de synthétiser des substances chimiques (mycotoxines, composés organiques volatils microbiens (COVM)) qui sont contenues dans les spores ou libérées directement dans l'air.

À noter que ces moisissures peuvent, dans certains cas, avoir un impact sur la santé des occupants du bâtiment.



Figure 2 : Rapport de l'ANSES sur l'impact des moisissures dans le bâti de juin 2016 (consultable sur : <https://www.anses.fr/en/system/files/AIR2014SA0016Ra.pdf>)

1.4 Spécificités du bâti ancien

Parmi le parc bâti existant, présenté ci-dessus, une typologie particulière peut être distinguée. Il s'agit du bâti ancien, qui se trouve situé à la croisée de plusieurs enjeux (Figures 3 et 4).

■ Enjeux environnementaux

Le bâti ancien, de par son niveau de consommation énergétique moyen, doit contribuer à l'atteinte des objectifs nationaux de réduction des consommations énergétiques et d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et s'inscrire dans le vaste chantier de la rénovation du parc existant.

■ Enjeux culturels

Une grande partie de notre patrimoine architectural est constituée par les bâtiments d'avant 1948 qui ne sont pas, pour la plupart, protégés par des dispositifs spécifiques (secteurs sauvegardés, etc.). Leur réhabilitation induit nécessairement une problématique de conservation et de mise en valeur.



Source : STAP 67

Figure 3 : Illustration des enjeux culturels associés à la perte de valeur architecturale après réhabilitation énergétique (photographies avant et après travaux)

■ Enjeux techniques

Le bâti ancien présente des particularités constructives et un comportement physique très différent des constructions modernes. En particulier, sa forte sensibilité à l'humidité peut induire des risques de pathologies après une réhabilitation énergétique inadaptée (moisissures, condensation interne, etc.)



Source Cerema

Figure 4 : Illustration des enjeux techniques associés aux risques de pathologie après réhabilitation énergétique – Pourriture du bois observée après dépose d'un isolant

Au travers de ces différents enjeux, il apparaît que le bâti ancien nécessite une approche spécifique, intégrant bien d'autres enjeux que la seule performance thermique.

Pour conclure, la problématique pour les acteurs de la rénovation du bâtiment va consister alors à concevoir et à mettre en œuvre des solutions de rénovation thermique adaptées au bâti considéré, en prenant en compte en particulier l'humidité, dans un souci de préservation du patrimoine mais également de confort et de risques sur la santé des occupants.

Au-delà d'un certain seuil, l'humidité peut en effet être responsable entre autres d'assèchement, de condensation ou encore de moisissures. La préservation des composants de l'enveloppe repose sur un équilibre hygrothermique des parties qui le constituent. Toute décision et exécution de travaux qui déplace cet équilibre et favorise la mise en contact des matériaux et de l'ouvrage avec un excès d'eau peut être à l'origine de désordres. Notamment, une isolation thermique des parois mal conçue, mal dimensionnée ou mal mise en œuvre peut perturber l'équilibre hygrothermique des parois et générer des condensations superficielles et internes à l'origine de pathologies structurelles. Ces travaux d'isolation peuvent également augmenter les déperditions par les ponts thermiques existants, provoquant ainsi des refroidissements de la structure, source de condensation. En ce sens, ces travaux sont « pathogènes ».

Dans le cadre de rénovations énergétiques à grande échelle, la problématique de l'humidité dans les bâtiments existants et plus particulièrement ceux considérés comme anciens nécessite donc une attention toute particulière.

Pour répondre à l'ensemble de ces enjeux, il s'agit bien aujourd'hui d'intégrer dans les choix de travaux de réhabilitation :

- la prise en compte des transferts thermiques, aérauliques, et de vapeur d'eau ;
- la prédiction des dégradations et désordres potentiels pour mieux les éviter et ne pas subir leurs impacts sur la santé des habitants voire sur la durabilité du bâti lui-même.

1.5 Une réhabilitation réussie d'un bâtiment existant : une approche globale

Une approche globale de la réhabilitation est nécessaire. L'objectif vise un bâti sain et durable, porteur d'une architecture patrimoniale, confortable et énergétiquement sobre en dépassant le seul enjeu de réduction des consommations énergétiques de chauffage et d'eau chaude sanitaire (Figure 5).



Figure 5 : Les cibles de l'approche globale de la réhabilitation

Cette approche permet d'aller vers des solutions d'amélioration du bâti avec une réduction des consommations énergétiques tout en préservant la valeur patrimoniale d'éléments remarquables, sans dégrader le confort d'été et en améliorant le confort le reste de l'année en traitant par exemple les effets de parois froides. Les solutions issues de cette approche responsable sont prévues pour être compatibles avec le comportement hygrothermique des parois existantes et permettre le débit de renouvellement d'air hygiénique. Enfin, l'analyse en coût global permet de prendre en compte la durée de vie des solutions et les besoins en maintenance.

Pour réussir ce challenge, un diagnostic complet, conciliant les aspects techniques, architecturaux et énergétiques est l'outil nécessaire pour servir de base à la recherche des enjeux du bâtiment et la définition de solutions de réhabilitation adaptées (Figure 6).



Figure 6 : Les éléments de diagnostic pour la réhabilitation

Le diagnostic technique et architectural établit l'évolution du bâtiment ; il analyse l'existant par la détermination des points forts et des points faibles pour l'état de santé, l'état fonctionnel et l'état patrimonial du bâtiment. Sur l'état de santé, les désordres sont répertoriés et les causes doivent être recherchées. Sur l'état fonctionnel, l'environnement extérieur, l'organisation intérieure et le confort des occupants sont les thèmes explorés. Enfin, l'état patrimonial permet de faire une analyse des matériaux, de la volumétrie, du mode constructif, des éléments remarquables et des priorités de conservation.

Le diagnostic énergétique permet d'évaluer la situation énergétique existante en termes de consommation par usage, de performance du bâti, de performance des équipements, d'usage des occupants et de qualité d'air intérieur.

Dans la suite de cet ouvrage, l'accent est mis sur la durabilité de solutions de traitement des parois opaques dans l'objectif d'atteindre la baisse des besoins énergétiques. Le cœur de l'analyse est dédié au comportement hygrothermique du complexe « parois existantes et matériaux rapportés ».

2. Objectifs et limites du guide

Les éléments présentés dans ce guide sont issus des travaux de recherche appliquée du projet HUMIBATex de l'Agence Nationale de la Recherche. Ils ont pour objectifs de donner des indications à toute personne concernée par la réhabilitation de bâtiment existant sur la question délicate de la prise en compte des risques hygrothermiques.

Les limites de ce traitement par simulations peuvent être regroupées ainsi :

- Les propriétés des matériaux simulés, anciens ou neufs, sont figées dans la simulation et ne subissent pas le vieillissement potentiel de la réalité. Ces propriétés génériques pour les familles de matériaux ne sauraient correspondre exactement à l'immense diversité des produits présents pour le bâti existant et sur le marché des produits de construction.
- Tous les codes de calcul utilisés sont basés sur la mise en équation et le traitement numérique de phénomènes physiques. Le processus est basé sur des hypothèses, certains phénomènes non impactants dans le cas général peuvent ne pas être pris en compte. Pour des cas particuliers, cela peut entraîner des pertes de précision non négligeables des résultats.
- Enfin, le panel de configurations simulées se veut le plus large possible mais un certain nombre de cas ne sont tout de même pas couverts ; notamment des points singuliers qui pourraient présenter des comportements hygrothermiques différents des parties courantes et des autres points singuliers modélisés. Certaines typologies de parois en pierre n'ont également pas été étudiées ici.

Les champs d'investigation de ces travaux se limitent principalement aux solutions d'isolation par l'intérieur. De plus, la grande diversité des possibilités ne saurait être couverte par suffisamment de simulations ; aussi des regroupements thématiques ont été effectués. Les résultats et les analyses des différentes configurations étudiées ne sont valables que dans le cadre des hypothèses correspondantes et ne pourront être généralisés sans les précautions nécessaires.

PARTIE B

**Comprendre l'humidité
et le transfert d'humidité
à travers l'enveloppe
du bâtiment**

Cette partie est dédiée aux lecteurs souhaitant comprendre les grandeurs physiques en œuvre dans l'équilibre hygrothermique des parois.

1. Principes et phénomènes physiques

1.1 Grandeurs caractéristiques

1.1.1 L'humidité relative de l'air

L'air humide est constitué d'air sec et de vapeur d'eau. L'humidité relative HR (%) correspond au rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau p_v (Pa) et sa pression de vapeur saturante $p_{v,sat}$ (Pa) à la même température. Elle est définie par l'équation (1) :

$$HR = \frac{p_v}{p_{v,sat}} \quad (1)$$

La fonction exprimant la variation de la pression de vapeur saturante en fonction de la température (équation (2)) est valide pour une température comprise entre 0 et 80 °C avec une précision de $\pm 0,15\%$ ⁽¹⁾ :

$$p_{v,sat} = \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{T - 37,58}\right) \quad (2)$$

Où T est la température (K).

1.1.2 La teneur en eau d'un matériau

Elle permet de quantifier la quantité d'eau dans un matériau donné. En pratique, on définit une teneur en eau massique ou volumique. La teneur en eau massique U (%) représente le rapport entre la masse d'eau liquide m_l (kg_{eau}) et la masse de la matrice solide m_s (kg_{solide}). Elle est donnée par l'équation (3) :

$$U = \frac{m_l}{m_s} \quad (3)$$

La teneur en eau volumique θ_l (%) est définie par le rapport entre le volume d'eau liquide V_l (m^3_{eau}) et le volume apparent V_0 (m^3) par l'équation (4) :

$$\theta_l = \frac{V_l}{V_0} \quad (4)$$

Enfin, on définit la teneur en humidité ρ^m (kg/m^3) comme étant le rapport entre la masse d'eau en phase liquide et vapeur et le volume apparent par équation (5) :

$$\rho^m = \frac{m_l + m_v}{V_0} \quad (5)$$

1. Peuhkuri, "Moisture Dynamics in Building Envelopes."

1.2 Diffusion de vapeur d'eau et transfert d'eau liquide par capillarité

Le transport de la vapeur d'eau dans un milieu se fait par diffusion sous gradient de pression partielle de vapeur d'eau. Le flux de vapeur est proportionnel au gradient de pression de vapeur et à la perméabilité à la vapeur. Cette dernière caractérise le matériau vis-à-vis des transferts de vapeur par diffusion et constitue une propriété indispensable pour évaluer le comportement hygrothermique de l'enveloppe.

Le déplacement d'eau liquide dans l'enveloppe se fait par capillarité où la vitesse d'écoulement, exprimée par la loi de Darcy, est proportionnelle au gradient de pression capillaire et à la conductivité hydraulique. Cette propriété, élevée, proche de la saturation, dépend directement de l'état hydrique de la paroi. La gravité ajoute une composante verticale au flux d'eau liquide. Dans les pores de petites dimensions, cette influence peut être négligée devant les efforts de la pression de succion. Dans les pores de plus grandes dimensions, l'apparition d'eau sous forme liquide a lieu à des niveaux d'humidité relative très élevés. L'effet de la gravité est alors fréquemment négligé.

1.3 Mécanisme de fixation de l'humidité dans les matériaux poreux

La fixation de l'humidité est régie par deux phénomènes : l'adsorption et la condensation capillaire. L'importance de ces deux phénomènes dépend de la taille des pores d'une part, et du niveau d'humidité relative d'autre part. Ainsi, on peut considérer que si le rayon moyen des pores est inférieur à 100 nm, l'adsorption et la condensation capillaire seront importantes, tandis qu'un rayon moyen supérieur à 100 nm cause une condensation capillaire et une adsorption plus faible.

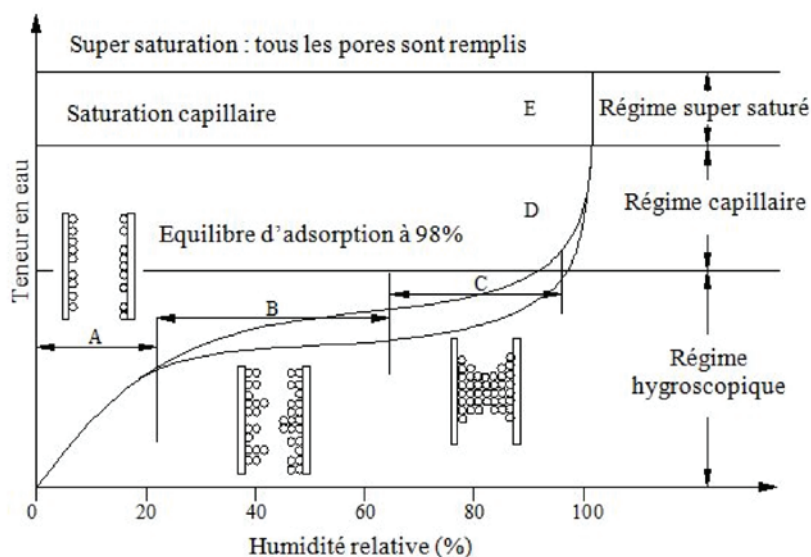


Figure 1 : Illustration des différents mécanismes de transfert et de rétention de l'humidité isotherme dans les matériaux poreux du bâtiment

Source : Qin, Menghao. « Étude des phénomènes de transfert hygrothermiques dans les parois des bâtiments », Université de La Rochelle, 2007.

On peut distinguer trois types de régimes selon la gamme d'humidité relative⁽²⁾ (Figure 1) :

- Le régime hygroscopique (région A-B-C) : Dans la zone A, une seule couche d'eau recouvre la surface des pores, c'est la phase d'adsorption mono-moléculaire. Le seul mode de transfert possible est la diffusion gazeuse. Dans la zone B, le transfert en phase gazeuse reste dominant. La surface des pores est recouverte de couches moléculaires superposées. Enfin, dans la zone C, il y a augmentation de l'épaisseur de la couche d'eau avec l'augmentation de l'humidité relative ce qui conduit à l'apparition de ponts liquides entre les parois des pores. Le phénomène de condensation capillaire se produit alors en entraînant le remplissage des pores de petits diamètres.
- Le régime capillaire (région D) : Ce régime est caractérisé par une phase capillaire continue et une forte perméabilité liquide. Ainsi, le transfert se fait principalement en phase liquide provoqué par des forces capillaires. C'est la pression capillaire qui gouverne le mouvement.
- Le régime super saturé (région E) : Cet état peut être atteint par succion après une longue durée d'immersion dans l'eau, durée nécessaire pour la dissolution de l'air dans l'eau. En laboratoire, cet état peut être atteint par succion sous pression : on tend alors vers un état où tous les pores sont remplis d'eau. À partir de ce régime, il n'y a plus d'autres états d'équilibre, l'humidité relative est toujours égale à 100 %.

1.4 Propriétés hygrothermiques

Les assemblages de matériaux constituant les parois verticales existantes, avant travaux de réhabilitation, ont des propriétés hygrothermiques propres qui ont une influence importante sur le comportement après réhabilitation.

Les caractéristiques hygriques principales des matériaux sont au nombre de trois : la résistance à la diffusion de vapeur d'eau, l'hygroscopicité et la capillarité.

1.4.1 Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau

Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ (-) et l'épaisseur de lame d'air équivalente (S_d en m) :

- μ caractérise la capacité du matériau à empêcher son franchissement par la vapeur d'eau. Plus un matériau est étanche à la vapeur d'eau, plus le μ est élevé. Par convention, on considère que l'air immobile possède un coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau $\mu = 1$.
- En pratique, l'épaisseur de lame d'air équivalente (S_d en m) remplace le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur (μ sans unité). Ces deux grandeurs sont reliées par la relation suivante :

$S_d = \mu * e$ où e est l'épaisseur (en mètres) du matériau en question.

Le S_d rend mieux compte de la capacité du matériau mis en œuvre à se laisser traverser par la vapeur, puisqu'il tient compte de l'épaisseur de ce dernier. Il est également plus simple à appréhender : 1 cm d'un matériau de $\mu = 10$ s'oppose au passage de la vapeur d'eau comme 10 cm d'air immobile.

Ainsi, un matériau disposant d'un μ élevé mais mis en œuvre en faible épaisseur peut éventuellement aussi bien résister au passage de la vapeur d'eau qu'un matériau disposant d'un μ plus faible mais mis en œuvre avec une épaisseur plus importante. C'est la raison pour laquelle le classement par coefficient de résistance à la diffusion de vapeur peut différer de celui par épaisseur équivalente d'air.

2. Qin, « Étude des phénomènes de transfert hygrothermiques dans les parois des bâtiments »

1.4.2 L'hygroscopicité

L'hygroscopicité est la capacité du matériau à pouvoir stocker de l'eau en son sein lorsqu'il est mis en contact avec de l'air humide. Ceci est la résultante d'un phénomène physique (dit de condensation capillaire) qui fait que la vapeur d'eau contenue dans l'air peut se condenser dans les micropores des matériaux. Ce phénomène dépend de l'importance de la microporosité et de l'humidité relative de l'air. Un matériau faiblement hygroscopique, compte tenu de la nature grossière de sa porosité, ne présente pas de capacité à provoquer la condensation de la vapeur d'eau de l'air, même si cet air est très humide.

La teneur en eau de référence W80 (kg/m^3) est la teneur en eau d'équilibre du matériau lorsqu'il est maintenu dans une ambiance ayant une humidité relative de 80 %. Cette valeur constitue un bon moyen d'évaluer le caractère hygroscopique du matériau. Concrètement, plus un matériau est hygroscopique, plus son W80 est élevé. Des matériaux ayant des pores très fins favorisent la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air ce qui augmente leur W80. Plus précisément, l'hygroscopicité d'un matériau est représentée par l'aire sous la courbe de son isotherme de sorption (Figure 1).

1.4.3 La capillarité

Le coefficient d'absorption liquide A ($\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$) : il caractérise la capacité du matériau à absorber de l'eau liquide par capillarité en première approche, c'est-à-dire lorsqu'il est mis en contact avec un plan d'eau. Plus un matériau est capillaire, plus son coefficient A est élevé. Ce paramètre est, lui aussi, fonction de la nature porométrique du matériau.

D'un point de vue macroscopique, l'hygroscopicité caractérise en effet le volume disponible pour stocker de l'eau liquide, tandis que la capillarité caractérise la quantité de flux entrant et la quantité de flux sortant et donc le volume d'eau mobilisé lorsque le matériau est placé à son contact.

Au niveau microscopique, d'autres phénomènes plus complexes interviennent, liés à la nature porométrique du matériau.

Remarque :

Un matériau peut être à la fois très capillaire et hygroscopique ou peu capillaire et très hygroscopique.

1.4.4 Le cas des matériaux anciens

Le Tableau 1 donne des indications quant au comportement général de différents matériaux anciens.

Tableau 1 : Indications sur les propriétés des matériaux constituant souvent la base des parois anciennes

	Hygroscopicité	Résistance à la vapeur d'eau	Capillarité
Pisé	Élevée	Moyenne	Moyenne
Brique de terre cuite	Moyenne	Moyenne	Élevée
Pierre dure	Faible	Élevée	Faible
Pierre tendre (comme le tuffeau)	Moyenne	Moyenne	Élevée
Mortier chaux	Moyenne	Moyenne	Élevée
Bois	Élevée	Moyenne	Faible
Torchis	Élevée	Moyenne	Moyenne

On constate donc que dans le bâti ancien, les matériaux sont relativement hygroscopiques et perméables aux transferts de vapeur. Néanmoins, la sensibilité de ces matériaux à l'humidité dépend du type constructif et d'éléments tels que la présence de bois par exemple.

2. Sollicitations intérieures et extérieures

Le bâtiment est le siège de nombreuses interactions avec l'eau. Les parois du bâtiment sont globalement toujours en contact avec l'eau sous sa forme vapeur ou liquide. La présence d'eau dans les parois d'un bâtiment peut avoir de nombreuses origines :

1. Les remontées capillaires.
2. La pluie.
3. La vapeur d'eau émise dans les pièces humides (cuisine, douche, etc.) ou par les occupants (respiration).
4. Les sources d'eau accidentelles (liées à des fuites dans les réseaux).
5. Les fuites d'air et les ponts thermiques.
6. L'eau contenue dans les matériaux.

2.1 Climat intérieur

Les occupants produisent de la vapeur d'eau par leur métabolisme et leurs activités. Le niveau de production varie selon qu'il s'agit d'un adulte ou d'un enfant, et selon si la personne est éveillée ou endormie ainsi que selon le type d'activité⁽³⁾. Le Tableau 2 présente une estimation du taux de production selon l'activité des occupants.

Tableau 2 : Taux de production de vapeur d'eau par les occupants⁽⁴⁾

Type d'activité	Production eau
Travail domestique	100 à 400 g/h
Activité sédentaire	55 à 250 g/h
Sommeil/repos	25 à 60 g/h
Douche	300 g
Bain	600 g
Cuisine et lessive	1 à 5 kg/jour

Une classe est attribuée à chaque local selon son exposition à l'humidité intérieure telle que la montre le Tableau 3. La classe d'un local doit impérativement être considérée lors de sa conception car il faut que les parements intérieurs soient conçus pour résister aux sollicitations hydriques.

Tableau 3 : Classement des locaux selon l'exposition à l'humidité⁽⁵⁾

Classe	Description	Contact eau	Types
EA	Locaux secs ou faiblement humides	Eau : seulement pour entretien/nettoyage. Parois non exposées à l'eau	Chambres, bureaux, etc.
EB	Locaux moyennement humides	Eau : entretien/nettoyage Rejaillement possible	Salle de classe, cuisine, WC, etc.
EB+	Locaux humides à usage privatif	Eau : entretien/nettoyage Ruissellement possible	Salle d'eau privative avec douche, baignoire
EB+	Locaux humides à usage collectif	Eau : lavage au jet Ruissellement prévu en exploitation	Douche individuelle à usage collectif, laverie collective (hôtel), etc.
EC	Locaux très humides en ambiance non agressive	Eau : entretien/nettoyage Ruissellement quasi continu	Douche collective à usage collectif, centre aquatique, etc.

3. Source : Annexe 27-Evaluation and demonstration of domestic ventilation systems handbook. Mansson, Lars-Göran. IEA ECBCS Annex 27. 2002.

4. Guide technique transferts d'humidité à travers les parois (CSTB, 2009).

5. Normes NF DTU 25.41 ; 36.2 ; 25.42 ; 31.2 selon la composition et la mise en place de la paroi verticale et calcul des transferts normes NF EN ISO 13788 et NF EN 15026.

2.2 Climat extérieur

Le climat extérieur joue un rôle clé dans le comportement hydrique de la paroi. En plus de la température et de l'hygrométrie de l'air extérieur, le rayonnement solaire, la pluie et les remontées d'eau contenue dans le sol sont des paramètres à prendre en compte.

Le rayonnement solaire favorise le séchage de la paroi, surtout en été. Il peut créer des gradients de pression partielle en direction du cœur de la paroi, notamment suite à un épisode pluvieux. Son impact est fonction de l'orientation et de la situation de la paroi.

Dans les constructions, le processus physique de capillarité s'exerce de façon naturelle, continue et spontanée de sorte que l'interface sol-pierre et les assises des soubassements correspondent à un horizon où règne un état permanent de saturation partielle en eau. Les fluctuations du climat (pluie, variations saisonnières des nappes, condensation, etc.) alliées à des phénomènes d'alimentation en eau des pierres dus à l'architecture (rejaillissement, fuites, etc.) participent encore à accroître l'humidité dans les maçonneries. Ces sources d'eau ont des conséquences très importantes sur les constructions car elles ne sont jamais chimiquement pures : elles correspondent à des solutions enrichies en sels minéraux et en matières organiques diverses. En fonction des propriétés capillaires et de la structure de la porosité des substrats considérés, les solutions qui percolent peuvent générer des altérations irréversibles (dissolution, pulvérulences, desquamations, etc.).

Une bonne partie de l'eau de pluie qui arrive sur un bâtiment est évacuée par la toiture. Mais une partie de cette pluie peut atteindre les parois verticales. Celles-ci reçoivent de l'eau de pluie directement poussée par le vent suivant l'exposition de la paroi par rapport aux vents dominants et suivant la force des vents (pluie battante). En partie basse des bâtiments, les parois peuvent être en contact de l'eau de pluie par ruissellement et par projection. Ces différents phénomènes accroissent la quantité d'eau qui transite par les parois. Ces différentes quantités d'eau doivent être évacuées sous peine d'augmenter le taux d'humidité et la teneur en eau des différents constituants du mur puis de l'air ambiant.

2.3 Impact de la perméabilité à l'air de l'enveloppe

L'effet du vent, par les variations de pression qu'il engendre sur les façades, crée une surpression et une dépression de part et d'autre du bâtiment, ce qui accentue les échanges aérauliques avec l'extérieur.

Le tirage thermique (ou effet de cheminée) est un mouvement d'air provoqué par une différence de densité de l'air entre deux espaces voisins. Ce phénomène est dû à une différence de température ou de teneur en eau des deux masses d'air. L'air chaud étant moins dense s'élève et entraîne une légère surpression dans la partie supérieure du bâtiment, ce qui provoque une légère dépression en partie basse. Cet effet se produit dans tous les bâtiments où la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est importante.

Le vent et le tirage thermique étant des phénomènes naturels dépendant du climat local et des caractéristiques du bâtiment, il est difficile de les quantifier et de les contrôler. Néanmoins, ils ont un effet non négligeable sur le renouvellement d'air et sur le bon fonctionnement du système de ventilation utilisé.

Par conséquent, pour un fonctionnement optimum, le transit d'air parasite doit être minimisé en réduisant la perméabilité à l'air de l'enveloppe du bâtiment.

Celle-ci, influence également le confort hygrothermique qui est défini comme élément essentiel du bien-être des occupants. L'ambiance intérieure est caractérisée par la température de l'air, des parois, le taux d'humidité relative et les mouvements de l'air ambiant. Les infiltrations d'air perturbent ces caractéristiques en créant des courants d'air traversant et des effets de paroi froide.

Afin d'éviter les problèmes liés à l'humidité, il est nécessaire de garantir une bonne étanchéité à l'air lors de la rénovation thermique d'un bâtiment tout en prévoyant un système de ventilation adapté aux besoins et permettant d'apporter de l'air neuf, éventuellement propre et préchauffé en hiver.

3. Causes et conséquences de la pollution de l'air intérieur

La pollution de l'air intérieur devient une problématique de plus en plus importante dans les logements. Cette pollution provient de différents facteurs qui sont présentés sur la figure ci-dessous, selon leur récurrence (Figure 2).

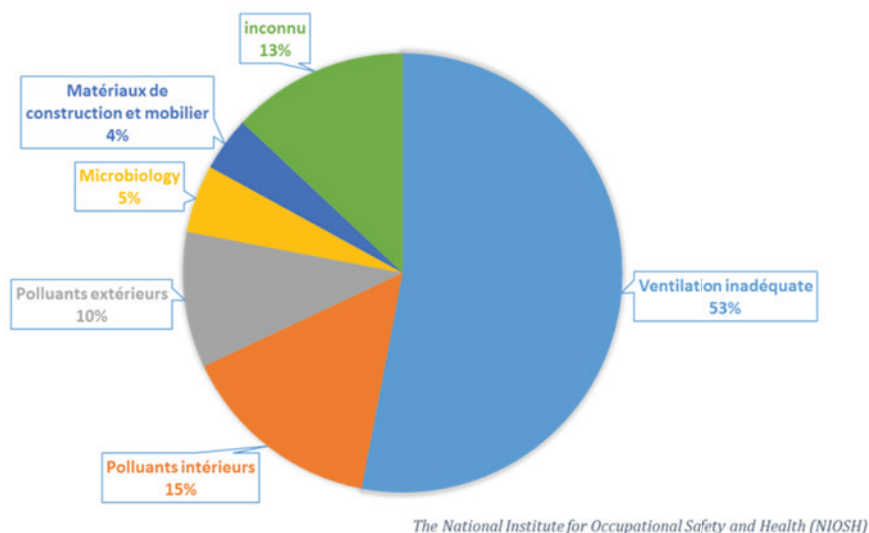


Figure 2 : Les causes de la mauvaise qualité de l'air intérieur dans les logements⁽⁶⁾

Les sources de pollution sont multiples : les produits de construction et de décoration, les ameublements, les produits d'entretien, les désodorisants d'intérieur ainsi que les pratiques des habitants (tabagisme, cuisine, séchage du linge, etc.) émettent des substances nocives variées. Les polluants couramment rencontrés à l'intérieur des habitations sont des substances chimiques, biologiques, radioactives et encore des particules aéroportées et fibreuses. Les plus courants sont les formaldéhydes⁽⁷⁾, oxydes d'azote (NOx), composés organiques volatils (COV), composés organiques semi-volatils (hydrocarbures aromatiques), ainsi que des polluants particulaires et fibreux (amiante, fibres minérales artificielles, etc.).

Au cours de ces dernières années les études sur les effets de la pollution de l'air intérieur et sur la santé des occupants se sont multipliées. Auparavant, on ne considérait que les problèmes respiratoires et cardiovasculaires mais les études épidémiologiques récentes s'intéressent aussi à l'influence de la pollution sur le système nerveux⁽⁸⁾ et sur les fonctions cognitives⁽⁹⁾. De plus, elles prennent en considération l'âge de la population. Par exemple, l'exposition à certains polluants durant la grossesse augmente le risque de développer des allergies et de l'asthme chez l'enfant, plus tard dans sa vie⁽¹⁰⁾.

Les symptômes de SBM « syndrome du bâtiment malsain » sont les premiers et principaux impacts sanitaires de la plupart des polluants produits à l'intérieur : maux de tête, irritation cutanée ou des muqueuses nasales ou oculaire et des voies aériennes, toux, nausées, vomissements, vertiges, difficultés à se concentrer, fatigue et diminution de la sensibilité olfactive.

6. Institut national pour la sécurité et la santé au travail. <https://www.cdc.gov/niosh/>

7. Classé cancérigène de catégorie 2 par le règlement CLP (règlement CE n° 1272/2008) mais aussi classé cancérigène de catégorie 1 (cancérigène avéré pour l'homme) par le Centre International de Recherche sur le Cancer de l'Organisation Mondiale de la Santé (CIRC, 2004).

8. Genc et al., "The Adverse Effects of Air Pollution on the Nervous System."

9. Van Kempen et al., "Neurobehavioral Effects of Exposure to Traffic-Related Air Pollution and Transportation Noise in Primary Schoolchildren."

10. Baiz et al., "Maternal Exposure to Air Pollution before and during Pregnancy Related to Changes in Newborn's Cord Blood Lymphocyte Subpopulations. The EDEN Study Cohort."

En plus de ces symptômes, le monoxyde de carbone réduit la capacité du sang à transporter l'oxygène en se fixant sur l'hémoglobine des globules rouges. Cela peut induire des troubles dans la respiration, la vision et le fonctionnement du cerveau. Le dioxyde de soufre, l'oxyde d'azote et l'ozone peuvent, eux, affecter le système respiratoire (toux, sécrétion de mucus) et les fonctions pulmonaires. À des niveaux extrêmement élevés, ces polluants peuvent causer des pertes de connaissance, le coma puis la mort.

L'exposition à un mélange de COV, d'après l'EPA (agence gouvernementale des États-Unis pour l'environnement), entraînerait de la gêne olfactive, des maux de tête et un malaise général⁽¹¹⁾. De plus, certains COV sont considérés cancérigènes pour l'homme (ex. le benzène et le chlorure de vinyle) et peuvent être la raison de la poly-sensibilité chimique (ex. pesticides)⁽¹²⁾.

Enfin, la pollution particulaire est suspectée d'être responsable d'une réponse inflammatoire au niveau des poumons et des crises d'asthme. Elle pourrait aussi aggraver la bronchite chronique en maintenant une inflammation des voies aériennes. De plus, elle augmente le risque de cancer des poumons et peut impacter le système reproductif. Des études récentes montrent que l'exposition sur le long terme, à des niveaux bien au-dessous de la limite annuelle recommandée par l'OMS ($PM_{2.5} < 10 \mu g.m^{-3}$), peut causer le décès. La dernière étude réalisée⁽¹³⁾ a permis de relier les particules aux mortalités cardiovasculaire et respiratoire ainsi qu'aux problèmes respiratoires chez les enfants.

La Figure 3 résume les impacts sanitaires clés de la pollution de l'air et les principaux contaminants responsables.

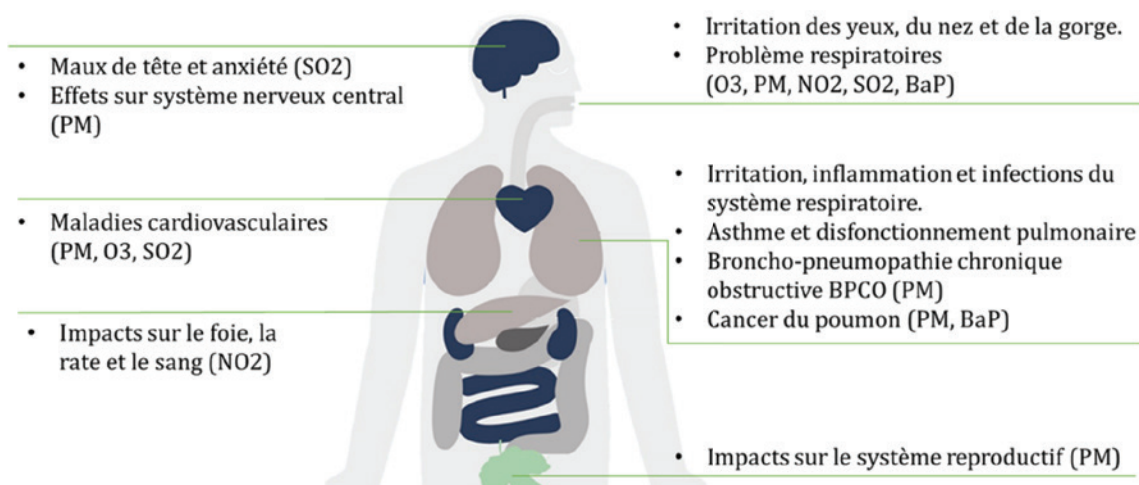


Figure 3 : Impacts sanitaires de la pollution de l'air ⁽¹⁴⁾

L'humidité à l'intérieur du bâtiment n'est pas un polluant en soi mais elle est souvent à l'origine des problèmes de qualité de l'air intérieur (QAI) et de la détérioration du bâtiment. Elle favorise ainsi la pollution biologique, les moisissures, les acariens et les allergènes domestiques qui sont responsables des problèmes respiratoires et entraînent des manifestations allergiques et parfois des infections pulmonaires chez les personnes prédisposées.

Afin de réduire les problèmes de qualité de l'air intérieur (QAI) et de santé cités plus haut, il est indispensable de renouveler l'air à l'intérieur du bâtiment pour évacuer les polluants dont l'humidité. La ventilation doit être permanente dans les logements avec des débits d'air à la fois suffisants pour garantir une bonne qualité de l'air intérieur, et contrôlés pour maîtriser les pertes de chaleur par renouvellement d'air.

11. Otto et al., "Neurobehavioral and Sensory Irritant Effects of Controlled Exposure to a Complex Mixture of Volatile Organic Compounds."

12. ASHRAE, Indoor Air Quality Guide: Best Practices for Design, Construction, and Commissioning.

13. WHO, "Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution – REVIHAAP Project."

14. EEA, "Air Quality in Europe — 2013 Report."

PARTIE C

Méthode d'analyse

1. Généralités

Cette partie a pour objectif de décrire la démarche utilisée pour définir les solutions de réhabilitation adaptées à différentes configurations de bâtiments existants. Les outils de simulations et la méthode d'analyse sont décrits. Les résultats obtenus sur les parois traitées (béton, brique, pierre, pan de bois-torchis) ont été analysés et sélectionnés pour mettre en évidence les éléments essentiels à prendre en compte lors d'une réhabilitation. Une étude de cas est présentée sur la paroi en brique pour démontrer le potentiel de la démarche de travail développée dans le projet HUMIBATex.

2. Les outils utilisés

La plateforme de simulation, comprenant plusieurs outils de simulations, s'est construite en s'appuyant sur les outils habituellement utilisés par chacun des partenaires et a conduit à deux choix possibles :

- soit un module spécifique a été développé pour réaliser un calcul simultané et couplé des transferts à l'échelle de la paroi avec l'environnement intérieur (co-simulation) ;
- soit le couplage entre l'environnement intérieur et la paroi est mené par chaînage simple. Dans ce cas, la simulation est réalisée en deux temps : dans un premier temps l'ambiance intérieure est calculée à l'aide d'un premier outil de simulation. Dans un second temps, la simulation à l'échelle de la paroi est réalisée en utilisant pour l'ambiance intérieure les résultats de la première simulation.

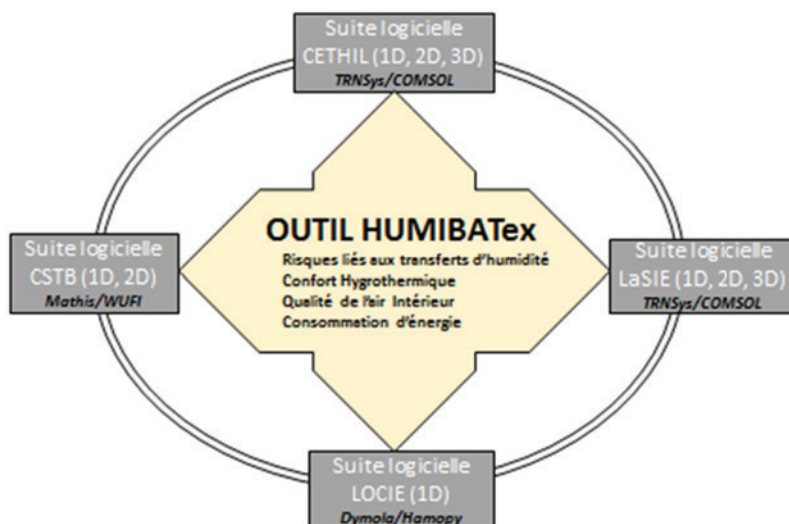


Figure 1 : Organisation de la plateforme de simulation HUMIBATex à partir des suites logicielles définies par chaque partenaire

L'ensemble des partenaires s'est donc inscrit dans cette démarche. Afin d'alimenter la plateforme, chacun a partagé son propre environnement de simulation, constitué d'une suite logicielle comprenant différents modules et de leurs connexions en s'appuyant sur les outils logiciels qu'il a l'habitude d'utiliser en respectant les deux critères suivants :

1. Permettre le calcul des variables nécessaires à la détermination d'indicateurs pour répondre aux objectifs du projet.

- Permettre la prise en compte des données communes et partagées sur les caractéristiques du bâtiment à modéliser, son environnement intérieur et extérieur selon le cahier des charges établi pour ces données.

L'outil HUMIBATex a pu répondre aux exigences du guide de recommandations techniques pour la réhabilitation du bâtiment. Chaque suite logicielle de simulation a été utilisée pour répondre à des besoins spécifiques ; les plateformes peuvent travailler à des granularités différentes et apporter des réponses communes ou complémentaires.

Un plan d'expérience des simulations pour la réalisation du guide a été défini pour une utilisation pertinente des plateformes (Figure 2).

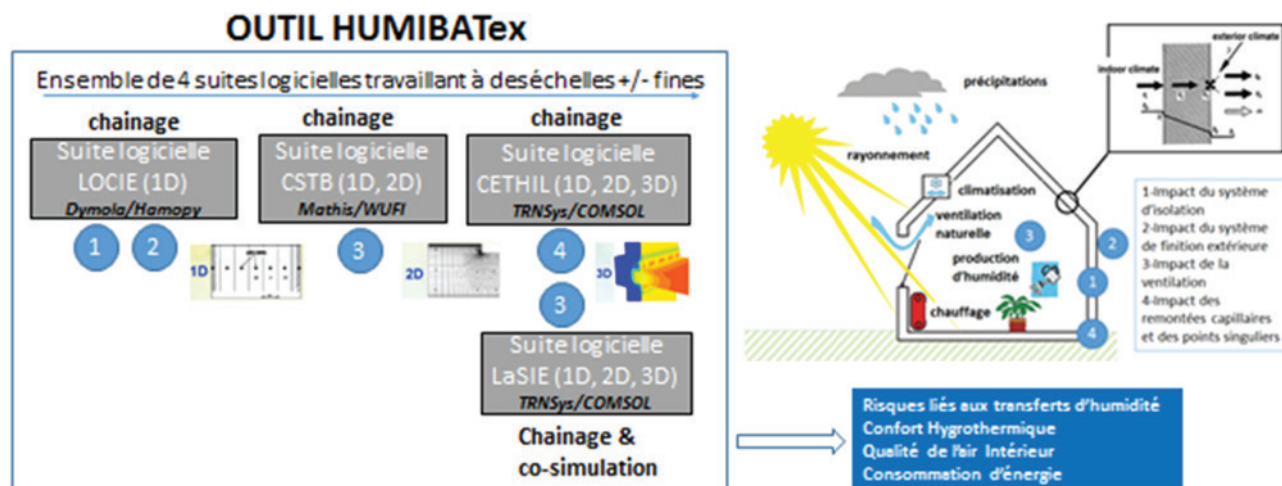


Figure 2 : Schéma global du positionnement

L'utilisation de l'ensemble des suites logicielles proposées par les partenaires pour la réalisation d'une partie du programme de simulations a permis d'en vérifier le fonctionnement et d'affiner les données d'entrée pour partager les mêmes hypothèses.

2.1 Hypothèses des simulations effectuées

2.1.1 Parois étudiées

Tableau 1 : Les configurations de parois de base étudiées

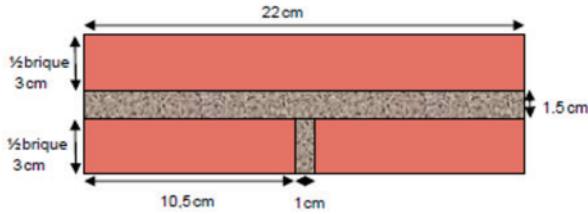
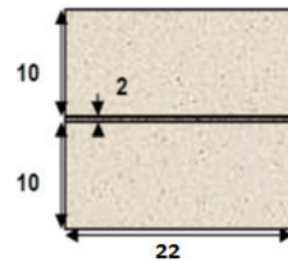
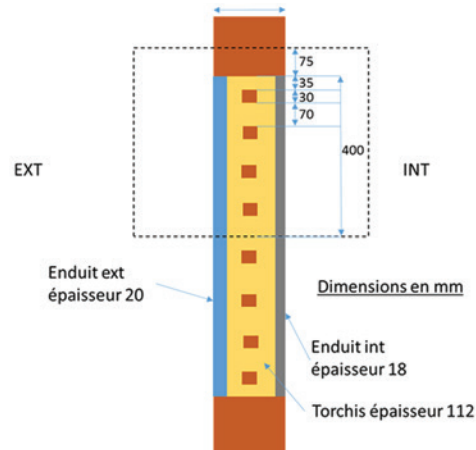
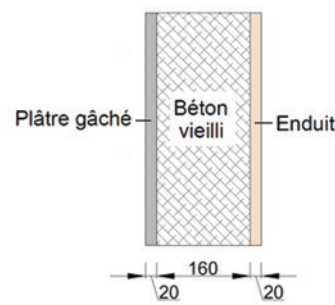
	Description	Enduit extérieur	Mur	Enduit intérieur
Paroi en brique	Il s'agit d'un mur en brique de format dit « français » : 220*105*60 mm	Enduit perméable à la vapeur : 2 cm Enduit étanche à la vapeur : 1 cm Pas d'enduit extérieur		Enduit plâtre : 2 cm
Paroi en pierre tendre	Il s'agit d'un mur en pierre de calcaire très tendre de dimension 22 cm d'épaisseur par 20 cm montées avec des joints fins de mortier perméable de 2 cm d'épaisseur	Pas d'enduit extérieur		Pas d'enduit intérieur
Paroi en pan de bois et torchis	Le torchis est considéré comme homogène sur une épaisseur de 11,2 cm avec une pièce de bois au cœur de 3 par 3 cm (pièce secondaire, les pièces de bois primaires du colombage apparaissent en traversant (poutre de section carrée de 15 cm)	Enduit perméable à la vapeur : 2 cm		Enduit plâtre : 1,8 cm
Paroi en béton vieilli	La paroi de base homogène en béton vieilli a une épaisseur de 16 cm. La hauteur de la partie de paroi modélisée est de 10 cm	Enduit étanche à la vapeur : 0,8 cm		Enduit à base de plâtre : 2 cm

Figure 5 : Schéma de la paroi en pan de bois et torchis

En profitant des symétries, la partie modélisée est la partie entourée de pointillés.

2.1.2 Solutions d'isolation étudiées

Tableau 2 : Solutions d'isolation étudiées

Matériau isolant	Pare-vapeur	Parement	Finition intérieure
Isolant perméable à la vapeur : 15 cm	Pas de pare-vapeur Pare-vapeur $S_d = 18$ m Frein-vapeur hygro-variable	Plaque de plâtre	Peinture non étanche (effet considéré comme neutre)
Isolant étanche à la vapeur : 15 cm	Pas de pare-vapeur Pare-vapeur $S_d = 18$ m Frein-vapeur hygro-variable	Plaque de plâtre	Peinture non étanche (effet considéré comme neutre)
Correction thermique directement sur l'ancienne finition intérieure : 6 cm	/	Enduit intérieur perméable : 1 cm	/

À noter que l'épaisseur de 15 cm pour les isolants a été choisie pour respecter le R de 3,7 K.m²/W demandé par les aides financières 2016.

2.1.3 Les matériaux considérés et leurs propriétés

Chaque matériau possède des caractéristiques physico-chimiques uniques qui influenceront sur les transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi. Dans le cadre du projet HUMIBATex, un grand panel de matériaux constitutifs a été caractérisé afin d'établir une base de données accessible à tous (Annexe 2).

Ce projet s'est donc appuyé sur les résultats obtenus lors de la tâche 3 du projet « Caractérisation des matériaux nécessaires aux données d'entrées des modèles ».

Tableau 3 : Propriétés des matériaux traités

Type de matériau	Propriétés physiques				
	Masse volumique ρ [kg/m ³]	Porosité ε [-]	Chaleur spécifique C_p [J/(kg.K)]	Conductivité thermique λ [W/(m.K)]	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ [-]
Terre cuite – brique	1800	0,3	850	0,7	11
Terre crue	1620	0,27	830	0,59	10
Pierre tendre	1920	0,25	720	1,8	15
Pierre dure	2500	0,1	1000	2,8	10000
Torchis	1500	0,3	1000	0,4	6
Bois ancien	650	0,7	1600	0,14	150
Béton	2200	0,18	850	1,6	100
Isolant étanche	30	0,95	1500	0,035	50
Isolant perméable non-hygroscopique	50	0,95	850	0,032	1,1
Isolant perméable hygroscopique	55	0,95	2100	0,038	2
Plaque de plâtre	850	0,65	850	0,2	10
Enduit perméable	1600	0,3	850	0,7	7
Enduit étanche	2000	0,3	850	1,2	25
Plâtre gaché	1300	0,49	850	0,9	8
Mortier de chaux	1600	0,3	850	0,7	7
Pare-vapeur	130	0,001	2300	2,3	18000
Pare-pluie	130	0,001	2300	2,3	100

2.1.4 Climats

Les conditions aux limites considérées pour les simulations correspondent, du côté extérieur, aux fichiers météo provenant de la base de données METEONORM. Trois zones climatiques ont été considérées H1 (Nancy), H2 (La Rochelle) et H3 (Nice), référencées dans la RT 2012.

Côté intérieur, deux types de climats ont été considérés :

- Climat intérieur normal : humidité relative avec une production de vapeur proche de $W/n = 5 \text{ g/m}^3$ (DTU) et/ou équivalent à la norme EN 15026 et/ou à une simulation thermohygro-aéraulique négligeant l'interaction avec l'enveloppe sur le plan hydrique.
- Climat intérieur sévère : humidité relative avec une production de vapeur nettement supérieure à $W/n = 5 \text{ g/m}^3$ avec des pics de saturation dans la journée : type salle de bains mal ventilée.

2.1.5 Indicateurs

Les indicateurs permettent d'analyser les résultats (Tableau 4) et visent à analyser un état physique par rapport aux résultats des simulations. Les indicateurs seuls ou combinés permettent ensuite d'évaluer les risques pour la paroi simulée.

Tableau 4 : Descriptif des indicateurs

Indicateurs	Indicateur 1 : condensation en surface	Indicateur 2 : développement fongique	Indicateur 3 : condensation aux interfaces	Indicateur 4 : développement fongique pour les biosourcés	Indicateur 5 : dégradation thermique
Caractéristiques	Moment où de la condensation apparaît sur la surface intérieure du mur	Relation liant l'humidité relative et la température qui permet de statuer sur le développement fongique sur la surface intérieure	Valeur d'humidité relative à partir de laquelle de la condensation apparaît à la liaison entre deux matériaux	Teneur en eau des matériaux biosourcés à partir de laquelle un développement fongique est susceptible d'apparaître	Dégradation moyenne maximale de la conductivité thermique de l'isolant sur 24 h
Limites	$HR \geq 98 \%$	Si $HR \geq 0,033$ $T^2 - 1,5T + 96$ (°C) pendant 8 semaines par an avec à minima une semaine en continu ⁽¹⁾	$HR \geq 98 \%$ aux interfaces	$w \geq 24 \%$ en masse pendant 8 semaines par an avec à minima une semaine en continu ou $w \geq 30 \%$ ponctuellement	

1. Hens H. Fungal defacement in buildings, a performance related approach. International Journal of Heating Ventilation Air conditioning Refrigeration Res 1999; 5(3) : 265-89.

À partir de ces indicateurs, des pictogrammes A-B-C-D-E (Tableau 5) ont été définis pour permettre de déterminer la viabilité d'une solution. En effet, si l'un des pictogrammes est actif, la solution peut amener certains risques jusqu'à rendre la solution non viable.

Tableau 5 : Descriptif des pictogrammes définis à partir des indicateurs du tableau 4

Pictogrammes	A	B	C	D	E
Définition du pictogramme	Teneur en eau dans le mur existant	Teneur en eau et dégradation de l'isolant	Comportement du parement intérieur	Condensation interne et développement fongique	Gel côté extérieur
Caractéristiques	Stabilisation de la teneur en eau dans le temps et taux d'humidité max pour le mur existant	Condensation dans l'isolant et dégradation thermique	Développement fongique et condensation du parement intérieur	Développement fongique des matériaux biosourcés et à l'interface de l'isolant	Condensation et température négative aux interfaces
Limites	Equilibre hygrothermique : l'écart doit être inférieur à 2 % d'une année à l'autre après 10 ans. $HR \leq 95 \%$ dans le mur existant	Indicateur 3 Indicateur 5 : $\lambda \geq 5 \%$ de variation sur un hiver ou $\geq 1,05 * \lambda_{sec}$	Indicateur 2	Indicateur 2 (pour le plâtre gâché) et indicateur 4	Si $HR \geq 98 \%$ et $T \leq 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Pour une meilleure compréhension, ces indicateurs sont illustrés par la figure 7.

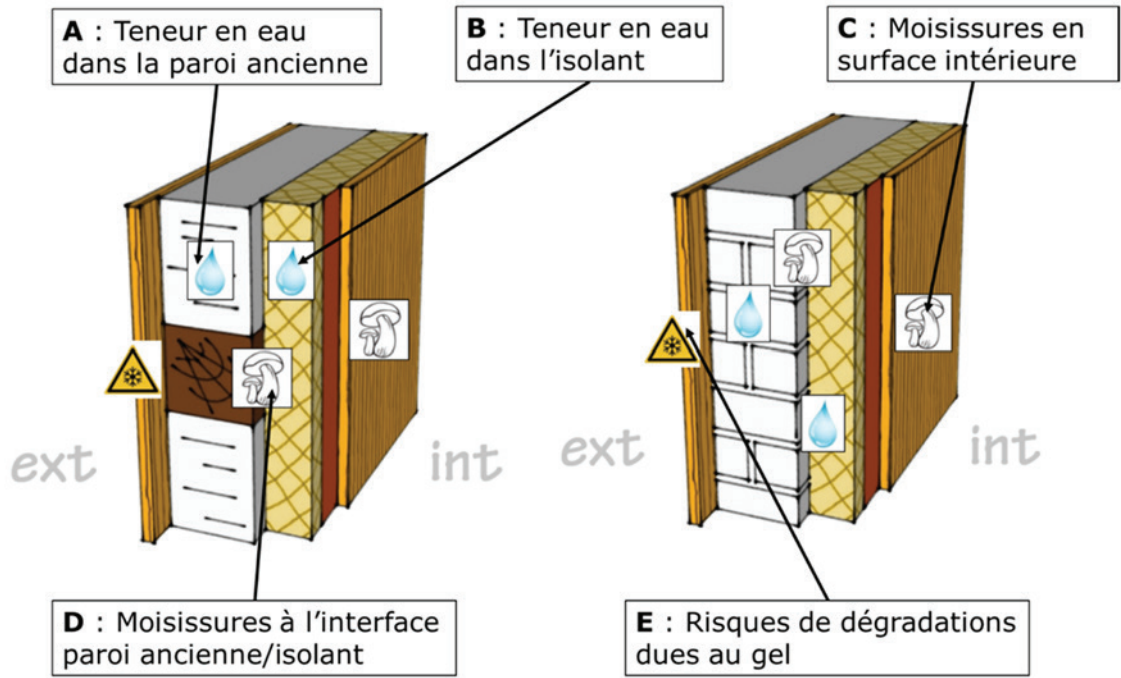


Figure 7 : Description des 5 indicateurs analysés

2.1.6 Les simulations effectuées

Pour répondre au mieux aux différentes questions que tout un chacun se pose lors de la réhabilitation d'un logement, les participants à cette étude ont élaboré une liste de cas de figure à simuler afin de montrer les risques hygrothermiques associés à chacun des paramètres.

Ces paramètres concernent :

- Les conditions aux limites que sont les températures et humidités de part et d'autre de la paroi :
 - En se basant sur les simulations afin de déterminer la température et l'humidité intérieures en fonction :
 - de la pièce,
 - de l'activité humaine,

- du taux d'occupation,
- de la ventilation ;
- suivant différents climats extérieurs obtenus à partir du logiciel « METEONORM ».
- Les caractéristiques des produits :
 - Produits isolants hygroscopiques ou non hygroscopiques.
 - Produits de structure plus ou moins hygroscopique.
 - Enduit extérieur plus ou moins étanche aux transferts de vapeur d'eau.
- Le système d'isolation par l'intérieur ou par l'extérieur.
- La présence ou non d'un pare-vapeur.

L'ensemble de ces variables conduit à un nombre important de simulations. Le Tableau 6 liste les différentes variables retenues.

Tableau 6 : Liste des paramètres retenus

Paroi support	Système d'isolation	Finition extérieure	Ventilation	Pare-vapeur	Climats extérieurs
Briques	Perméable non hygroscopique	Perméable	Aucune	Avec	H1
	Perméable hygroscopique	Étanche	Simple flux extraction	Sans	H2
	Étanche		Simple flux insufflation	Hygrovariable	H3
	Sans isolant		Double flux		
Pierre tendre	Perméable non hygroscopique	Perméable	Aucune	Avec	H1
	Perméable hygroscopique	Étanche	Simple flux extraction	Sans	H2
	Étanche		Simple flux insufflation	Hygrovariable	H3
	Sans isolant		Double flux		
Béton	Perméable non hygroscopique		Aucune	Avec	H1
	Perméable hygroscopique		Simple flux extraction	Sans	H2
	Étanche		Simple flux insufflation	Hygrovariable	H3
	Sans isolant		Double flux		
Pan de bois-torchis (6 %)	Perméable non hygroscopique	Perméable	Aucune	Avec	H1
	Perméable hygroscopique	Étanche	Simple flux extraction	Sans	H2
	Étanche		Simple flux insufflation	Hygrovariable	H3
	Sans isolant		Double flux		

La combinaison de tous ces paramètres aboutirait à un total de 1 152 simulations.

Dans le cadre de cette étude 423 simulations ont été réalisées.

L'étude d'un cas complet est présenté en annexe 1.

PARTIE D

**Recommandations sous forme
de questions-réponses
argumentées**

Cette partie présente les principales recommandations pour réhabiliter un bâtiment existant et éviter les risques de pathologies liées à l'humidité. Elle a été rédigée sous forme de « Questions-Réponses » argumentées à l'aide de solutions techniques, résultats des simulations réalisées au cours du projet. Pour une meilleure cohérence, les questions ont été regroupées dans 4 chapitres :

- 1 – La gestion du climat intérieur (Questions 1-2-3)
- 2 – La paroi (Questions 4-5-6-7)
- 3 – L'isolant (Questions 8-9-10)
- 4 – Le pare-vapeur (Questions 11-12)

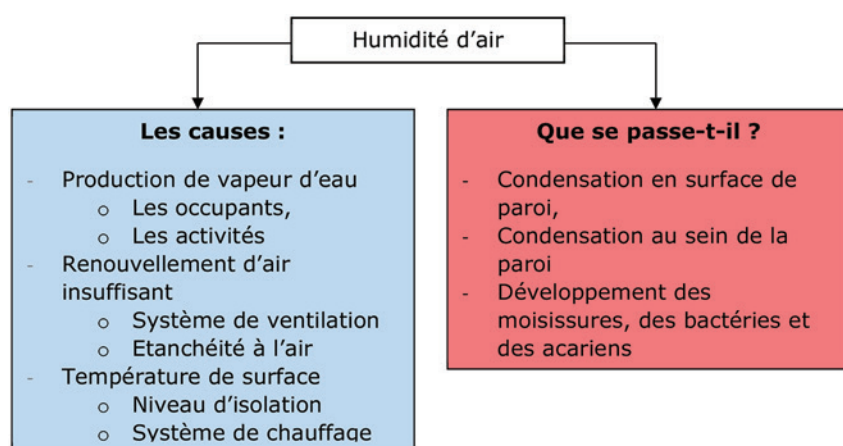
1. La gestion du climat intérieur

Question 1 : Que se passe-t-il quand le climat intérieur est très humide ?

Contexte

Le climat intérieur peut être humide pour plusieurs raisons.

Lorsqu'il y a un excès d'humidité à l'intérieur d'un bâtiment la **température de rosée** de l'air se rapproche de la température de la surface des parois, et les transferts d'eau liquide et de vapeur d'eau en surface et dans les parois sont favorisés. La condensation dépend d'un grand nombre de paramètres, mais l'humidité en est un facteur déterminant.



Un excès d'humidité à l'intérieur d'un bâtiment augmente le risque de condensation surfacique et au sein des parois. Il augmente aussi le développement des acariens qui sont parmi les causes principales des allergies.

Lorsqu'un air est refroidi, sa capacité à emmagasiner de la vapeur d'eau diminue. Lorsqu'il est refroidi jusqu'à sa température de rosée, il atteint le niveau de saturation. La vapeur d'eau se condense et se transforme en liquide. Plus l'air est chargé d'humidité plus le risque de condensation en contact avec les surfaces froides de la maison est important.

Figure 1 : Les causes et les conséquences d'un climat intérieur très humide

Température de rosée

C'est la température à laquelle il faudrait refroidir un air humide pour que la vapeur d'eau commence à se condenser. En d'autres termes, c'est la limite de température à partir de laquelle une partie de l'humidité contenue dans l'air sous forme de vapeur se condense.

Condensation en surface des parois

En l'absence de ventilation, il existe un risque de condensation surfacique, ou plus grave l'apparition de condensation dans l'épaisseur de la paroi. À titre d'exemple, la Figure 2 présente l'évolution de l'humidité relative au niveau de la surface intérieure d'une paroi pour un climat intérieur très humide (forte production de vapeur avec une faible ventilation). Des phases de condensation apparaissent très régulièrement.

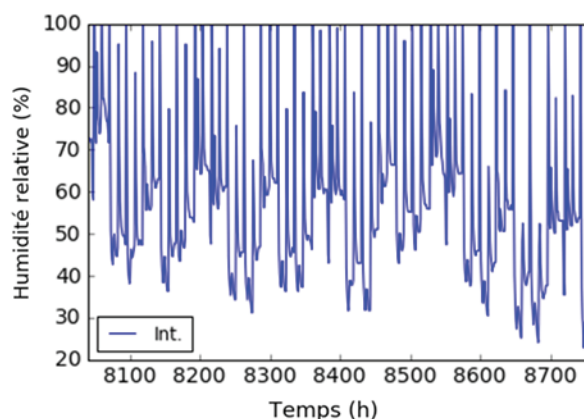


Figure 2 : Évolution de l'humidité relative au niveau de la surface intérieure, paroi en brique isolée par l'intérieur (isolant non hygroscopique) avec présence d'un pare-vapeur ($S_d=18$ m), climat extérieur : Nancy

Condensation dans la paroi suite à une accumulation d'humidité

L'excès d'humidité intérieure et l'absence d'une ventilation sont les facteurs les plus prédominants dans la condensation de la vapeur d'eau au sein d'une paroi. La Figure 3 illustre l'évolution de la teneur en eau dans la plaque de plâtre sous deux climats intérieurs (sans et avec ventilation simple flux hygroréglable). La teneur en eau est plus importante sans ventilation (fortes humidités relatives) ce qui entraîne l'accumulation de l'humidité dans la plaque de plâtre (Figure 4) puis sa migration vers l'intérieur de la paroi en cas d'absence de pare-vapeur. La présence de cette vapeur d'eau dans la paroi peut dégrader les performances thermiques des isolants (cf. les propriétés matériaux du guide).

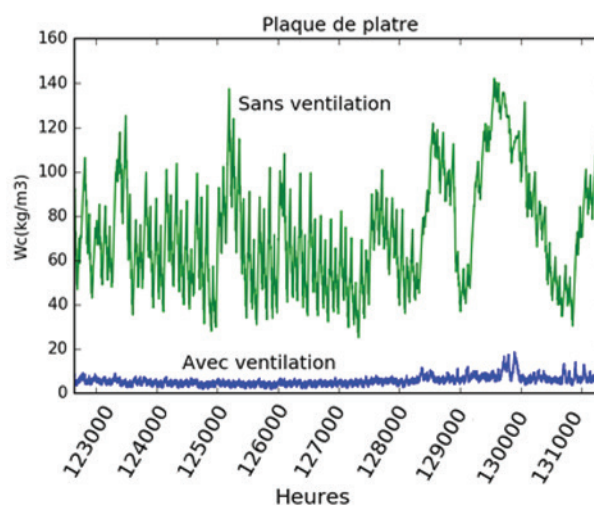


Figure 3 : Teneur en eau moyenne de la plaque de plâtre. Configuration de la paroi : de l'extérieur vers l'intérieur. Enduit perméable > Torchis + poutre en bois : 150 mm > Isolant : 150 mm > Plaque de plâtre

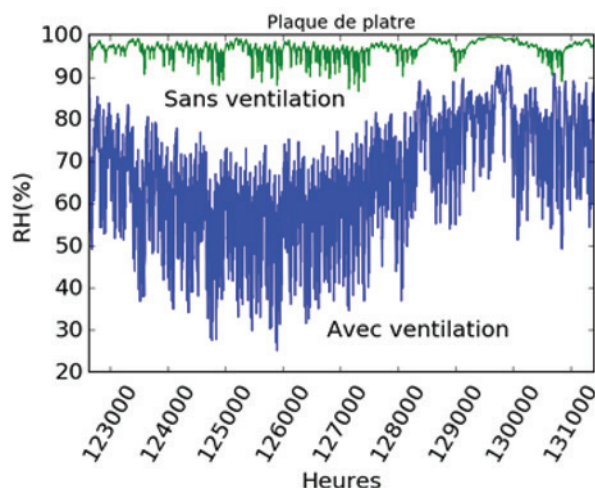


Figure 4 : Humidité dans la plaque de plâtre. Configuration de la paroi : de l'extérieur vers l'intérieur. Enduit perméable > Torchis + poutre en bois : 150 mm > Isolant : 150 mm > Plaque de plâtre

Pathologies liées à l'humidité

Le développement de la condensation en surface et au sein d'une paroi entraîne une dégradation de certains matériaux. Au niveau de la structure du bâtiment, l'humidité est la principale raison des pathologies rencontrées, telles que la corrosion des armatures de béton, les désordres dans les constructions bois, la condensation en sous-face des couvertures métalliques, les termites, la dégradation des revêtements, etc. Ces différentes pathologies entraînent la dégradation des propriétés des matériaux, des développements de micro-organismes, des pertes de résistance mécanique de la structure, des effritements et éclatement des parois ainsi que des problèmes d'inconfort et de santé à l'intérieur du bâtiment.

Par rapport au développement de moisissures sur les matériaux de construction, la littérature scientifique renseigne sur les quatre facteurs majeurs qui fixent les conditions de développement. Il s'agit de la température, de l'humidité relative, du substrat nutritionnel (nature du matériau), et de la durée d'exposition aux conditions de température et humidité favorables.

Un moyen de représenter ces informations est le tracé de courbes dites isoplèthes. Un exemple de courbes obtenues par les chercheurs Allemands de l'institut Fraunhofer est proposé Figure 5 (publié par M. Krus et K. Sedbauer, 2001)⁽¹⁾. Le groupe 0 comprend les matériaux qui sont optimaux pour nourrir les champignons comme les papiers peints à cause de la cellulose par exemple. Le groupe 1 comprend les matériaux qui sont biologiquement utilisables par les champignons comme la plupart des matériaux biosourcés et certains isolants fibreux. Le groupe 2 comprend les autres isolants fibreux, les matériaux de constructions poreux comme le plâtre ou les briques. Enfin il existe un 3^e groupe non représenté qui comprend des matériaux sur lesquels la moisissure se développe plus difficilement comme le béton ou les pierres dures.

1. Sedbauer, K. 2001 Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Thesis, University of Stuttgart.

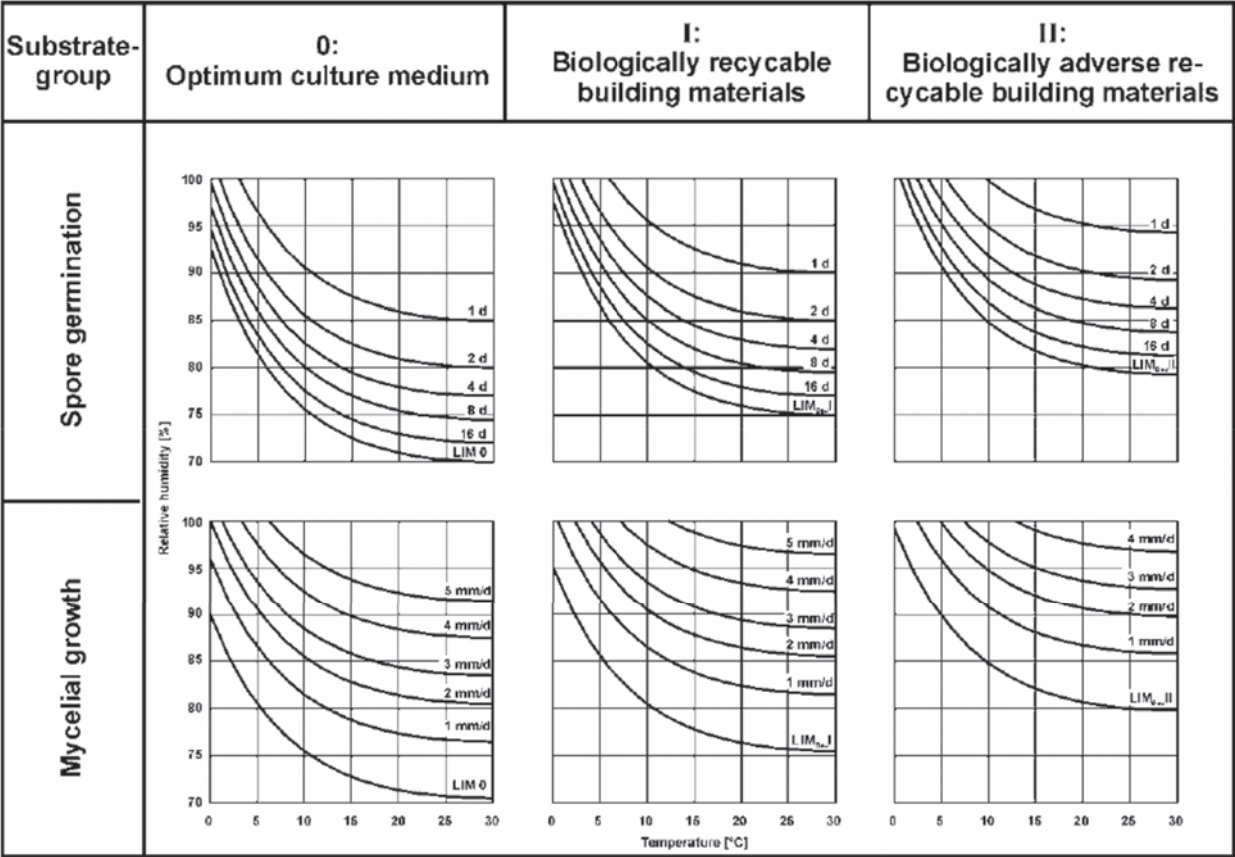


Figure 5 : Isoplèthes publiées par Sedbauer

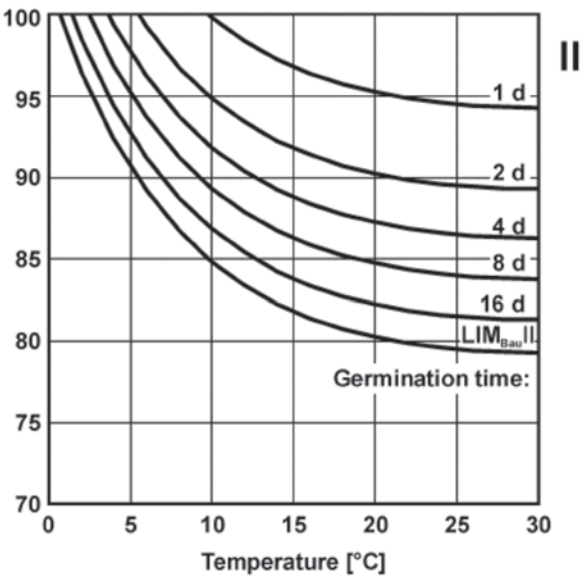


Figure 6 : Zoom sur la germination des spores pour la classe 2 (Sedbauer , 2001), l'axe des ordonnées est en humidité relative et la durée minimum est indiquée sur les courbes en jours (« 16 d » pour 16 jours)

On pourra se référer à l'illustration B dans la partie :

« 5. Illustrations communes aux quatre chapitres » à la fin de cette section pour avoir une comparaison au niveau des risques de pathologies sur l'exemple d'un mur en brique dans deux intérieurs d'humidité très différente.

À retenir !

Question 1 : Que se passe-t-il quand le climat intérieur est très humide ?

Le climat intérieur peut être très humide, notamment en l'absence de ventilation à l'intérieur du logement.

Lorsque le climat intérieur est très humide, de la condensation apparaît sur la surface intérieure de la paroi et le parement intérieur est beaucoup plus humide que lorsque le climat est normal.

Cette humidité risque de se transmettre aux autres matériaux constitutifs de la paroi.

Globalement cela peut donc entraîner des surconsommations de chauffage, des apparitions de moisissures en surface et/ou à l'intérieur de la paroi, et être la cause de dégradation de certains matériaux.

Question 2 : Comment éviter la condensation sur la surface intérieure des murs ?

La condensation apparaît quand l'air est saturé. L'humidité relative est alors localement de 100 %. L'air peut contenir plus de vapeur d'eau si la température augmente. Par conséquent, à proximité d'une surface froide, l'air est localement refroidi et peut devenir saturé, c'est l'apparition de gouttelettes d'eau sur la surface froide. Pour éviter cela, il faut donc du point de vue physique, soit avoir des températures de surfaces plus élevées, soit avoir un air contenant moins d'humidité. Il est préférable de jouer sur les deux.

Pour réduire, voire supprimer les problèmes de condensation on peut utiliser quatre leviers opérationnels :

La ventilation

Pour réduire les risques de condensation, il est indispensable d'installer un système de ventilation approprié, c'est-à-dire qui assure le balayage le plus complet du logement. Cette ventilation consiste d'une part à remplacer l'air intérieur humide par de l'air plus sec provenant de l'extérieur, et d'autre part à assurer une meilleure qualité de l'air en éliminant les polluants de l'ambiance intérieure.

En résumé, sur un système de ventilation existant, il est important de vérifier le bon fonctionnement du système de ventilation :

- Vérifier l'étanchéité du réseau aéraulique.
- Vérifier l'emplacement des points d'entrée et de sortie d'air permettant d'assurer un bon balayage des pièces.
- Vérifier les débits d'air au soufflage (si existant) et à l'extraction.
- Augmenter le taux de renouvellement d'air s'il n'est pas adapté.

Et dans le cas d'absence d'un système de ventilation ou d'un système non adapté :

- Installer un système de ventilation contrôlée adapté au besoin du bâtiment rénové.
- Garantir une bonne étanchéité du réseau aéraulique.
- Bien dimensionner le système en fonction de la taille du logement.
- Vérifier les débits d'air après l'installation.
- Assurer l'étanchéité aux niveaux des entrées ou sorties d'air de l'ancien système.
- S'il n'est pas possible d'installer un système de VMC complet dans le logement pour diverses raisons telles que l'impossibilité de passer les gaines, alors un ou des extracteurs ponctuels donnant directement sur l'extérieur pourrait être une bonne solution. Attention à choisir des produits qui ventilent en continu, parfois à deux vitesses et non pas simplement des aérateurs qui ne fonctionnent qu'avec la lumière par exemple. On parle de ventilation mécanique répartie (VMR).

De plus, il est préconisé d'ouvrir la fenêtre au moins 10 min après la prise de douche ou durant toute production de polluants en général (bricolage, ménage, etc.) et d'humidité en particulier.

Dans le cas d'une ventilation simple flux, vérifier que les entrées ou sorties d'air passives sont bien dimensionnées, propres, et ne sont pas obturées. Des détails complémentaires sur le rôle de la ventilation sont proposés question 3.

L'isolation

L'isolation des parois diminue le risque de condensation superficielle, améliore le confort et permet de diminuer la consommation en chauffage.

Lorsque la paroi d'un bâti est non isolée, l'écart de température entre l'air intérieur et la surface de la paroi est le plus souvent important. L'eau sous forme de vapeur contenue dans l'air se refroidit à son contact et de la condensation peut être constatée aux endroits les plus froids de la paroi.

Lorsque la paroi est bien isolée, la température à sa surface est plus proche de la température de l'air intérieur, ce qui limite les risques de condensation.

Pour plus de détails sur l'isolation et son impact sur la condensation, voir les questions 8, 9, 10.

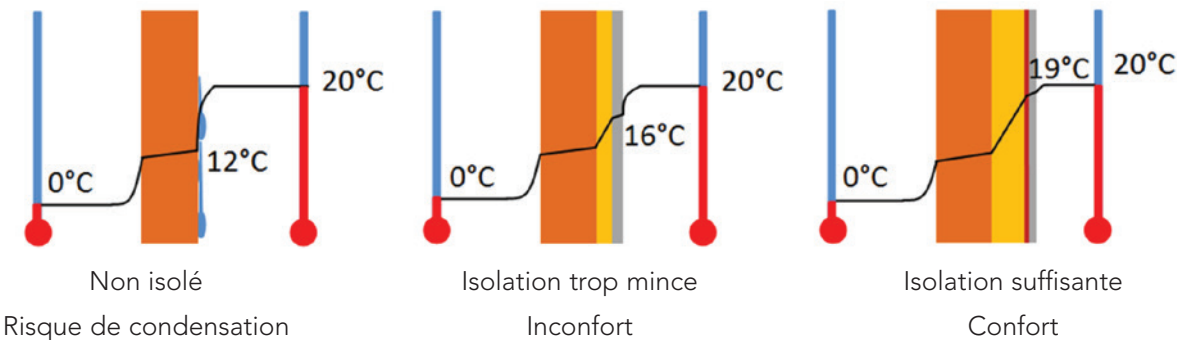


Figure 7 : Représentation très simplifiée d'une température dans une paroi

Le Tableau 1 illustre l'impact de l'isolation et de la ventilation sur la condensation intérieure.

Tableau 1 : Illustration par des simulations sur une paroi béton (climat H1)

Isolation	Ventilation	Nombre d'heures par an de condensation en surface intérieure
Non	Non	6554 h
Oui	Non	487 h
Oui	Oui	211 h

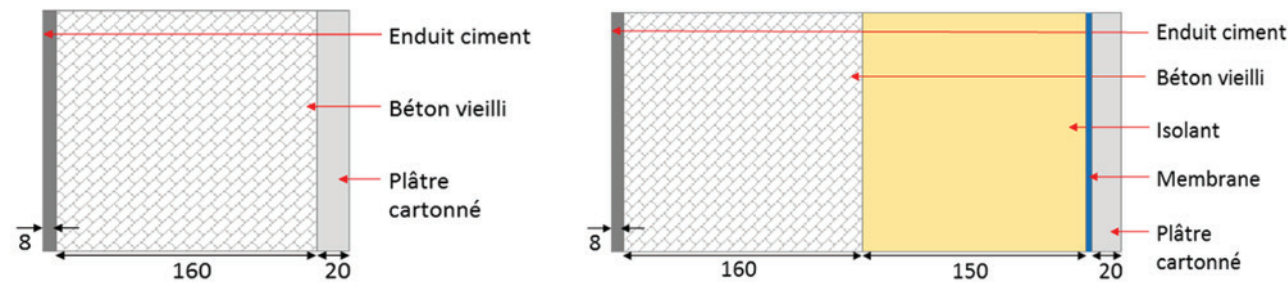


Figure 8 : Paroi en béton vieilli sans isolation (à gauche), avec isolation non hygroscopique et pare-vapeur classique (à droite)

L'étanchéité à l'air

Une mauvaise étanchéité à l'air favorise les transferts de la vapeur d'eau dans les parois. La discontinuité de l'isolation au niveau des nœuds constructifs et les défauts de construction sont responsables de la formation des points froids et donc de la condensation. Ce phénomène est accentué dans le cas d'une ventilation insuffisante.

Pour avoir une étanchéité de meilleure qualité, il est important d'inspecter les points suivants :

- liaison entre parois verticales, plancher et toiture ;
- liaison entre menuiseries et parois ;
- l'étanchéité à l'air lors du passage des réseaux (gaines électriques, de ventilation, câbles, conduits).

La question 5 traite spécifiquement des points singuliers.

Le chauffage

Le chauffage engendre une augmentation de la température de l'air et des surfaces, ce qui réduit l'humidité relative intérieure et le risque de condensation sur les parois.

Les bâtiments doivent être chauffés pour maintenir une température de surface suffisante et ainsi éviter les risques de condensation. Toutefois, il n'est pas nécessaire de maintenir constamment le bâtiment à des températures élevées. Un programmeur réglé en régime réduit de nuit et en inoccupation permettra de réguler convenablement les températures et le fonctionnement des équipements afin d'allier pérennité du bâti et économies d'énergie.

À retenir !

Question 2 : Comment éviter la condensation intérieure ?

Si la condensation intérieure est prolongée dans le temps ou récurrente, elle peut être une source de désordres.

Pour l'éviter, il faut :

- réduire au maximum les ponts thermiques lors de l'isolation du logement ;
- assurer un renouvellement d'air adapté, notamment dans les zones soumises à de fortes sources d'humidité (cuisine, salle de bains, buanderie, chambre à coucher pendant la nuit, etc.) ;
- garantir une température suffisante dans le logement assurée par un système de chauffage correctement dimensionné.

Question 3 : Quel type de système de ventilation employer ?

Comment la rénovation thermique d'une maison influence-t-elle l'aération ?

Afin de garantir une meilleure performance énergétique, l'étanchéité à l'air du bâti est améliorée. Ceci implique :

- Avant isolation et rénovation
 - Il existe un flux d'air non contrôlé à travers les défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe. On note un inconfort et un gaspillage d'énergie mais les polluants ne s'accumulent pas.
- Après isolation et rénovation
 - Le débit d'air à travers les défauts d'étanchéité est réduit, mais en l'absence d'une maîtrise des flux d'air dans le logement, l'humidité s'accumule et les polluants sont piégés dans le logement.

Les résultats d'une étude numérique réalisée sur une maison T3 de plain-pied, de perméabilité à l'air de $1,3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$, sont présentés. Deux cas ont été considérés :

- sans ventilation : débit d'air fixe de $10 \text{ m}^3/\text{h}$;
- avec ventilation : régulation du débit en fonction de l'humidité relative (ventilation type hygro B).

La Figure 9 présente le taux de renouvellement d'air horaire sur une année dans le séjour. L'influence des flux traversant dus aux forces motrices naturelles (vent et température) est claire dans les deux cas. On peut atteindre un renouvellement d'air assez important (3 à 4 V/h). Le taux de renouvellement d'air moyen sur l'année est de 0,3 V/h sans ventilation et 0,7 V/h avec un système de ventilation.

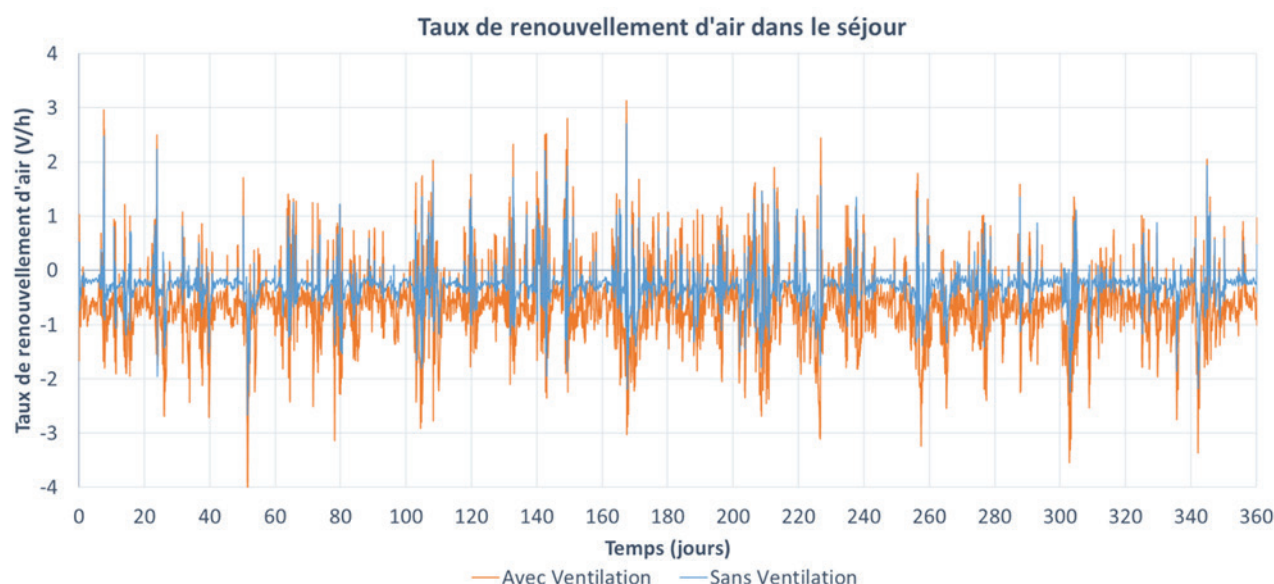


Figure 9 : Taux de renouvellement d'air à l'intérieur d'une maison type T3 – climat H1

Cette augmentation du taux de renouvellement d'air en rajoutant un système de ventilation se traduit par un taux de polluant plus faible. Les courbes Figure 10 représentent l'humidité relative dans le séjour. La ventilation permet de maintenir toute l'année un taux d'humidité permettant d'éviter de nombreuses pathologies dangereuses pour le bâtiment et la santé des occupants : les condensations sur les points froids, les développements de moisissures, etc.

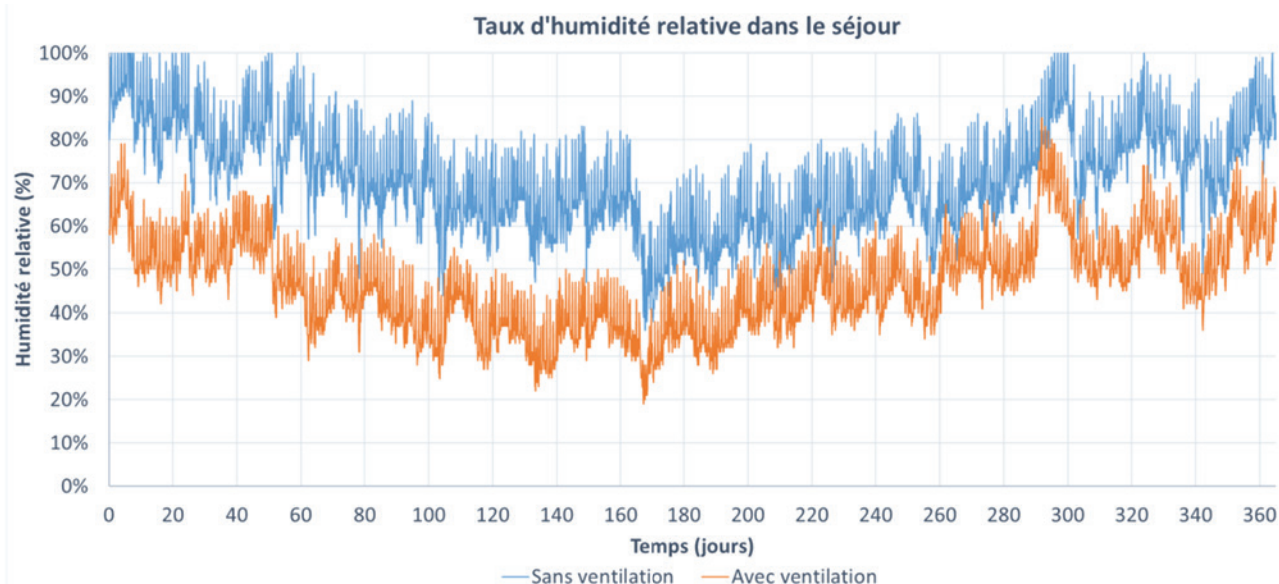


Figure 10 : Humidité relative à l'intérieur du séjour d'une maison type T3 – climat H1

Quelles sont les conséquences d'une pollution intérieure importante dans les logements ?

Pour la santé

- Maux de tête et irritations
 - Une concentration trop forte de COV provoque l'apparition de maux de tête
- Allergies, irritations
 - Selon la nature des substances, leur quantité, leur association, les effets sanitaires diffèrent : de l'inconfort olfactif jusqu'à des irritations de la peau et des muqueuses oculaires et respiratoires
- Cancers
 - Des troubles neurologiques, des nausées et des vomissements peuvent également survenir. Par ailleurs, certains composés ont aussi des potentialités cancérogènes.

Pour le bâti

- Condensation
 - La vapeur d'eau, souvent en excès et mal évacuée, peut se condenser sur les parois froides. L'abaissement de la température de chauffage et le calfeutrement du logement augmentent les risques de condensation.
- Dégradation
 - Les surfaces et matériaux imprégnés d'humidité sont détériorés : papier peint décollé, peinture écaillée, boiserie abîmée et isolants dégradés.

- Moisissures
 - Les parois froides et ponts thermiques sont le siège de développement des moisissures (angle de mur, arrière des meubles, etc.) elles-mêmes sources d'allergènes.

Sur quels types de pollution agit la ventilation ?

Contrairement à ce que l'on croit parfois, l'air intérieur de nos maisons peut être plus pollué que l'air extérieur (source OQAI).

Les pollutions perceptibles



Fumée de tabac



Vapeur d'eau



Odeurs de cuisine

Figure 11 : Types de pollutions perceptibles

Ces pollutions, facilement repérables, sont dues à l'activité des occupants.

- Odeurs
 - Liées à la cuisson, aux odeurs corporelles, les produits d'ambiance, les désodorisants, les huiles essentielles, etc.
- Vapeur d'eau
 - Contenue dans l'air ou liée à des usages domestiques : douches, cuisine, séchage du linge, etc.
- Les produits d'entretien
 - Peuvent contenir certaines substances dangereuses pour la santé.
- Cuisson
 - Lors de la cuisson d'aliments, de nombreux polluants comme les particules fines et COV sont dégagés. Présence d'acroléine lors du chauffage à haute température des graisses.
 - Les équipements de cuisson utilisant le gaz émettent des oxydes d'azote (NO, NO₂) et certains COV.
- La fumée de tabac
 - Mélange complexe de gaz et de très fines particules, polluant majeur de l'air intérieur avec plus de 4 000 substances chimiques.

Les pollutions cachées

Ces pollutions, imperceptibles par l'homme, représentent une menace bien réelle.



Allergènes, acariens



Composés organiques volatiles



Monoxyde de carbone

Figure 12 : Types de pollutions cachées

- Allergènes, acariens
 - Insectes, animaux, pollens, etc.
 - Un taux d'humidité relative important peut être propice à l'accroissement des acariens.
- Radon
 - Le radon (gaz radioactif) est présent naturellement dans le sol.
- Composés organiques volatils
 - Présents dans les produits d'entretien, les matériaux de construction, etc.
- Le formaldéhyde
 - C'est un composé volatil qui entre dans la composition des bois, des colles, des vernis, etc. Contrairement à la majorité des COV, les émissions de formaldéhyde peuvent être stables et persistantes.
- Monoxyde de carbone
 - Le CO se crée lors d'un mauvais fonctionnement des appareils de combustion.

Quelle est la bonne stratégie de ventilation ?

Le rôle principal d'un système de ventilation est de renouveler l'air d'une habitation en apportant de l'air propre et en évacuant l'air vicié. En considérant que l'air apporté de l'extérieur ne contient pas une forte concentration de polluants ou qu'il est traité par le système de ventilation, plus le taux de renouvellement d'air est important meilleure est la qualité de l'air. Cependant, en augmentant le taux de renouvellement d'air, on augmente aussi la consommation énergétique nécessaire pour chauffer ou refroidir cet air.

Par ailleurs, lors d'une rénovation énergétique, l'étanchéité à l'air de l'enveloppe est améliorée réduisant ainsi le renouvellement naturel résultant de l'effet du vent et de la différence de température intérieure/extérieure.

Une bonne stratégie de ventilation est donc d'assurer un équilibre entre la qualité de l'air intérieur et l'efficacité énergétique.

Une solution possible est la ventilation mécanique contrôlée : apporter la quantité nécessaire d'air dans l'endroit convenable pour diluer et évacuer le polluant produit. Il est aussi possible de traiter l'air neuf (chauffer et rafraîchir) avant de l'introduire, en utilisant des sources d'énergie renouvelable ou de la récupération de la chaleur non utilisée dans la maison.

Une ventilation contrôlée doit prendre en considération l'émission continue (COV émis par les matériaux de construction, meubles, etc.) et ponctuelle (CO₂, vapeur d'eau, CO, etc. produits par les activités des occupants) des polluants à l'intérieur du logement ainsi que les polluants uniformément répartis (matériaux de construction, radon, etc.) et ceux localisés (vapeur d'eau dans une salle de bains par exemple). Par conséquent, elle doit être permanente avec un débit minimal lorsqu'il n'y a pas de sources ponctuelles et qui augmente en fonction du niveau de polluants.

Le risque d'exposition à un polluant ou à un mélange de polluant dépend du temps de séjour de l'occupant, de sa sensibilité et de la concentration des polluants. En moyenne, un Français passe plus de 67 % de son temps dans son logement et 39 % à l'intérieur de la chambre. Durant la période de l'enfance, de l'adolescence et de la vieillesse, le temps d'occupation de la chambre est plus important ; ce sont les périodes où la sensibilité à la pollution de l'air intérieur est élevée (Figure 13).

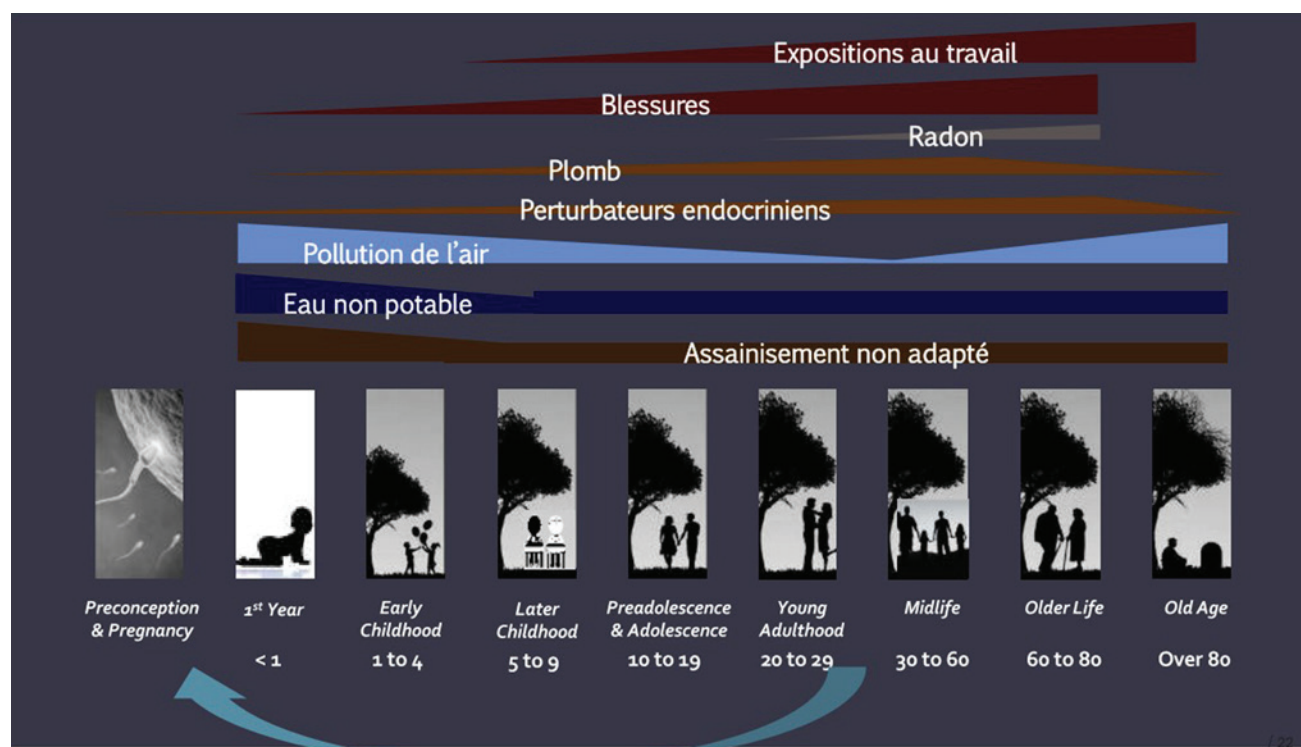


Figure 13 : Risque d'exposition à un polluant

Un système de ventilation doit assurer un renouvellement d'air suffisant dans les chambres en présence des occupants. Si la régulation est réalisée en fonction de l'humidité dans les pièces humides, le débit minimal doit tenir compte du niveau d'humidité produit par les occupants durant la phase de sommeil.

En conclusion, les fonctions principales devant être assurées par la ventilation afin de garantir une bonne qualité de l'air intérieur, le confort des occupants et une faible consommation énergétique sont les suivantes :

- fonctionnement de la ventilation en permanence ;
- régulation du débit en fonction du besoin ;
- régulation du débit d'air dans l'endroit convenable. S'assurer, en particulier, d'un renouvellement d'air suffisant dans les chambres occupées.

Pour assurer une qualité d'air optimale et un meilleur confort, des fonctions peuvent être proposées par certains systèmes telles que :

- la filtration de l'air entrant si nécessaire ;
- le préchauffage et/ou le rafraîchissement de l'air entrant.

En plus du système de ventilation, il est conseillé d'aérer 10 min par ouverture des fenêtres lors de certaines activités telles que la cuisson, le bricolage, le ménage, après la prise de douche, etc. afin d'écarter rapidement le pic de pollution et ou d'humidité produite. Cette aération doit également être réalisée en hiver.

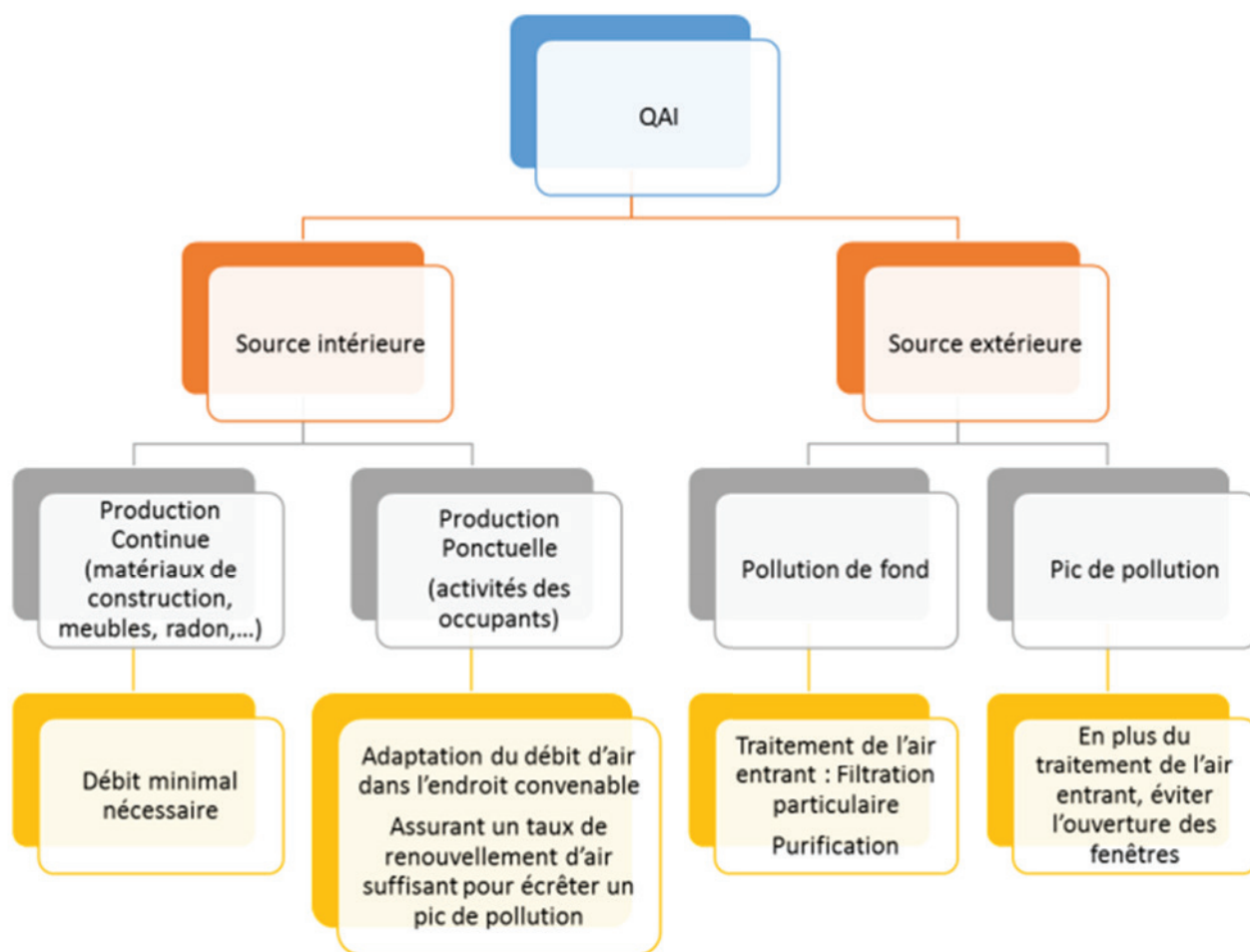


Figure 14 : Solutions pour limiter les impacts des sources intérieures et extérieures sur la QAI

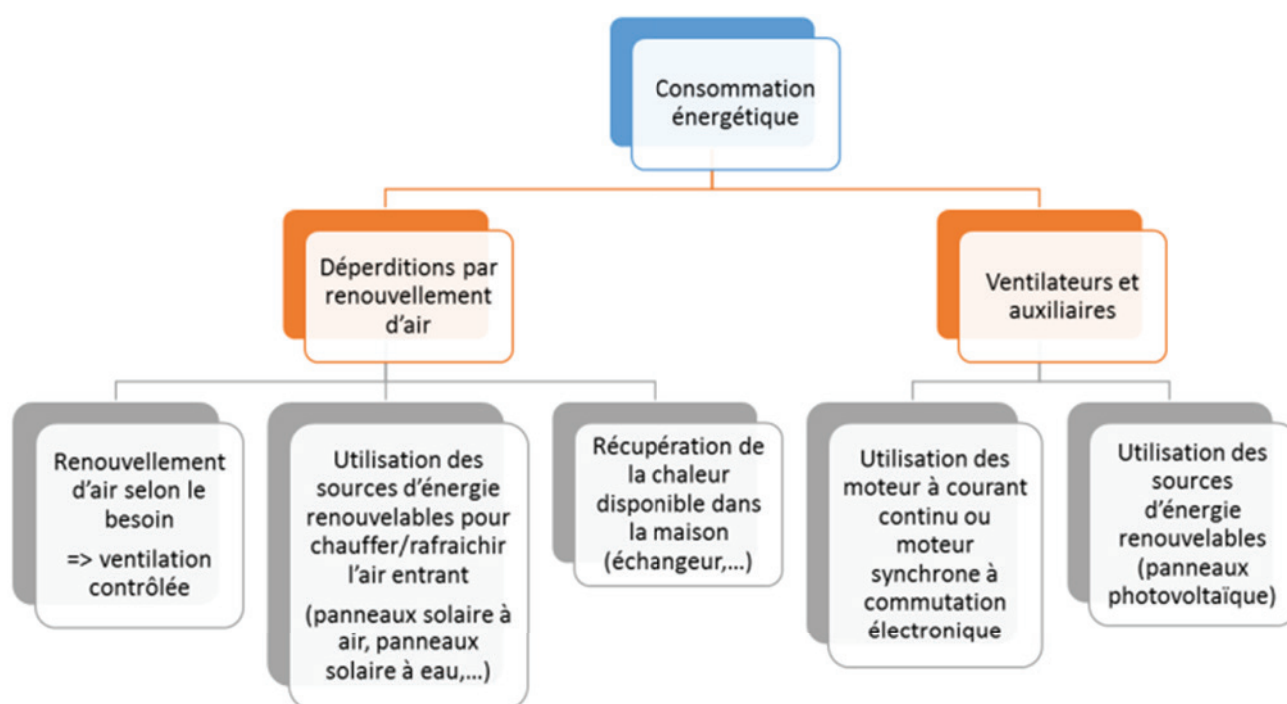


Figure 15 : Type d'actions pour limiter la consommation énergétique

Les différents systèmes les plus répandus sur le marché

La VMC simple flux par extraction

L'air extérieur entre par les grilles d'entrées d'air dans les pièces principales, traverse le logement et est ensuite rejeté à l'extérieur par les pièces techniques grâce à un ventilateur.

La VMC simple flux par extraction peut être :

- autoréglable : les débits d'air sont maintenus constants quelles que soient les conditions extérieures (vent, pluie) et intérieures (nombre d'occupants, humidité) ;
- hygroréglable : les débits d'air s'adaptent automatiquement aux besoins des occupants (selon la variation du taux d'humidité) apportant confort et économie d'énergie.



Figure 16 : VMC simple flux par extraction

La VMC simple flux par insufflation

L'air neuf est filtré avant d'être introduit mécaniquement dans un ou plusieurs endroits de la maison et évacué naturellement. Deux configurations se présentent :

- Insufflation centrale : l'introduction de l'air se fait via un ou deux points de soufflage au milieu de la maison (couloir, pièce principale). L'évacuation s'effectue dans chacune des pièces de la maison par des sorties d'air naturelles installées généralement au niveau des fenêtres.
- Insufflation répartie : l'air est insufflé dans les pièces principales et évacué dans les pièces techniques par tirage thermique ou à l'aide de sorties libres.

La VMC simple flux par insufflation permet de préchauffer et/ou rafraîchir l'air entrant pour assurer un confort optimal. Pour ce faire, il existe plusieurs techniques : batterie électrique, par le réseau d'eau chaude disponible dans la maison (couplage via un échangeur eau/air) et par l'énergie solaire (couplage avec un panneau solaire à air, panneau solaire à eau, panneau photovoltaïque). Le couplage de la ventilation par insufflation et des sources d'énergies renouvelables permettent de réduire considérablement la consommation énergétique du logement.

La ventilation simple flux par insufflation permet la filtration de l'air neuf apporté au bâtiment et limite ainsi le transfert des polluants extérieurs. Plusieurs niveaux de filtration peuvent être mis en place, il est recommandé de changer les filtres plus souvent dans les zones à forte concentration de particules fines.

La ventilation simple flux par insufflation permet par la légère surpression engendrée (2pa) de protéger les logements contre les remontées de radon (2 000 cas de décès/an dus au radon).

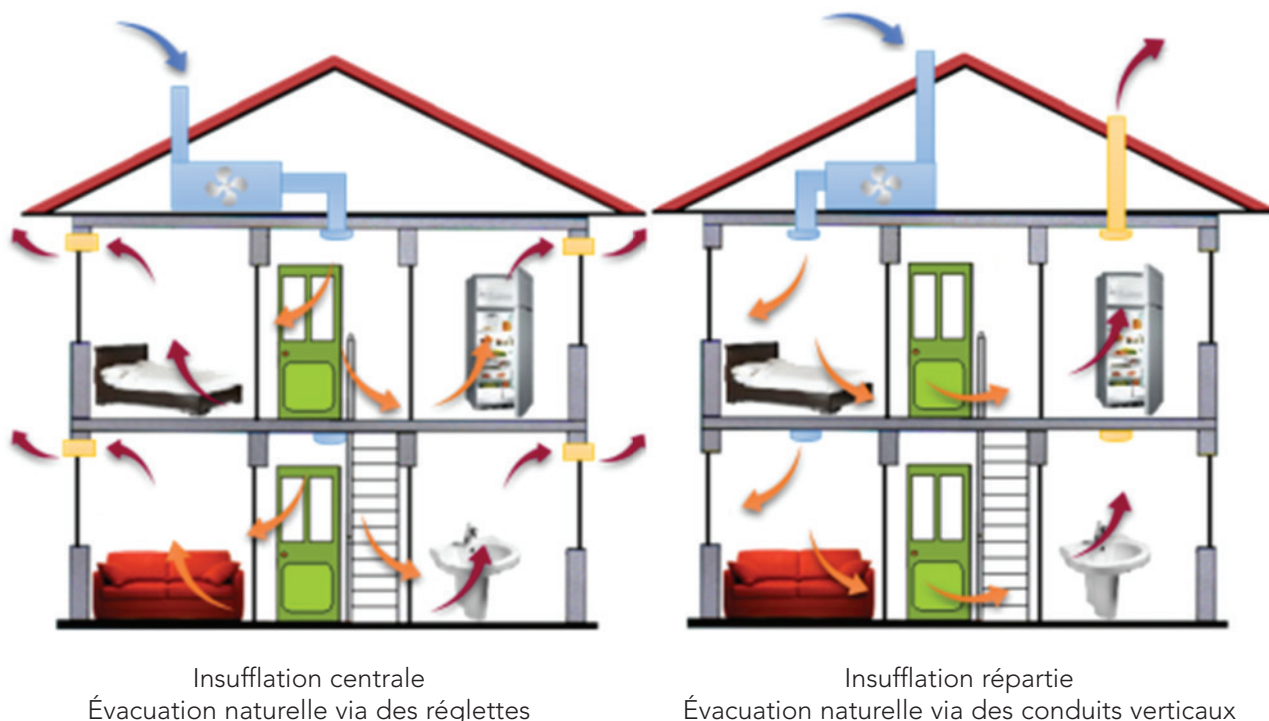


Figure 17 : VMC simple flux par insufflation

La VMC double flux

L'air neuf est insufflé dans les pièces principales, il est extrait dans les pièces techniques.

La présence d'un échangeur permet de récupérer la chaleur de l'air extrait et ainsi de chauffer l'air entrant avant qu'il n'arrive dans le logement.

Cette technique permet de faire d'importantes économies d'énergie et d'assurer un confort optimal en préchauffant l'air entrant.



Figure 18 : VMC double flux

La ventilation double flux permet la filtration de l'air neuf apporté au bâtiment et limite ainsi le transfert des polluants extérieurs. Plusieurs niveaux de filtration peuvent être mis en place, il est recommandé de changer les filtres plus souvent dans les zones à forte concentration de particules fines.

Pour plus d'information sur les systèmes de ventilation, se référer au paragraphe 3 de la partie I « Bâtiments : typologies et pathologies » du document « Impact de l'humidité dans le bâtiment : diagnostics et retours d'expériences » publié en 2015 dans la collection Recherche et Expertise du CSTB⁽²⁾.

2. Guide bibliographique (<http://www.batipedia.com/telechargements.html?id=800004>) « Impact de l'humidité dans le bâtiment : diagnostics et retours d'expériences »

Partie 1 : Bâtiments : typologies et pathologies

Partie 2 : Mesures : matériaux, parois, bâtiments

Partie 3 : Modélisation hygrothermique et aéraulique dans le bâtiment

Partie 4 : Humidité et qualité de l'air

Comment bien utiliser la VMC ?

Pour une ventilation efficace, des actions sont à mettre en place

- Mise en fonctionnement de la VMC
 - Un logement a besoin d'être aéré de manière permanente. Si la ventilation est arrêtée, l'humidité et les pollutions diverses stagnent dans le logement, des moisissures vont progressivement se former, détériorer le bâti, et la qualité de l'air sera de plus en plus mauvaise.
- Ouverture des entrées d'air ou des bouches d'insufflation et d'extraction
 - En empêchant l'air d'entrer ou de sortir, le logement est privé de ventilation. L'air n'est plus renouvelé correctement.
- Pas de raccordement de la hotte de cuisine ou du sèche-linge à la VMC
 - Ce type de branchement perturbe le fonctionnement de la VMC, la ventilation du logement ne se fait plus correctement.
- Détalonnage des portes intérieures
 - Pour ventiler la totalité du logement, l'air doit circuler d'une pièce à l'autre. En laissant libre un petit passage sous chaque porte, une ventilation de qualité est assurée (cf. NF DTU 68.3).
- Entretien de la ventilation
 - Nettoyage des bouches d'insufflation et d'extraction, des entrées et sorties d'air.
 - Changement du filtre périodiquement (en fonction de la pollution atmosphérique de la zone considérée).
 - Nettoyage des différents composants indispensable ; sales ou obstrués, ils augmentent le confinement et l'exposition aux polluants.
- Contrôle de l'installation par un professionnel.

Point de vigilance

- En cas de présence d'une chaudière à gaz atmosphérique
 - La VMC gaz n'est pas traitée dans ce guide, elle nécessite des précautions spécifiques.
 - Prendre contact avec un professionnel
 - Une VMC traditionnelle n'est pas compatible avec une chaudière à gaz atmosphérique, il y a un risque de refoulement des gaz brûlés.
 - Se reporter au NF DTU 68.3.

À retenir !

Question 3 : Quel type de système de ventilation employer ?

Assurer le renouvellement d'air dans le logement est une nécessité absolue. Et il est préférable de le faire sans gaspillage d'énergie et en assurant le confort des occupants.

Pour cela, des systèmes de VMC correctement dimensionnés et installés sont une bonne solution pour éliminer les polluants intérieurs et l'humidité en excès.

Enfin, il faut avoir conscience qu'une aération par ouvertures des fenêtres d'une dizaine de minutes même en hiver, au lever dans les chambres et après une cuisson, du bricolage ou une douche dans les pièces correspondantes est un comportement à adopter qui contribuera grandement à garder un climat intérieur de bonne qualité.

2. La paroi

Question 4 : Est-il préférable de rénover en isolation thermique par l'intérieur (ITI) ou en isolation thermique par l'extérieur (ITE) ?

Lors d'une rénovation avec isolation, les points suivants sont à prendre en considération :

- L'impact architectural : l'aspect extérieur du bâtiment sera grandement modifié suite à la mise en œuvre d'une isolation par l'extérieur. Des contraintes réglementaires architecturales peuvent également s'appliquer sur un bâtiment lorsqu'il est classé, inscrit ou à proximité d'un monument historique.
- L'impact thermique : le comportement de la paroi et de l'ensemble du bâtiment sera très différent que la paroi soit en isolation par l'intérieur (ITI) ou en isolation par l'extérieur (ITE).
- L'impact sur les pathologies liées à l'humidité : en ITE, la température entre le mur et l'isolant est plus élevée qu'en ITI. Ainsi le risque de condensation à cet endroit de la paroi est nettement moins élevé.

La mise en œuvre et le traitement de l'étanchéité en ITE, comme en ITI doivent être très soignés. En effet, un défaut d'étanchéité au niveau des points singuliers peut entraîner des infiltrations d'eau pluviale à l'intérieur de la paroi.

L'ITI implique la présence de points de faiblesse sur l'enveloppe qui forment ce qu'on appelle des ponts thermiques. L'hiver, par rapport à la zone courante, le pont thermique se traduit par une température plus basse du côté intérieur (point froid) et une température plus élevée du côté extérieur. Dans ce cas, le risque de condensation se décale vers l'intérieur parfois même jusqu'à la surface.

Dans une paroi isolée par l'extérieur, les mesures du projet HUMIBATex et les simulations effectuées montrent que la teneur en humidité de la paroi ancienne est stable sur l'année et présente peu de risques pour peu que les cas de remontées capillaires aient été décelées et que le complexe isolant et finition (enduit ou bardage) soit bien étanche à la pluie. Un renouvellement d'air suffisant dans les locaux permet alors de se mettre à l'abri des problèmes liés à l'humidité.

Avec l'isolation intérieure, les teneurs en eau dans les différents éléments sont plus fluctuants sur l'année et la problématique des risques hygrothermiques est plus complexe.

À retenir !

Question 4 : Est-il préférable de rénover en isolation thermique par l'intérieur (ITI) ou en isolation thermique par l'extérieur (ITE) ?

Si l'architecture et la problématique de conservation du patrimoine le permettent alors l'isolation par l'extérieur est préférable du point de vue des risques hygrothermiques.

En ITE, veiller à ce que d'éventuelles remontées capillaires soient traitées et puissent s'évacuer correctement vers l'extérieur.

Question 5 : Quelle est l'incidence de la présence d'un pont thermique ?

La présence de liaisons entre façades et mur de refend, plancher ou encore les angles entre deux murs, dans l'enveloppe isolée par l'intérieur induit l'apparition d'un pont thermique qui correspond à une intensification des déperditions à cet endroit. L'hiver, par rapport à la zone courante, le pont thermique se traduit par une température plus basse du côté intérieur (point froid) et une température plus élevée du côté extérieur. C'est ce qui apparaît sur l'écran d'une caméra thermique lors d'un diagnostic. Dans ce cas, le risque de condensation se décale vers l'intérieur avec des niveaux plus élevés d'humidité relative en surface résultant d'une température plus basse. Afin de voir l'incidence du pont thermique sur la condensation, des simulations ont été réalisées sur une paroi existante isolée par l'intérieur avec rupture d'isolant (Figure 19).

Mise en évidence de l'impact d'un point singulier sur l'humidité par un exemple simulé

L'exemple présenté (Figure 19) correspond à un point singulier de deux dimensions d'une construction :

- une coupe en zone courante servant de configuration de référence ;
- une coupe horizontale au niveau d'un angle en zone courante pour étudier le pont thermique et son incidence.

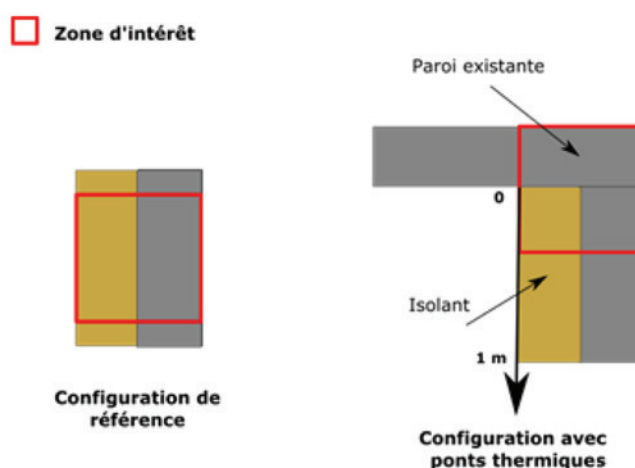


Figure 19 : Géométries et zones d'intérêt étudiées

La réhabilitation étudiée des quatre parois de base (briques pleines, pan de bois et torchis, pierre tendre et béton vieilli) est une isolation par l'intérieur (isolant non hygroscopique) avec pare-vapeur ($S_d = 18 \text{ m}$).

Les conditions extérieures utilisées pour le calcul sont celles de Nancy (Climat H1). L'effet de la pluie battante, des remontées capillaires et des défauts de mise en œuvre n'ont pas été pris en compte. Le climat intérieur considéré est sévère. Il a été évalué en prenant en compte une faible ventilation et une forte production de vapeur à l'intérieur du bâtiment.

Les simulations hygrothermiques dynamiques ont été réalisées et les résultats étudiés sur une durée d'une année. La Figure 20 présente l'évolution de l'humidité relative dans les zones de comparaison au niveau de la paroi de base en brique.

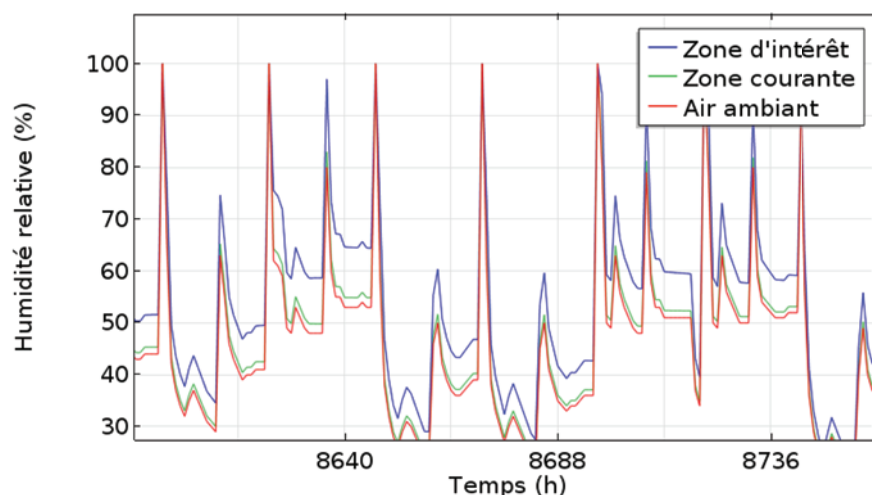


Figure 20 : Évolution de l'humidité relative de surface en zone courante et d'intérêt

Comme sur le graphique présenté, les différents résultats montrent que sur la zone du pont thermique l'humidité relative est plus élevée qu'en partie courante. Cela est dû en partie à l'effet du pont thermique (écart de température dû à une différence d'isolation), mais également à celui du pont hydrique qui favorise la diffusion de vapeur d'eau par un chemin non-couvert par la membrane pare-vapeur.

Il est indispensable de prévoir une zone de recouvrement du pare-vapeur suffisamment importante sur le mur de refend. Si la continuité du pare-vapeur sur le côté n'est pas prévue, alors, le pont hydrique conjugué au refroidissement du côté intérieur implique une augmentation du risque de condensation interne, voire en surface.

Dans le cas où la paroi supporte des abouts de poutres en bois pour le plancher, cette problématique revêt une importance toute particulière. Tout projet d'isolation par l'intérieur dans un tel cas de figure devra faire l'objet d'une réflexion sur ce point.

Les points clés pour mener cette réflexion sont les suivants :

- L'about de poutre est-il suffisamment protégé de l'arrivée d'eau sous forme liquide (infiltration, capillarité, eau de pluie) ? En pratique, il faudra veiller à ce qu'il n'y ait pas de fissuration des enduits et des matériaux et en cas de paroi en briques ou en pierres tendres non-enduites, il faudra que le débord de toiture protège suffisamment la paroi de la pluie battante.
- L'intérieur des locaux est-il suffisamment ventilé pour éviter que de l'air chargé d'humidité ne circule le long de la poutre et ne condense au bout dans la niche du mur ?
- Lorsque les risques sont trop élevés, il faudra envisager de laisser une petite zone autour du nez de poutre sans isolation pour la garder dans la zone chauffée. Ce « trou » dans l'isolation aura une certaine incidence sur les besoins en chauffage mais permettra de conserver l'intégrité des poutres.

La figure suivante permet d'illustrer cette problématique sur un mur en brique ancienne.

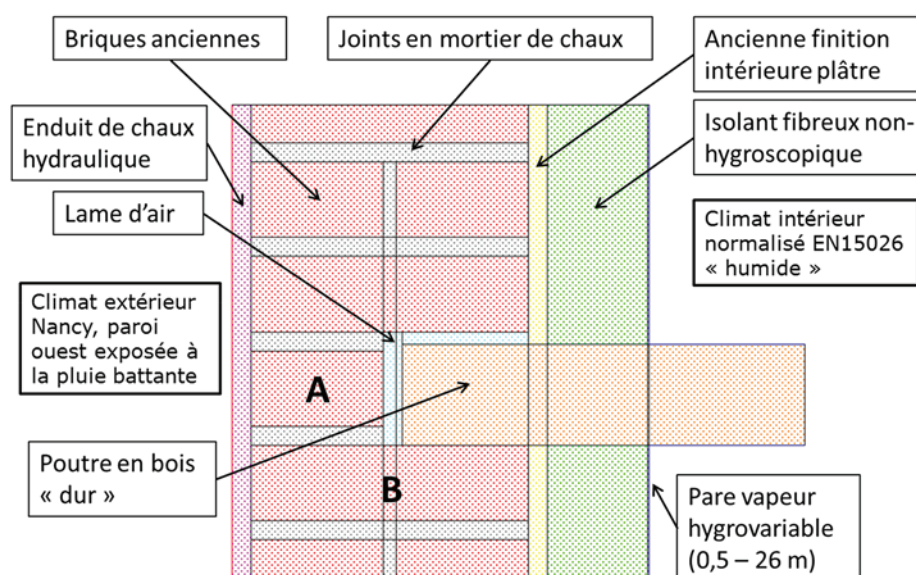


Figure 21 : Illustration d'un modèle Wufi 2D de poutre en appui dans un mur en brique

Les points A et B dans la Figure 21 indiquent respectivement les briques dites « au niveau de la poutre et brique longue basse » utilisées dans

l'analyse de la Figure 23.

Deux scénarios sont comparés ici : un premier cas sans isolation, un second cas avec un isolant fibreux non-hygroscopique et une membrane pare-vapeur hygrovariable et un troisième cas avec un isolant fibreux hygroscopique et la même membrane. Des extraits des résultats sont présentés sur la Figure 22 et la Figure 23.

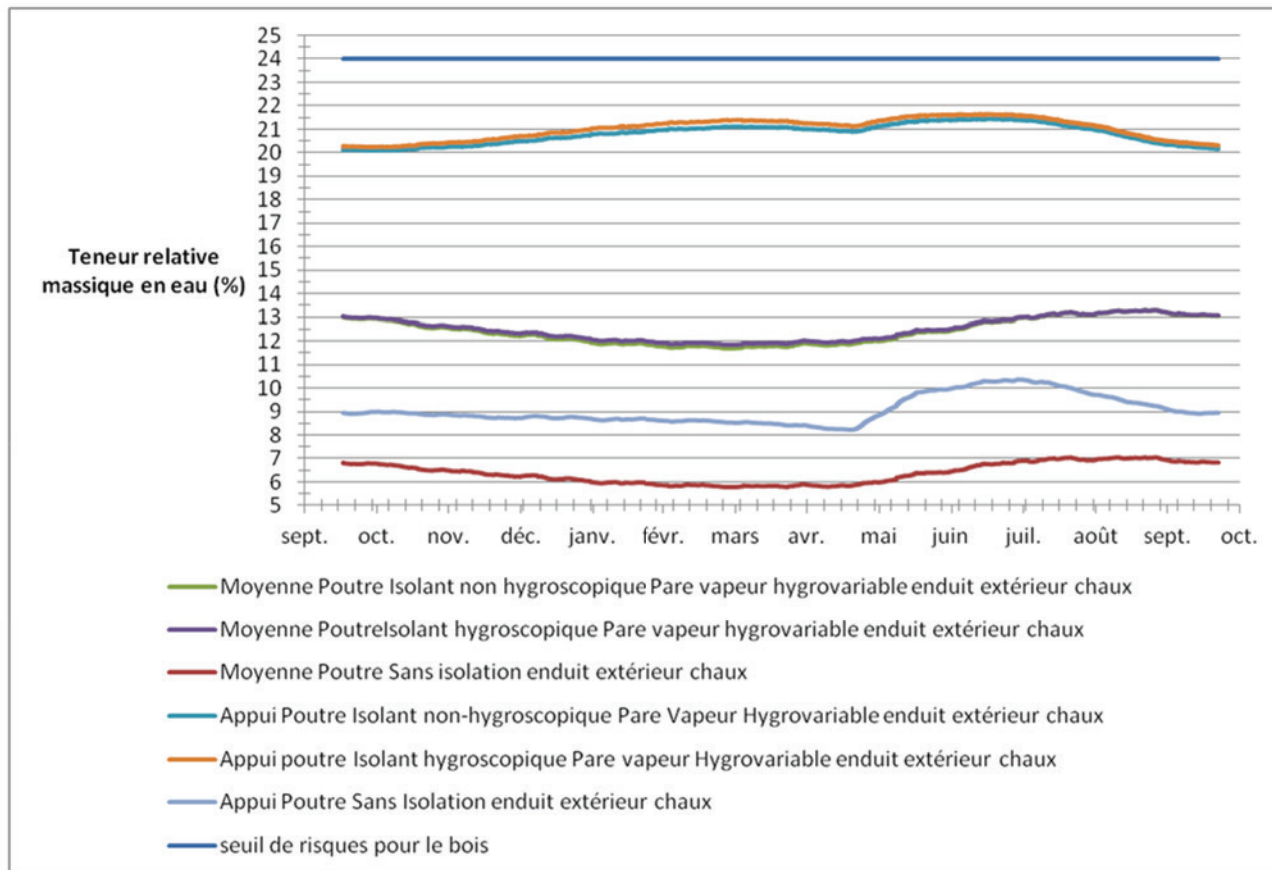


Figure 22 : Résultats de simulation, teneur en eau massique relative (en %) en moyenne et au niveau de l'appui dans la poutre

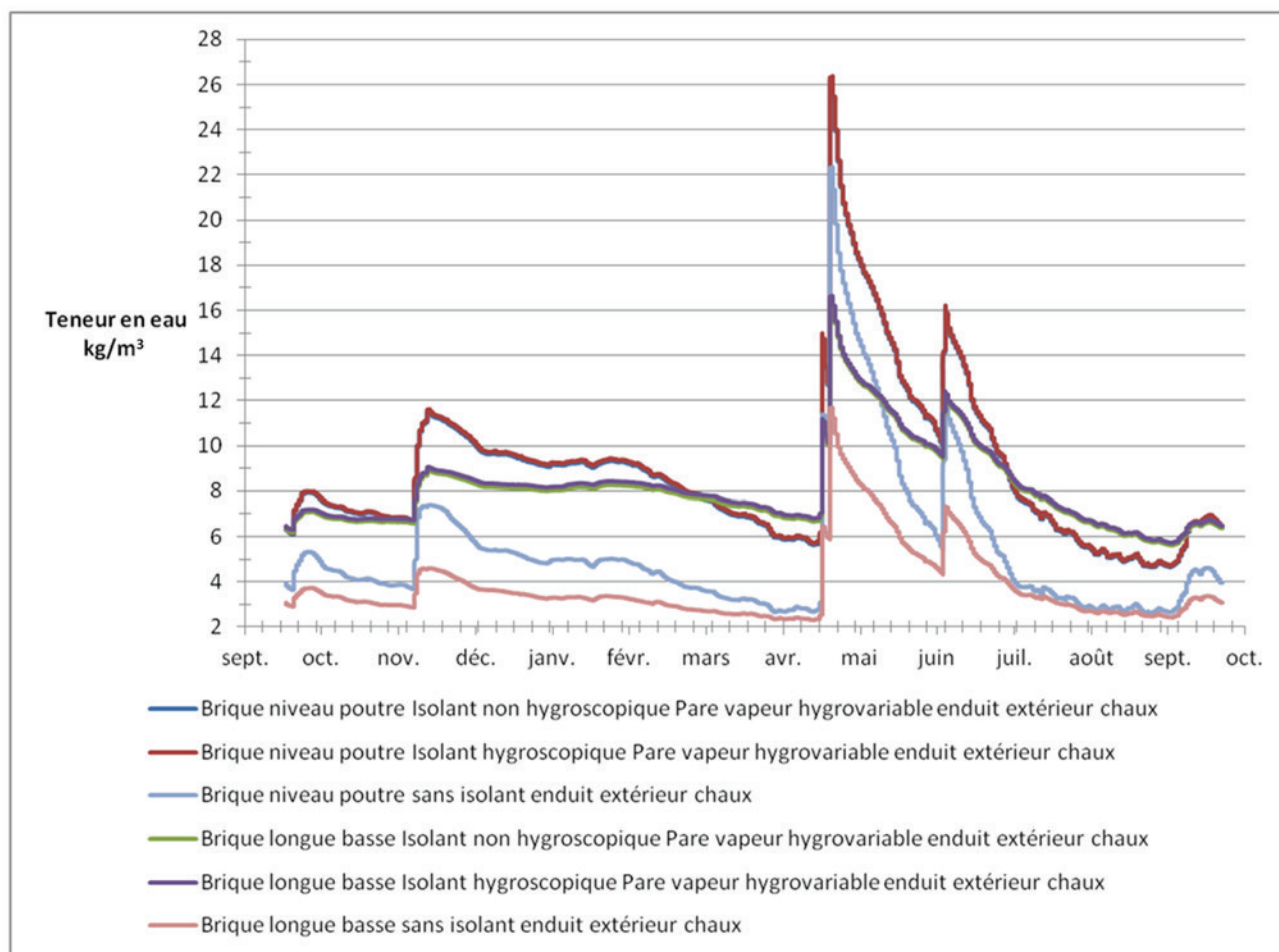


Figure 23 : Résultats de simulation, teneur en eau dans les briques A et B

Les constats soulevés sont les suivants :

- Les conditions de cette simulation montrent que les deux familles d'isolants fibreux donnent des résultats très proches.
- Les briques sont plus humides après isolation, à l'instar des parties courantes.
- La poutre présente des niveaux de teneur en eau tout à fait normaux avant isolation, alors qu'ils sont plus élevés après isolation.
- Le niveau moyen de teneur en eau reste normal alors que l'appui sur la brique atteint 21,5 %. La limite communément admise à ne pas dépasser pour éviter les risques de pathologie est de 24 %. La marge est donc faible.

À retenir !

Question 5 : Quelle est l'incidence de la présence d'un pont thermique ?

De manière générale les ponts thermiques sont à éviter autant que faire se peut. En isolation par l'intérieur, il en restera très souvent. Ils vont représenter des points de faiblesse et seront les premiers concernés par les risques hygrothermiques. Ils seront le siège de condensation interne et si la ventilation est insuffisante de condensation en surface intérieure.

Cette condensation interne ne posera pas de problème si la paroi est suffisamment perspirante et capillaire, permettant à cette humidité de sécher au niveau des surfaces lorsque les conditions sont favorables.

Question 6 : Faut-il poser un enduit extérieur perméable ou étanche sur le bâti ancien (à l'eau liquide/à la vapeur d'eau) ?

Les enduits peuvent être de différentes natures et avoir des propriétés mécaniques et hygrothermiques très différentes. Les propriétés mécaniques n'ont pas été étudiées ici. Il est important de retenir que les enduits avec trop de ciment peuvent fissurer sur des parois sujettes à de la dilatation, par contre les enduits à base de chaux peuvent plus facilement suivre les mouvements du mur.

Les enduits de bases organiques sont réputés plus élastiques que les enduits minéraux. A titre indicatif, le module d'élasticité s'élève à 1 000 N/mm² pour un enduit de base organique, à 2 000 N/mm² pour un enduit minéral à base de chaux hydraulique et à 8 000 N/mm² pour un enduit minéral à base de ciment.

Les propriétés hygrothermiques à prendre en compte sont le transport par capillarité, la perméabilité à la vapeur d'eau et la capacité de succion qui permet de déterminer la proportion d'eau de pluie absorbée par l'enduit. (En terme de vocabulaire, la capacité de succion correspond à la capacité du matériau à absorber l'eau liquide à son contact, tandis que le transport par « capillarité » inclut aussi la redistribution de l'eau liquide au sein du matériau).

Les grands types d'enduits sont listés ci-dessous (sachant que certaines formulations spécifiques peuvent donner des résultats différents, il est utile de se référer aux documents correspondants à chaque produit spécifique et aux professionnels spécialisés) :

- Les enduits industriels à base minérale (ciment) avec parfois une part de chaux hydraulique :
 - non-capillaires en général ;
 - de moyennement perméables à étanches à la vapeur d'eau selon les mélanges et les additifs ;
 - faible capacité de succion.
- Les enduits bâtards, à base de chaux hydraulique et d'une part de ciment (très utilisés dans d'anciennes rénovations) :
 - moyennement capillaires ;
 - de moyennement perméables à peu perméables à la vapeur d'eau selon les mélanges ;
 - capacité de succion faible à moyenne.
- Les enduits de chaux hydraulique :
 - capillaires ;
 - de moyennement perméables à perméables à la vapeur d'eau selon la chaux, naturelle ou non, indice, etc. ;
 - capacité de succion moyenne.
- Les enduits de chaux aérienne :
 - capillaires ;
 - perméables à la vapeur d'eau ;
 - capacité de succion moyenne.

- Les enduits étanches (certaines résines, ciment + additifs, bitumineux, etc.) :
 - non-capillaires ;
 - étanches à la vapeur d'eau ;
 - capacité de succion très faible voire nulle.
- Les enduits organiques, siliconés, silicatés : ils sont utilisés principalement sur de l'isolation par l'extérieur dans les ETICS et peuvent avoir des propriétés assez variables qui ont comme point commun :
 - au moins un peu perméable à la vapeur d'eau ;
 - capacité de succion très faible.

Sur du bâti ancien, l'expérience et les règles de l'art montrent que des enduits à base cimentaire trop prononcée peuvent poser des problèmes de durabilité et de détérioration. Il est plus raisonnable de se tourner vers des enduits chaux hydrauliques (ou aériennes dans certains cas particuliers) qui apporteront une protection à la paroi contre le climat tout en laissant circuler la vapeur d'eau pour respecter la règle des résistances à la vapeur présentée au chapitre 4. Vis-à-vis des mélanges industriels à base de chaux hydrauliques, une consultation de la fiche technique permet de vérifier ses propriétés qui peuvent être dans certains cas très éloignées de celles de chaux naturelles.

De manière schématique, le séchage d'un matériau poreux se déroule toujours en deux phases (Figure 24) :

- 1^{re} phase : le séchage est rapide parce que l'humidité est transportée par capillarité jusqu'aux interfaces où l'évaporation a lieu. Celle-ci peut être favorisée par les actions du vent.
- 2^e phase : le front d'évaporation progresse dans le matériau partiellement sec et le séchage devient plus lent avec un transport de vapeur d'eau dans les pores jusqu'à l'extérieur.

Si un enduit non-capillaire est appliqué sur la paroi constituée d'un matériau poreux, alors la première phase de séchage ne peut se dérouler et seule la seconde phase (beaucoup plus lente) subsiste.

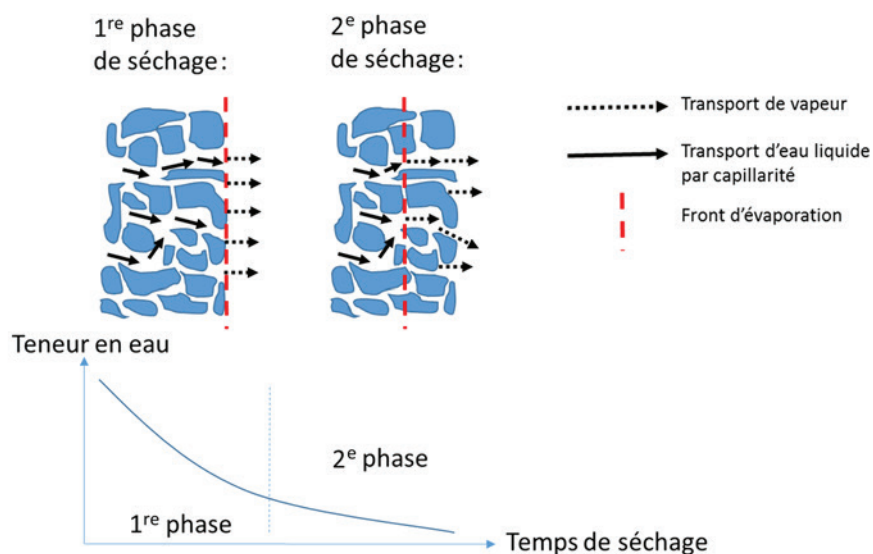


Figure 24 : Séchage dans un matériau poreux humide
(inspiré d'un schéma de la note d'information technique NIT 252 de décembre 2014 édité par le CSTC)

Si le mur à enduire est concerné par des remontées capillaires alors il est primordial d'utiliser un enduit capillaire pour permettre l'évacuation vers l'extérieur de l'eau liquide qui remonte du sol. L'enduit à base de chaux hydraulique sera passé en plusieurs couches et en surépaisseur au niveau du pied de mur (se renseigner auprès de professionnels compétents). Sur la Figure 25 par exemple, le soubassement a été enduit au ciment ce qui empêche la sortie de l'eau liquide et gêne le passage de la vapeur d'eau. Par conséquent, le flux de vapeur est concentré sur les premières pierres vues et provoque des dégradations, en l'occurrence une alvéolisation.

Si le mur à isoler est enduit avec un produit étanche ou avec une base forte de ciment et qu'un piquetage n'est pas prévu, il est nécessaire d'empêcher les transferts d'humidité vers la paroi. Pour cela, la mise en place d'un pare-vapeur côté intérieur ou d'un isolant étanche soigneusement continu est préconisée sous peine d'accumulation d'humidité dans le mur. Cette situation pourra être courante sur des parois en béton mais peut-être (très) risquée sur les murs anciens. Pour les parois en pan de bois à base de terre (bauge, pisé, torchis, etc.), pierres poreuses, l'élimination de cet enduit inadapté est nécessaire pour éviter des pathologies.



Figure 25 : Pierres de taille en tuffeau dégradées par alvéolisation au-dessus du soubassement. Celui-ci a été enduit de ciment, empêchant le séchage de l'eau liquide et gênant le passage de la vapeur d'eau.

Un enduit sur un mur permet de le protéger de la pluie battante. Dans le cas des enduits à base de chaux qui laissent pénétrer une partie de la pluie dans leur épaisseur, le « geste » de l'artisan et son savoir-faire permettront de limiter l'accroche de la pluie battante en façade et ainsi une plus faible quantité d'eau sera disponible pour absorption. Vis-à-vis de la pluie battante, il est important d'entretenir son enduit car des fissures permettront la pénétration d'eau liquide et pourront être la cause de pathologies, dues au gel ou plus loin dans la paroi en laissant de l'eau arriver jusqu'à l'interface avec l'isolant.

Exemple : pluie battante sur une paroi brique

Cet exemple illustre l'importance d'une protection contre la pluie battante, dans le cas d'une paroi en brique isolée par un isolant hygroscopique. Il s'agit de la simulation de la paroi brique HUMIBATex orientée nord avec le climat H1 et la pluie battante.

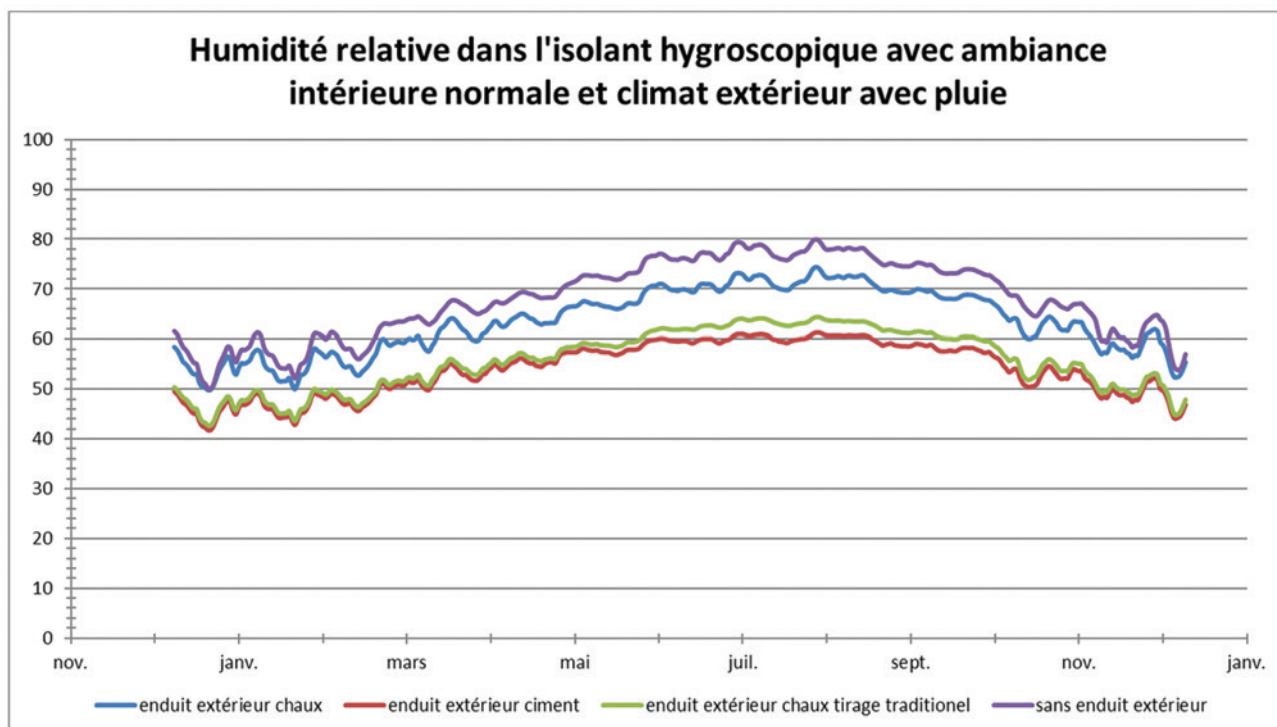


Figure 26 : Humidité relative dans l'isolant hygroscopique avec ambiance intérieure normale et climat extérieur avec pluie

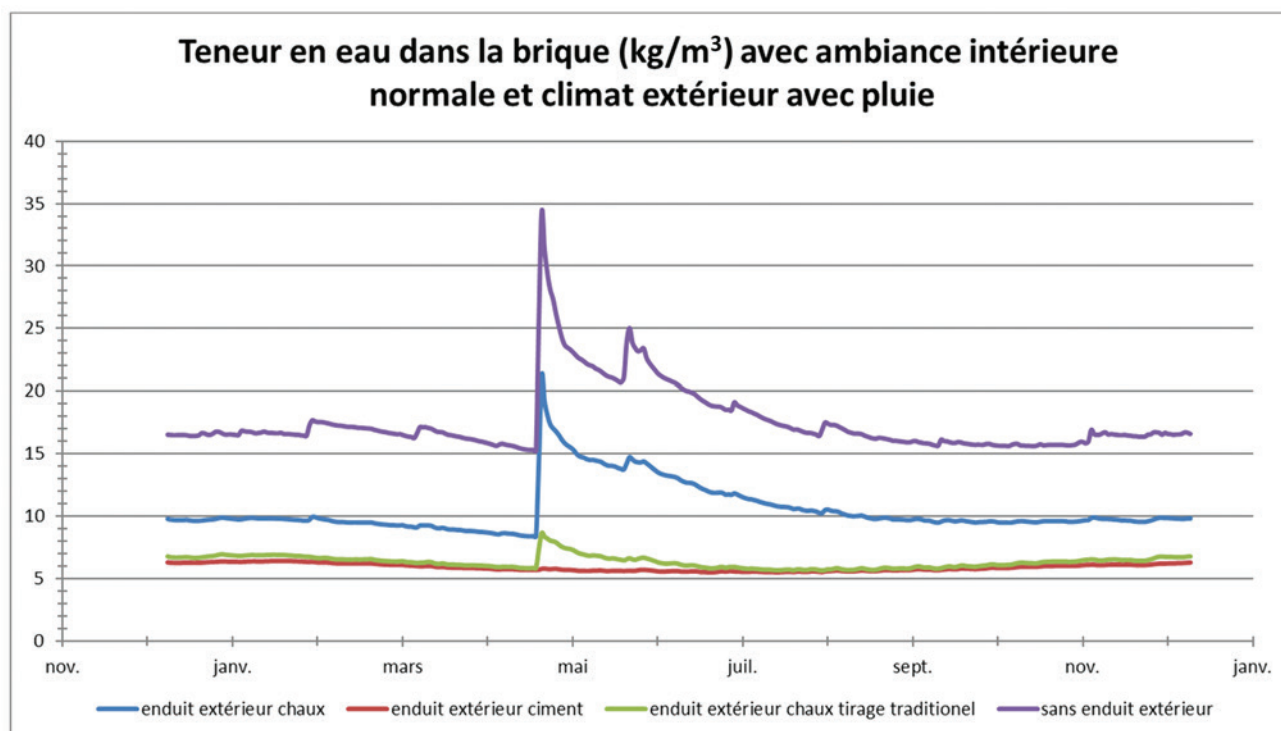


Figure 27 : Teneur en eau dans la brique avec ambiance intérieure normale et climat extérieur avec pluie

Cet exemple démontre l'intérêt de l'imperméabilité de l'enduit extérieur, pour le cas où la paroi brique est elle-même peu perméable à la vapeur d'eau. Le pic d'humidité correspond à l'épisode pluvieux sur cette façade nord, le plus intense de l'année.

Sur cet exemple, l'enduit dit « étanche » présente des résultats satisfaisants. Dans ce chapitre il a été précisé que ce type d'enduit pouvait présenter d'autres inconvénients. La pluie battante peut-être prise en compte de différentes manières. Dans les exemples ci-dessus la quantité de pluie battante reçue par l'enduit a été considérée sous deux aspects :

- 30 % de rebond et absorption de 100 % de la quantité restante,
- 30 % de rebond et absorption de 50 % de la quantité restante.

Cette hypothèse (certes grossière) est proposée pour illustrer les propriétés d'un tirage traditionnel d'enduit en termes de sens et d'état de surface. Les résultats de cette dernière simulation sont proches du cas « enduit étanche ». Les résultats concernant la chaux reprenant le plus de pluie battante sont tout de même nettement meilleurs que les cas sans enduits.

En conclusion, les transferts de vapeur d'eau sont à respecter lorsque l'on s'intéresse à l'enduit extérieur. Pour une paroi exposée à la pluie battante, l'enduit apporte une protection en retenant une partie de l'eau de pluie jusqu'au séchage par le vent et/ou le soleil. Sur du bâti ancien, des enduits à la chaux sont souvent préférables.

À retenir !

Question 6 : Faut-il poser un enduit extérieur perméable ou étanche sur le bâti ancien (à l'eau liquide/à la vapeur d'eau) ?

Sur un bâti perméable à la vapeur, il faut poser un enduit extérieur perméable à la vapeur pour ne pas accumuler de l'eau à l'interface avec l'isolant. Cet enduit doit protéger la paroi de la pluie battante et être perméable à la vapeur d'eau. Les enduits à la chaux hydraulique ou aérienne sont préférables sur le bâti ancien. Ils ne sont pas imperméables à la pluie mais capillaires et une épaisseur suffisante permet de se charger en eau de pluie avant de perdre cette eau sous les effets du vent et du soleil. Ce rôle de tampon hydrique permet de diminuer l'impact sur le reste du mur.

Des enduits modernes industriels prêts à l'emploi, notamment pour recouvrir des ITE, sont vendus comme perméables à la vapeur et protecteurs vis-à-vis de la pluie. Leurs propriétés peuvent être très variables d'un produit à l'autre. Il est important de consulter attentivement les fiches techniques.

Question 7 : Comment traiter les remontées capillaires ?

Diagnostiquer la présence de remontées capillaires

Les remontées capillaires désignent le phénomène de migration ascensionnelle d'humidité dans les murs du fait de la structure poreuse des matériaux qui les constituent. Les bâtiments en pierre, brique ou terre crue sont donc sujets à la présence de ces remontées capillaires (à l'inverse des bâtiments en béton).

Un mur touché par des remontées capillaires montre des signes de présence d'eau qui s'élève des deux côtés du mur. Plusieurs symptômes permettent de suspecter la présence de remontées capillaires dans les murs d'un bâtiment :

- l'humidité relative anormalement élevée dans les pièces du rez-de-chaussée d'un bâtiment bien ventilé et bien chauffé ;
- le décollement des matériaux de revêtements, papiers peints ou enduit en pied de mur ;
- l'apparition d'efflorescences, de champignons ou de moisissures ;
- des relevés, avec un appareil de mesure adapté, de l'humidité du mur à différentes hauteurs et des deux côtés du mur peuvent également témoigner d'une présence anormale d'eau dans les murs.

Si ces signes sont uniquement présents du côté extérieur et sur une hauteur limitée (15 cm environ), il peut s'agir d'un problème lié au rejaillissement des eaux pluviales ; il est nécessaire de vérifier dans ce cas avec un appareil de mesure adapté jusqu'à quelle hauteur le mur est humide.

Pour illustrer l'impact des différents traitements d'un mur ancien exposé à des remontées capillaires, des simulations de transferts couplés de chaleur et d'humidité ont été réalisées en tenant compte des sollicitations induites par une humidité ascensionnelle provenant du sol. Elles ont été réalisées avec les hypothèses suivantes :

- le mur de référence est constitué de pierre tendre (il s'agit d'un matériau capillaire donc sensible à l'humidité ascensionnelle) ;
- l'ambiance intérieure est humide. L'humidité relative intérieure est alors comprise entre 40 % et 70 % en fonction de la température extérieure ;
- le climat extérieur est représentatif de la zone H1 au sens de la RT 2012 (ville de référence Nancy) ;
- la prise en compte de défauts de mise en œuvre est négligée ;
- l'apport d'eau liquide par pluie battante en extérieur est nul en considérant que la façade étudiée est exposée au nord et protégée par un débord de toiture ;
- le mur ancien repose directement sur un sol sableux (sans arase) saturé en eau à 40 cm de profondeur.

L'évolution du comportement sur 10 ans de cette paroi a été simulée en faisant varier la composition du complexe isolant intérieur ainsi que la finition appliquée sur la façade extérieure.

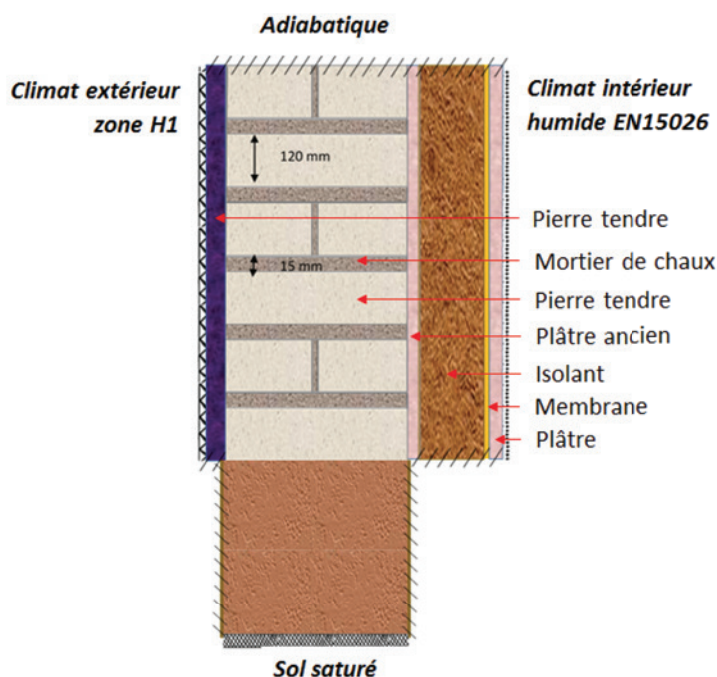


Figure 28 : Modèle d'un mur en pierre tendre isolé par l'intérieur sollicité par une humidité ascensionnelle (Wufi2D)

Pour évaluer les risques de pathologies liées à l'humidité, les indicateurs suivants ont été calculés pour chaque type d'isolant.

Ils sont classés de la manière suivante :

- Dégradation mécanique de la pierre à l'échelle de la pierre en pied de mur.
- Dégradation de l'isolant à l'échelle de l'isolant sur toute sa hauteur et son épaisseur.
- Dégradation du parement intérieur au niveau de la surface intérieure et sur toute la hauteur.
- Dégradation entre le mur et l'isolant au niveau de l'interface entre le mur et l'isolant et sur toute sa hauteur.
- Dégradation de la façade extérieure du mur au niveau de la surface du mur en contact avec le climat extérieur et sur toute sa hauteur.

Identifier les causes et les traiter

L'humidité des remontées capillaires provient de l'eau contenue dans le sol. Généralement, cette eau est d'origine naturelle ; dans le cas où elle serait d'origine accidentelle (rupture d'une canalisation par exemple), il suffirait de traiter directement le problème à sa source pour les stopper.

Le bâti ancien a couramment été construit sur des sols favorables à la présence de remontées capillaires. Cependant les murs anciens parvenaient à réguler l'humidité ascensionnelle. Malgré l'absence d'une arase étanche, l'humidité ascensionnelle pouvait s'évaporer vers les faces intérieure et extérieure du mur. De plus, le sol, au pied du mur, permettait également l'évaporation de l'humidité puisqu'aucun revêtement étanche n'était présent.

Ainsi, en couvrant les façades d'un mur ancien par un enduit ou un isolant fermé au passage de la vapeur, la surface d'évaporation de l'humidité du mur est fortement limitée. Pour illustrer ce point, reprenons le cas du mur en pierre tendre. En considérant que ce mur soit isolé à l'intérieur par un isolant non-hygroscopique avec un pare-vapeur hygrovariable, les variations de la teneur en eau de la pierre en contact avec le sol sont étudiées en choisissant des finitions extérieures différentes (Figure 29).

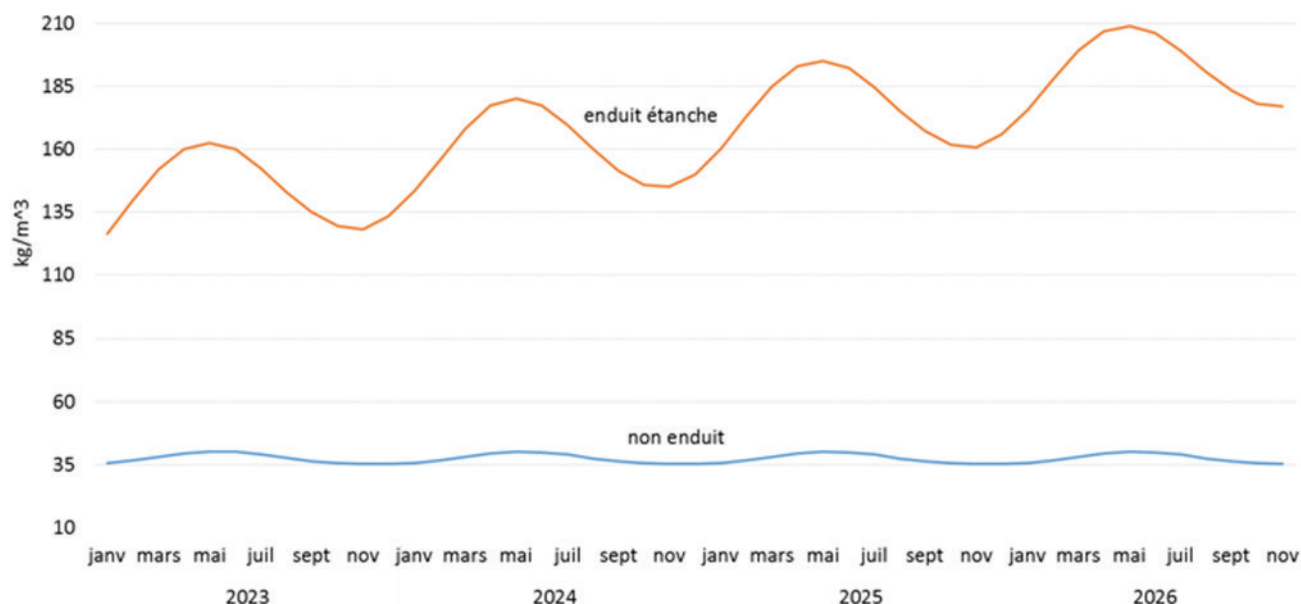


Figure 29 : Évolution de la teneur en eau du pied d'un mur en pierre tendre isolé par un complexe isolant non-hygroscopique – Impact de la finition extérieure

Les cycles d'humidification et de séchage du pied de mur se répètent d'une année sur une autre dans le cas d'un mur non enduit. À l'inverse, dans le cas où l'enduit est étanche, la teneur en eau de la pierre de base ne se stabilise pas et augmente au cours du temps. Cet exemple illustre le fait qu'un choix mal maîtrisé du complexe isolant et de la finition extérieure sur un mur sensible aux remontées capillaires peut conduire à aggraver ou à créer une situation pathologique.

Aussi, en mettant en œuvre des revêtements étanches sur le sol en pied des murs (allée cimentée, revêtement étanche des routes et des trottoirs), une surface d'évaporation de l'eau du sol est également supprimée. Le passage privilégié de l'humidité devient le mur ancien. Dans ces cas, les remontées d'humidité peuvent être amplifiées très fortement et conduire à l'apparition des pathologies décrites précédemment.

Ainsi, pour limiter l'impact de l'humidité ascensionnelle sur une construction ancienne, des traitements existent⁽³⁾.

D'abord, certaines solutions consistent à rétablir la circulation et l'évacuation de l'humidité :

- Sur les façades du mur, il conviendra de piquer l'enduit extérieur si ce dernier est étanche à la vapeur d'eau et si cela est possible. Une mise à nu des pieds de murs favorise également l'évaporation. Il faut dans ce cas précis s'assurer que cette disposition ne mette pas en péril la stabilité du mur.

3. Les traitements en question sont référencés ci-après par l'Agence Qualité Construction dans les fiches pathologie bâtiment (Fiche n°B11 – Remontées capillaires – 2015)

- En périphérie du mur, un drain peut être installé pour faciliter l'évacuation des eaux de pluies. En présence de fondation, il peut être situé en pied de mur. Dans le cas contraire ou dans le cas d'un terrain sableux, il sera éloigné pour éviter de déstabiliser le mur. La mise en place de graviers ou de pavés de grès posés sur un lit de sable et de chaux extérieure améliore aussi l'évaporation de l'humidité du sol.
- Sous la dalle, un hérisson de cailloux ventilé favorise également l'assèchement du sol. Une dalle réalisée en béton de chaux contribuera également à empêcher l'accumulation d'humidité dans le sol environnant le mur.

Lorsque ces solutions ne sont pas réalisables, des traitements ayant pour but de stopper l'ascension naturelle de l'eau existent :

- mise en place d'une arase étanche ;
- mise en place de siphons atmosphériques ;
- électro-osmose (application d'un courant en continu) ;
- électro-phorèse (injections de résines) ;
- électro osmo-phorèse (application d'un courant le temps d'injection de résine).

Ces types de traitements doivent assurer une barrière étanche rigoureusement continue ; l'humidité du sol pourrait s'infiltrer par d'éventuels points faibles.

Peu d'éléments existent sur l'évaluation de l'efficacité et de la durabilité de ces traitements.

Une fois le pied de mur relativement sec, la technique traditionnelle approuvée consiste à appliquer, sur la zone au-dessus du sol et sur quelques dizaines de cm de hauteur, un enduit à la chaux hydraulique en plusieurs passes et en surépaisseurs.

Traiter thermiquement par l'intérieur un mur toujours exposé aux remontées capillaires

Lorsque l'ensemble des prédispositions ont pu être prises pour limiter les apports d'humidité du sol et favoriser le séchage du mur, on peut envisager la mise en place d'une isolation intérieure pour réduire les déperditions thermiques du mur et améliorer le confort.

Une solution de réhabilitation constituée d'un isolant étanche reste à proscrire dans ces conditions. Il empêche toute possibilité de séchage du mur par la façade intérieure, ce qui est à éviter lorsque ce dernier est encore exposé à une source d'humidité ascensionnelle.

Les solutions faisant appel à un isolant fibreux ou en flocon hygroscopique ou non-hygroscopique peuvent être envisagées au cas par cas. Elles doivent néanmoins être complétées par la mise en place d'un pare-vapeur hygrovariable placé sur le côté intérieur car :

- sans membrane, il existe un risque d'accumulation de vapeur d'eau jusqu'à condensation entre le mur et l'isolant ;
- dans le cas où le mur est encore humide, l'isolant risque de se charger en humidité. Si la membrane intérieure est parfaitement étanche, l'humidité pourrait s'accumuler dans l'isolant. L'utilisation d'un pare-vapeur hygrovariable est alors préférable.

Il est également nécessaire de s'assurer que la teneur en eau des isolants fibreux hygroscopiques ne conduit pas à un développement fongique notamment si la quantité d'eau distribuée par capillarité est importante.

Pour illustrer ce point, comparons alors les résultats des études menées sur le mur en pierre tendre soumis à une humidité ascensionnelle en choisissant des membranes différentes. Etant donné la forte intensité de l'humidité ascensionnelle prise en compte dans cette étude, les risques de pathologies apparaîtront quelle que soit la membrane choisie. Les exemples qui suivent permettent uniquement d'illustrer quels types de traitements pourraient accentuer ces risques.

L'isolant appliqué est l'isolant hygroscopique. À partir des résultats des simulations, les indicateurs de risques d'apparition de ces pathologies ont été calculés (Tableaux 2 et 3). Les indicateurs dont les valeurs correspondent à des risques sont mis en valeur.

Tableau 2 : Indicateurs de risques de pathologies calculés sur un mur en pierre tendre sollicité par une humidité ascensionnelle – Impact de la membrane intérieure

	Dégradation de la pierre		Dégradation de l'isolant		Dégradation du parement intérieur
Localisation	Pierre en pied de mur		Plaque d'isolant		Parement intérieur
Risque	Niveau d'humidité	Équilibre atteint ?	Dégradation des propriétés thermiques		Développement fongique
Grandeur associée	Teneur en eau max	/	Humidité relative	Variation conductivité maximale	Humidité relative
Unité	kg _{eau} /kg _{mat}	/	%	%	%
Sans membrane	1,7 % < 25 %	Oui	Toujours < HRLim	+ 0 %	Toujours < HRLim
Avec pare-vapeur	2,6 % < 25 %	Oui	Toujours < HRLim	+ 2 %	Toujours < HRLim
Avec pare-vapeur hygrovariable	3,4 % < 25 %	Oui	Toujours < HRLim	+ 1 %	Toujours < HRLim

Tableau 3 : Indicateurs de risques de pathologies calculés sur un mur en pierre tendre non enduit sollicité par une humidité ascensionnelle – Impact de la membrane intérieure

	Dégradation entre le mur et l'isolant				Dégradation de la surface extérieure	
Localisation	Interface mur et isolant				Surface extérieure du mur	
Risque	Développement fongique		Condensation	Gel	Condensation	Gel
Grandeur associée	Plâtre nb. heure	Isolant nb. heure	Isolant nb. heure	Isolant nb. heure	nb. heure	nb. heure
Unité	h (8 760 h/an)	h (8 760 h/an)	h (8 760 h/an)	h (8 760 h/an)	h (8 760 h/an)	h
Sans membrane	8 122	2 207	0	0	0	0
Avec pare-vapeur	8 475	8 760	0	0	8 760	315
Avec pare-vapeur hygrovariable	7 410	0	0	0	0	0

Sans membrane, le risque de condensation et de développement fongique entre le mur et l'isolant est élevé. Cela est dû à la migration de l'humidité intérieure à travers l'isolant. Avec le pare-vapeur, cette migration est bloquée. Cependant, les risques de pathologies entre le mur et l'isolant sont maintenus voire amplifiés. En effet, le pare-vapeur empêche le mur de sécher par l'intérieur, le mur reste donc humide toute l'année et les risques entre le mur et l'isolant accentués. L'humidité s'évacue alors du côté extérieur ce qui a pour conséquence de générer un risque de condensation (8 664 h/an) puis de gel important sur l'interface du mur avec l'extérieur. L'intérêt de la membrane hygrovariable est de protéger le mur de l'humidité intérieure tout en étant à même d'évacuer son humidité due aux remontées capillaires en été grâce à son « ouverture » vis-à-vis des transferts de vapeur. Le risque de développement fongique reste élevé à cause de l'intensité des remontées capillaires mais est atténué par rapport aux autres traitements d'isolation.

Concernant le choix entre « hygroscopique » et « non-hygroscopique », il est difficile de conclure sur une solution préférentielle.

Ce constat est confirmé à partir des études menées sur le cas de mur en pierre tendre. Ces résultats permettent de comparer l'effet du type d'isolant lorsque le mur est enduit par un produit étanche ou non-enduit (Tableaux 4 et 5). Dans le cas où l'enduit est étanche, les risques de développement fongique et de détérioration de la surface extérieure sont présents toute l'année lorsque les remontées capillaires ont une telle intensité. L'isolant non-hygroscopique est aussi un facteur aggravant puisque la teneur en eau de la pierre en pied de mur ne se stabilise pas au bout de 10 ans. Sans enduit extérieur, les risques au niveau de la surface extérieure n'apparaissent pas. Néanmoins, le risque de développement fongique apparaît à cause de la présence des remontées capillaires.

Tableau 4 : Indicateurs de risques de pathologies calculés sur un mur en pierre tendre sollicité par une humidité ascensionnelle – Impact de l'isolant intérieur avec une membrane hygrovariable

	Dégradation de la pierre		Dégradation de l'isolant		Dégradation du parement intérieur
Localisation	Pierre en pied de mur		Plaque d'isolant		Parement intérieur
Risque	Niveau d'humidité	Équilibre atteint ?	Dégradation des propriétés thermiques		Développement fongique
Grandeur associée	Teneur en eau max	/	Humidité relative	Variation conductivité maximale	Humidité relative
Unité	kg _{eau} /kg _{mat}	/	%	%	%
Hygroscopique avec enduit étanche	2,6 % < 25 %	Oui	Toujours < HRlim	+1 %	Toujours < HRlim
Non-hygroscopique avec enduit étanche	10,9 % < 25 %	Non	Toujours < HRlim	+1 %	Toujours < HRlim
Hygroscopique sans enduit	3,4 % < 25 %	Oui	Toujours < HRlim	+1 %	Toujours < HRlim
Non-hygroscopique sans enduit	2,09 % < 25 %	Oui	Toujours < HRlim	0 %	Toujours < HRlim

Tableau 5 : Indicateurs de risques de pathologies calculés sur un mur en pierre tendre sollicité par une humidité ascensionnelle – impact de la membrane intérieure.

NB : Les isolants hygroscopiques et non-hygroscopiques n'ont pas la même résistance thermique.

	Dégradation entre le mur et l'isolant				Dégradation de la surface extérieure	
Localisation	Interface mur et isolant				Surface extérieure du mur	
Risque	Développement fongique		Condensation	Gel	Condensation	Gel
Grandeur associée	Plâtre Nb. heure	Isolant Nb. heure	Isolant Nb. heure	Isolant Nb. heure	Nb. heure	Nb. heure
Unité	h (8 760 h/an)	h (8 760 h/an)	h (8 760 h/an)	h (8 760 h/an)	h (8 760 h/an)	h
Hygroscopique avec enduit étanche	8 475	8 760	0	0	8 760	315
Non-hygroscopique avec enduit étanche	8 760	8 760	8 760	0	8 760	238
Hygroscopique sans enduit	7 410	0	0	0	0	0
Non-hygroscopique sans enduit	6 920	0	0	0	0	0

D'autres solutions de correction thermique sur un mur humide peuvent également être prescrites :

- mise en place d'une lame d'air ventilée (par l'air extérieur) par des tasseaux de bois entre le mur et le complexe isolant ;
- l'emploi d'isolants garantissant une continuité de capillarité entre l'isolation thermique et le mur (enduit chanvre et chaux, ouate de cellulose en flochage).

Ces solutions n'ont pas fait l'objet d'investigations particulières dans le cadre du projet HUMIBATex.

À retenir !

Question 7 : Comment traiter les remontées capillaires ?

La problématique doit faire l'objet d'un diagnostic avant mise en œuvre de l'isolation. Autant que possible les solutions traditionnelles pour limiter les remontées capillaires doivent être utilisées.

Sur un mur sain, qui comporte un enduit capillaire et perméable à la vapeur d'eau, l'isolation peut être réalisée avec de préférence un isolant fibreux et si possible hygroscopique et associé à une membrane pare-vapeur hygrovariable.

Un mur enduit avec un produit étanche non adapté au bâti ancien ne pourra pas être isolé sans risques.

3. L'isolant

Question 8 : Quelle est la différence entre un produit isolant « étanche » à la vapeur d'eau et un produit isolant fibreux ?

Parmi les isolants thermiques du bâtiment, on peut distinguer notamment deux grandes catégories :

- Les plastiques alvéolaires (polystyrène expansé ou extrudé, polyuréthane) sont étanches à la vapeur d'eau ($30 \leq \mu \leq 500$)⁽⁴⁾.
- Les isolants fibreux peuvent être d'origine minérale (laine de verre, laine de roche, etc.), végétale (laine, de bois, laine de chanvre, ouate de cellulose, paille, etc.) ou animale (laine de mouton, plume de canard, etc.). Ils sont par nature perméables à la vapeur d'eau ($\mu \leq 10$).

Les autres : Le liège qui est peu perméable à la vapeur d'eau, le verre cellulaire qui rejoint la première catégorie, la mousse phénolique, etc.

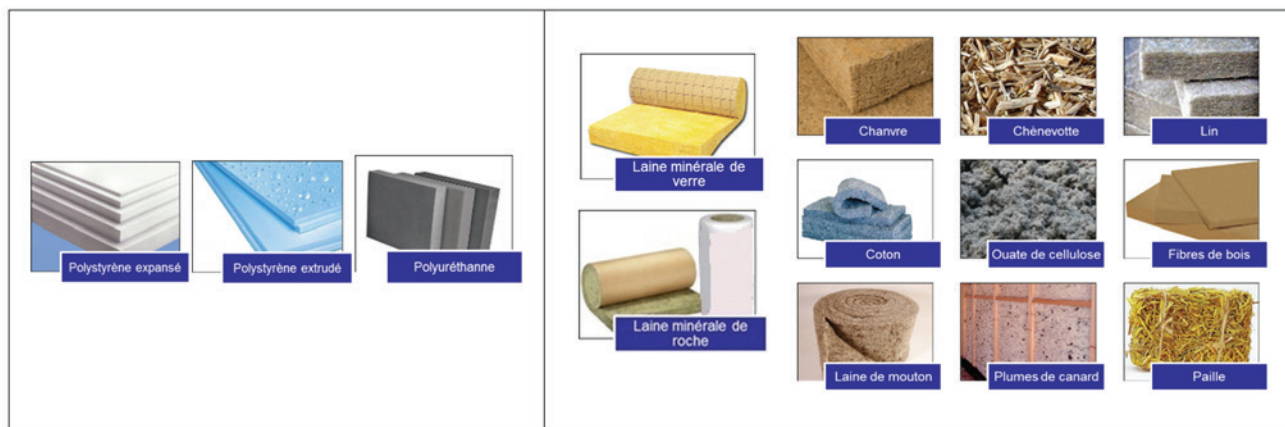


Figure 30 : A gauche : isolants en plastiques alvéolaires. A droite : isolants fibreux (source : CSTB)

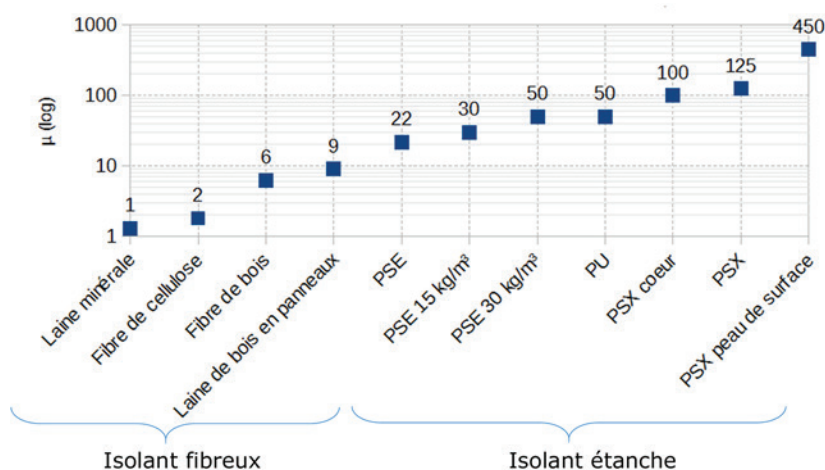


Figure 31 : Comparaison des coefficients de résistance à la diffusion de vapeur (μ en échelle logarithmique) (source des données : Fraunhofer-Gesellschaft et Ecole polytechnique de l'université de Lund)

4. Pour rappel, μ désigne le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau, dont la définition est rappelée en début d'ouvrage.

Le transfert de vapeur d'eau à travers la paroi est donc plus important avec un isolant fibreux.

En conditions normales hivernales, la pression de vapeur d'eau est plus importante à l'intérieur qu'à l'extérieur. Celle-ci migre donc à travers l'isolant fibreux (sans membrane) qui en absorbe une partie. Par contre la teneur en eau dans un isolant étanche à porosité fermée reste plus faible.

Il convient donc, en particulier si l'ambiance intérieure est humide, d'associer les isolants fibreux avec une membrane pare-vapeur côté intérieur (cf. chapitre D). Ainsi, le complexe isolant/membrane pare-vapeur présente globalement la même capacité de résistance à la diffusion de vapeur d'eau, de l'intérieur vers l'extérieur, qu'un isolant étanche. Le transfert de vapeur d'eau à travers la paroi est limité, la teneur en eau de l'isolant plus faible et le risque de pathologie diminué.

En revanche, si le flux de vapeur se fait de l'extérieur vers l'intérieur, ce qui peut arriver en été, l'isolant étanche bloque le flux à l'interface avec le mur. Il se crée ainsi un point d'accumulation d'humidité, qui peut conduire à des pathologies (risque de condensation, développements fongiques, etc.).

L'isolant fibreux hygroscopique, y compris avec une membrane, n'étant pas, à son interface avec le mur, étanche à la vapeur d'eau peut jouer le rôle de tampon hydrique. En absorbant l'excès d'humidité, il empêche ce point d'accumulation et à l'aide d'une membrane hygrovariable ou à S_d fixe qui ne soit pas trop important, celle-ci peut sécher lentement, y compris vers l'intérieur. Il faut néanmoins faire attention à ce que l'apport d'humidité extérieur ne soit pas trop important (cas d'un mur fissuré exposé à la pluie, de remontées capillaires, etc.), au risque d'avoir des pathologies dans l'isolant.

À noter qu'une couche d'isolation constituée de panneaux rigides comportera des joints entre les plaques et souvent entre les planchers et les plaques en isolation par l'intérieur. Ces joints devront faire l'objet d'un travail précis et durable à la mise en œuvre sinon ils constitueront des chemins privilégiés pour l'humidité et de l'air pourrait s'infiltrer. Ces deux situations conduisant à des pathologies localisées de type développement fongique sur la paroi derrière l'isolant.

Pour conclure vis-à-vis des isolants dits « étanches », deux cas de figures sont à distinguer :

- le cas où de l'humidité peut s'accumuler à l'interface isolant/paroi, qu'il y ait une lame d'air ou non ;
- le cas où l'humidité n'accède pas à cette interface.

Seul le deuxième cas de figure peut permettre l'utilisation d'isolant dit « étanche ». Même dans ce cas, il faudra veiller au risque de gel sur le bord extérieur de la paroi, notamment avec une isolation forte.

L'humidité peut s'accumuler à l'interface isolant/paroi lorsqu'il y a :

- des remontées capillaires ;
- une étanchéité à l'air imparfaite de la couche d'isolant « étanche », comme aux jonctions de planchers ou entre plaques ;
- des parois qui permettent à une partie de l'humidité apportée par la pluie de pénétrer, briques non-enduites, pierres poreuses, pan de bois torchis, pisé, etc. (des parois constituées de matériaux capillaires) ;
- une humidification accidentelle, problème de tuyauterie, de toiture, etc.

Ces éléments impliquent qu'une isolation par l'intérieur à base de produits « étanches » tel que définie ici ne devrait pas être prescrite à la légère sur du bâti ancien qui se trouve souvent confronté à au moins l'une des quatre situations citées ci-dessus.

À retenir !

Question 8 : Quelle est la différence entre un produit isolant « étanche » à la vapeur d'eau et un produit isolant fibreux ?

La mise en œuvre entre ces deux familles est différente puisque les plaques d'isolant « étanche » se posent seules en assurant une continuité de la couche isolante, tandis que les isolants fibreux devront être associés à une membrane de la famille des pare-vapeurs qui va limiter la migration de vapeur de l'ambiance intérieure vers la paroi et qui va assurer l'étanchéité à l'air.

L'utilisation de la famille des isolants étanches comporte des limites pour éviter des pathologies. L'accumulation de l'humidité dans la partie froide du mur est à proscrire. Attention ce phénomène est fréquent sur le bâti ancien.

Question 9 : Quel est l'impact du choix de l'isolant, entre isolant hygroscopique et non-hygroscopique ?

Chacune des deux familles de produit dispose d'avantages et d'inconvénients. Les isolants hygroscopiques sont globalement plus sensibles à l'humidité que les isolants non-hygroscopiques dans le sens où leur teneur en eau - lorsqu'ils sont d'origine biosourcée - ne doit pas dépasser un seuil limite exprimé en teneur en eau massique (23 % kg d'eau/kg de produit en première approche), au risque d'entraîner l'apparition de développement fongique (moisissures, champignons). Ils ont une plus forte capacité à adsorber/désorber de la vapeur d'eau par rapport à un isolant peu hygroscopique (figure ci-dessous). Cette propriété permet de modérer l'hygrométrie dans les matériaux constitutifs de la paroi et donc atténuer le risque de condensation en jouant le rôle de tampon hydrique à condition que cette humidité stockée puisse être évacuée par la suite.

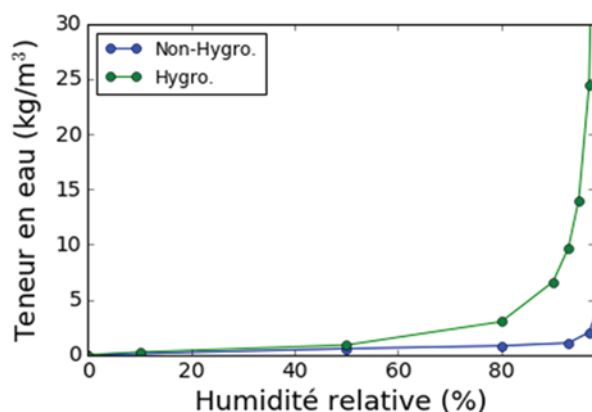


Figure 32 : Isotherme d'adsorption de la vapeur d'eau de matériaux isolants (ces courbes ne sont pas uniques et dépendent des produits considérés, elles sont présentées ici à titre d'exemple)

La conductivité thermique des produits augmente avec leur teneur en eau. Cela ne se produit qu'à des humidités relatives très importantes pour les isolants fibreux non-hygroscopiques mais peut être problématique pour les isolants hygroscopiques lorsque l'humidité relative est élevée.

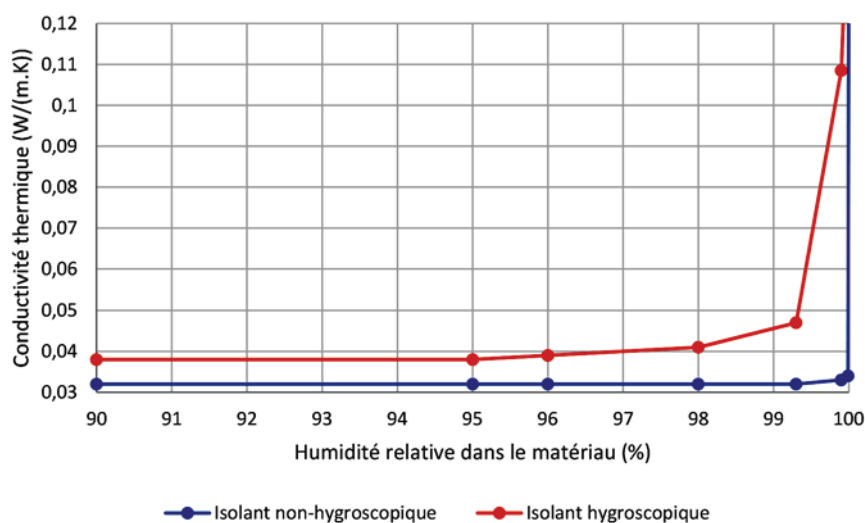


Figure 33 : Conductivité thermique type en fonction de l'humidité relative pour un isolant non-hygroscopique et un isolant hygroscopique (ces courbes ne sont pas uniques et dépendent des produits considérés, elles sont présentées ici à titre d'exemple)

Sur la Figure 33, la conductivité thermique de l'isolant hygroscopique étudié commence à augmenter à partir de 96 % d'humidité relative et progresse de 7,7 % à 98 % passant de 0,038 à 0,041 W/(m.K). La conductivité thermique de l'isolant non-hygroscopique n'augmente en revanche que lorsque l'humidité relative est proche de 100 %. De manière schématique, cela s'explique dans le cas général par le fait que les fibres des isolants non-hygroscopiques sont planes, la porosité du matériau est constituée par le réseau des fibres tandis que dans le cas des matériaux plus hygroscopiques, le réseau poreux est également présent dans les fibres. Par ailleurs, certains produits isolants industriels sont traités chimiquement lors de leur fabrication pour être hydrophobes.

Par ailleurs, les isolants hygroscopiques sont souvent capillaires. C'est le cas du silicate de calcium, de la ouate de cellulose, et des autres laines végétales par exemple. Cette propriété leur permet de diffuser l'eau sous forme liquide. Si celle-ci n'est pas bloquée, elle pourra s'évaporer plus aisément (voir Figure 24).

La question du choix entre un isolant fibreux de type hygroscopique ou un isolant fibreux non-hygroscopique doit se faire notamment en fonction de la configuration de la paroi à isoler et par rapport à d'autres considérations propres aux matériaux qui ne font pas l'objet de ce guide telles que l'acoustique ou les déclarations environnementales des produits, etc.

Pour les situations les moins exigeantes du point de vue de l'humidité, c'est-à-dire avec des sollicitations modestes suivantes :

- quasiment pas de remontées capillaires ;
- peu de pluie battante ;
- un climat intérieur normal avec un système de ventilation opérationnel.

Les isolants fibreux hygroscopiques ou non-hygroscopiques pourront être utilisés sans conséquences particulières du choix entre ces produits. Il est toutefois conseillé de les associer avec une membrane pare-vapeur hygrovariable de S_d suffisant, (voir la partie D).

Dans d'autres conditions, le tampon hydrique fourni par l'isolant hygroscopique peut apporter un bénéfice en permettant à la paroi ancienne d'être moins chargée en humidité. Cela pourra être utile dans les situations où la résilience de la paroi réhabilitée est sollicitée, comme avec une humidification accidentelle ou une déchirure, un percement de la membrane pare-vapeur.

Les illustrations A et B, partie « 5. Illustrations communes aux quatre chapitres » permettent de montrer sur des cas analysés dans le projet HUMIBATex les comportements des deux familles d'isolants fibreux dans diverses situations.

À retenir !

Question 9 : Quel est l'impact du choix de l'isolant, entre isolant hygroscopique et peu hygroscopique ?

La différence de comportement entre les isolants fibreux « hygroscopiques » et les isolants fibreux « peu hygroscopiques » s'observe lorsqu'il y a des sollicitations d'humidité importantes. Autrement dit lorsqu'une ou plusieurs sources d'humidité sont importantes (par exemple en cas de brèche dans une membrane constituant un fort passage d'air humide). Dans ce cas l'aspect hygroscopique permet de retenir une partie de l'humidité au sein du matériau en vue d'un séchage ultérieur jouant ainsi le rôle de tampon. Si le séchage ultérieur n'est pas possible alors des dégradations du matériau dues à l'accumulation d'humidité sont à prévoir (le séchage peut être empêché si la paroi est fermée par d'un côté un enduit étanche et de l'autre un pare-vapeur à fort S_d par exemple). À noter qu'un matériau hygroscopique et capillaire est plus avantageux car il sèche plus rapidement.

Question 10 : Quel est l'impact de l'épaisseur de l'isolant ?

D'un point de vue des transferts thermiques, une augmentation de l'épaisseur de l'isolant et/ou la diminution de la conductivité thermique entraîne l'augmentation de la résistance thermique et donc la réduction des besoins énergétiques de chauffage. Néanmoins, comme l'illustre le graphique ci-dessous (besoin calculé sur une maison d'environ 100 m² en blocs aggloméré béton ou parpaing), le gain effectif est de moins en moins important proportionnellement à l'augmentation de l'épaisseur d'isolant. L'évolution des besoins énergétiques en fonction de l'épaisseur de l'isolant n'est pas linéaire. Les dix premiers centimètres d'isolant ont un rôle important et leur coût sera vite amorti grâce à l'économie d'énergie réalisée tandis que les surépaisseurs suivantes permettent toujours de diminuer les besoins en chauffage mais l'effet de chaque centimètre supplémentaire tend à s'atténuer.

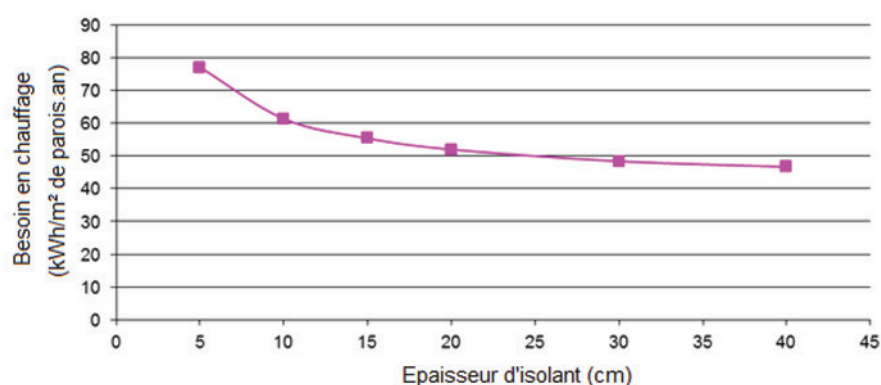


Figure 34 : Évolution des besoins de chauffage d'une paroi constituée de blocs bétons alvéolaires en fonction de l'épaisseur d'isolant
(« De la RT 2005 au BBC : une maison individuelle, des solutions constructives », 2010)

D'un point de vue des transferts hydriques, une augmentation de la résistance thermique de l'isolant en ITI (via une augmentation de l'épaisseur ou une diminution de la conductivité thermique) diminuera la température à l'interface isolant/structure et augmentera le risque de condensation et/ou de développement fongique.

Cette situation peut être ou non problématique suivant les situations. Il faut distinguer quatre risques hygrothermiques dans les parois verticales, ces risques sont issus des critères suivants :

Coté extérieur :

1. La pluie ne peut pas pénétrer la paroi (soit parce qu'elle n'accède pas au mur, soit parce que celui-ci est recouvert d'un enduit qui le protège efficacement).
2. La pluie peut pénétrer la paroi (le mur est exposé à de la pluie battante et il n'y a pas d'enduit protecteur ou un enduit en mauvais état).

Coté intérieur :

- a. Il n'y a quasiment pas de flux de vapeur d'eau qui transite entre la paroi et le volume intérieur.
- b. Un flux de vapeur d'eau non négligeable peut circuler entre la paroi et le volume intérieur.

Le cas 1-a correspond au cas où il n'y a pas de sollicitations en humidité de la paroi, dans la réalité pour être dans cette configuration il faut que les éléments « barrières » soient parfaits à la pose et vieillissent sans problèmes, ce qui n'est pas toujours le cas. Dans cette situation finalement assez théorique, seules les propriétés thermiques sont importantes pour l'isolant.

Le cas 1-b correspond au cas où la sollicitation en humidité vient du côté intérieur. Si cet apport de vapeur d'eau dans la paroi est important alors il peut y avoir une forte condensation en zone froide derrière l'isolant et les risques hygrothermiques seront présents quelle que soit l'épaisseur de l'isolant mais ils seront d'autant plus importants que la résistance thermique de l'isolant est importante.

Le cas 2-a correspond au cas où la sollicitation en humidité vient du côté extérieur, ce cas est illustré à titre d'exemple en Figure 35 pour une paroi pan de bois torchis avec un isolant non-hygroscopique et un pare-vapeur hygrovariable (de S_d variant entre 0 et 26 m). Les courbes présentent les résultats de teneur en eau dans les éléments de la paroi ancienne pour deux épaisseurs d'isolants. La teneur en eau est légèrement plus importante avec l'épaisseur d'isolant la plus forte mais sans que cela soit prépondérant. Dans ce cas, les facteurs impactants se situent au niveau des propriétés de l'enduit extérieur plus qu'au niveau de l'épaisseur d'isolant.

Enfin, le cas 2-b correspond au cas où les sollicitations d'humidité viennent de l'intérieur et de l'extérieur. La conclusion est la même que pour 1-b avec un facteur aggravant si l'humidité peut s'accumuler entre l'isolant et la paroi ancienne.

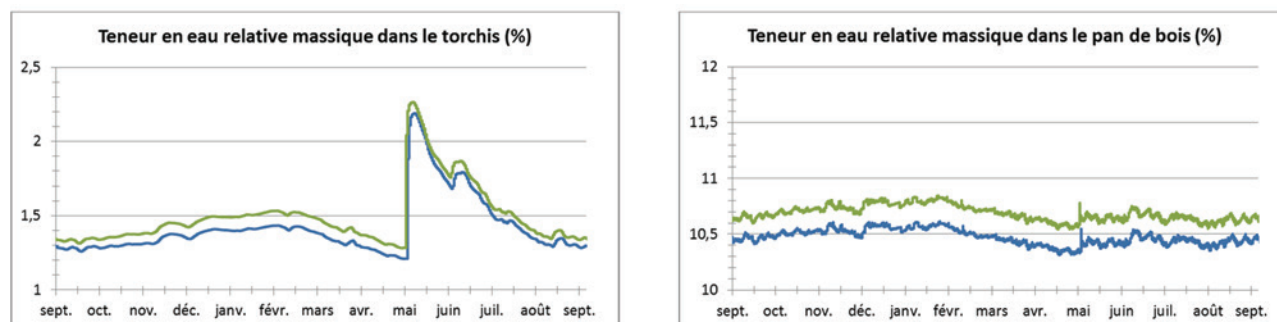


Figure 35 : Comparaison de teneur en eau massique dans deux parois pan de bois torchis isolées avec un isolant non-hygroscopique et un pare-vapeur hygrovariable de S_d (0-26 m) : en bleu avec 8 cm d'isolant et en vert avec 15 cm d'isolant

À retenir !

Question 10 : Quel est l'impact de l'épaisseur de l'isolant ?

L'épaisseur de l'isolant a avant tout un rôle sur le comportement thermique de la paroi. Dans certaines situations, notamment quand le séchage côté extérieur est impossible du fait des propriétés des matériaux (non perspirants et non-capillaires) alors plus la résistance thermique rapportée est importante plus le risque de condensation derrière l'isolant et d'accumulation d'humidité est fort. Cela peut mener à du développement fongique et à dégrader des pièces de bois qui seraient présentes.

4. Le pare-vapeur

Question 11 : Quels sont les différents types de pare-vapeur ?

Les transferts d'humidité s'établissent généralement de l'intérieur du local vers l'extérieur (notamment en hiver). Pour les limiter, une barrière aux transferts de vapeur d'eau peut être utilisée.

Cette barrière peut s'appeler « membrane gérant l'apport de vapeur » et le terme générique est « pare-vapeur ». Le pare-vapeur est une membrane de faible épaisseur. Il est placé entre l'isolant et le parement intérieur. Le pare-vapeur est caractérisé par le facteur S_d qui traduit sa résistance à la diffusion de la vapeur d'eau (exprimé en épaisseur équivalente d'air, donc plus le S_d est grand plus le pare-vapeur est étanche à la vapeur d'eau). Le facteur S_d peut être fixe ou variable en fonction de l'hygrométrie, dans ce cas, on parlera de pare-vapeur hygrovariable. Ce dernier est utilisé pour les climats modérés afin de faciliter le séchage de la paroi durant les périodes estivales. Dans les documentations techniques ou certains ouvrages, le terme de frein-vapeur peut être utilisé. Ce terme illustre une membrane pare-vapeur avec un S_d qui est suffisamment élevé pour bloquer une partie du flux de vapeur en période de chauffe, mais suffisamment bas pour permettre le séchage vers l'intérieur en été. Par contre aucune règle ou document ne définit le niveau d'étanchéité aux transferts de vapeur d'eau des « frein-vapeur ».

Le pare-vapeur peut être plus ou moins résistant aux transferts de vapeur d'eau suivant sa nature.

Les grandeurs nécessaires à la comparaison des différentes membranes sont données dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Grandeurs hygrothermiques

Symbole	Définition
δ	Perméabilité à la vapeur d'eau en $g/(m^2.Pa.s)$ δ = variation de masse en g/(surface de l'éprouvette.la différence de pression partielle de vapeur d'eau entre les deux faces de l'éprouvette et par seconde)= $\Delta(G/s)/(\Delta P.S)$
Z	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau en $m^2.h.Pa/mg$ déterminée selon la norme NF EN 12086
W	Perméance à la vapeur d'eau W en $mg/(m^2.h.Pa)$ $W = 1/Z = \delta_{air}/(d.\mu)$ (d étant l'épaisseur du produit)
δ_{air}	Perméabilité à la vapeur d'eau de l'air en $mg/(m.h.Pa)$ selon la norme NF EN 12086
μ	Indice de résistance à la diffusion de vapeur d'eau selon la norme NF EN 12086 (indice sans dimension) $\mu = \delta_{air}/\delta$
S_d	Épaisseur en m d'une couche d'air ayant la même perméance que le matériau considéré $S_d = Z.\delta_{air} = \mu.d$ (d étant l'épaisseur du produit)

Les valeurs de μ et S_d sont d'autant plus grandes que la barrière à la vapeur d'eau est étanche.

Dans la littérature, dans les différents documents normatifs, chez les bureaux d'études ou les maîtres d'œuvre, les unités des grandeurs hydriques utilisées sont très différentes. Le tableau de conversion de la perméabilité à la vapeur d'eau (Tableau 7) permet de convertir les unités de la perméabilité à la vapeur d'eau.

Tableau 7 : Tableau de conversion de la perméabilité à la vapeur d'eau

	g/(m².h.mmHg)	kg/(m².s.Pa)	mg/(m².h.Pa)
g/(m ² .h.mmHg)	1	2,084.10 ⁻⁹	7,502
kg/(m ² .s.Pa)	4,798.10 ⁺⁸	1	3,6.10 ⁺⁹
mg/(m ² .h.Pa)	0,1333	2,778.10 ⁻¹⁰	1

Dans le Tableau 8 sont indiquées des valeurs de résistance à la diffusion de vapeur d'eau pour des films barrières utilisés régulièrement.

Tableau 8 : Quelques valeurs de résistance à la diffusion de vapeur d'eau de films barrières (Guide RAGE Isolation thermique par l'intérieur en rénovation. Juin 2015)

Type de barrière	Sd	Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau Z en		
	m	(m².s.Pa)/g	(m².h.mmHg)/g	(m².h.Pa)/mg
Kraft PE	3.00	1.6E+10	33	4
Film PE	18.00	9.4E+10	197	26
Film PE épais	90.00	4.7E+11	984	131
Film PET Alu métallisé	160.00	8.4E+11	1 749	233
Film PET Alu laminé	250.00	1.3E+12	2 732	363
Film hygro-variable	0.04 à 27	2E+08 à 5E+10	0,4 à 109	0,06 à 14

Le pare-vapeur fait écran aux transferts de vapeur d'eau mais il est également étanche aux transferts d'air. L'étanchéité à l'air permet de limiter les fuites d'air et par conséquent de réduire les surconsommations d'énergie. Le pare-vapeur ne déroge pas à l'emploi d'un pare-pluie en toiture ou en construction à ossature bois. Les DTU renseignent sur le caractère obligatoire ou non des pare-pluies en fonction de leur mise en œuvre.

En revanche, l'étanchéité totale à la vapeur d'eau peut engendrer le piégeage de l'humidité qui peut dégrader la qualité de l'air intérieur, la performance thermique de l'enveloppe pour certains isolants et la durabilité de la paroi. Le maintien ou la mise en place d'une ventilation correctement dimensionnée est toujours complémentaire à la pose d'une membrane y compris très étanche pour s'épargner les problèmes d'humidité en surface intérieure des murs et pour éviter une pénétration d'air humide par d'éventuelle faiblesse de la membrane.

A noter que le Sd indiqué sur le produit correspond au résultat atteint avec une mise en œuvre parfaitement continue suivant les recommandations du fabricant. Ainsi, à l'échelle de la paroi, un pare-vapeur avec un Sd fabricant donné pourra avoir des performances équivalentes à un pare-vapeur de Sd largement inférieur si les lés de membrane ne se recouvrent pas et sont mal scotchés. À une échelle encore plus localisée, l'effet pourra même être contre-productif, le défaut de membrane formant un passage privilégié de la vapeur d'eau qui conduit à une accumulation localisée d'humidité dans la paroi.

Une membrane hygrovariable est caractérisée par une résistance au passage de la vapeur d'eau dépendant de l'hygrométrie de son environnement immédiat ou d'autres paramètres suivant les produits. Dans la plupart des cas, elle laisse passer la vapeur d'eau lorsque l'humidité est élevée (cas en été) et elle la bloque lorsque l'humidité est faible (cas en hiver), voir la Figure 36. De ce fait, elle permet d'éviter la pénétration trop importante de vapeur dans la paroi en hiver tout en permettant le séchage de celle-ci en été. La résistance au passage de la vapeur peut aussi être impactée par l'ambiance moyenne intérieure (sur le long terme, les variations rapides n'entrent pas en compte). Ainsi dans une pièce humide en continu, une membrane pare-vapeur hygrovariable sera ouverte au passage de la vapeur et celle-ci pourra migrer dans la paroi, ce qui n'est pas toujours souhaitable. De ce fait il est important de comprendre la complémentarité entre la pose d'une membrane hygrovariable performante et l'aération/ventilation des locaux pour avoir une ambiance intérieure normale.

Il existe également des produits avec un sens de pose et dont les propriétés d'évolution de la résistance au passage de la vapeur évoluent en fonction de l'humidité côté paroi d'après leur documentation technique.

Il est important de vérifier que ce type de membrane est bien adapté à la paroi considérée. Les membranes hygrovariables sont évaluées dans le cadre de l'Avis Technique qui décrit précisément quelles sont les configurations adaptées à ces membranes ainsi que la mise en œuvre de celles-ci.

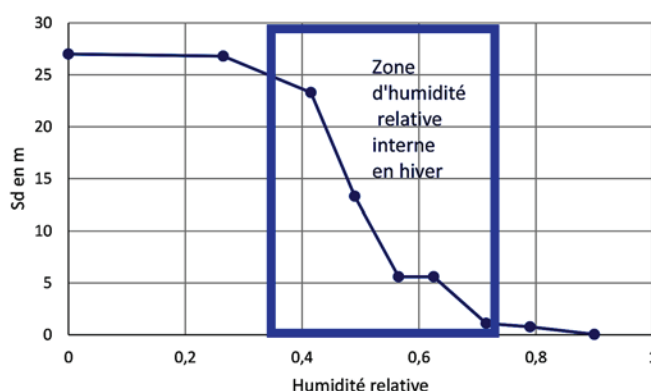


Figure 36 : Exemple d'évolution de la perméabilité à la vapeur d'eau d'un produit hygrovariable

À retenir !

Question 11 : Quels sont les différents types de pare-vapeur ?

Les pare-vapeur sont des membranes apportant plus ou moins de résistance au passage de la vapeur d'eau. Généralement ils assurent également la fonction de barrière d'étanchéité à l'air. Leur pose doit être soignée, avec les recouvrements et les fixations prévus par les documents techniques sous peine de performances dégradées, voire d'être contre-productif pour le comportement hygrothermique de la paroi. Il existe des pare-vapeur qui bloquent quasiment tout passage de vapeur d'eau, avec des Sd de 50 m voire plus, des pare-vapeur qui bloquent fortement la vapeur d'eau avec des Sd supérieurs à 15 m et des pare-vapeur que l'on qualifie parfois de frein-vapeur qui bloquent une partie de la vapeur d'eau avec des Sd inférieurs à 15 m. Enfin il existe des membranes pare-vapeur hygrovariables dont la résistance au passage de la vapeur d'eau varie en fonction de l'hygrométrie à proximité. Celles-ci ont pour but de laisser la possibilité à un mur humide de sécher vers l'intérieur tout en assurant le rôle de pare-vapeur lorsque le mur a une humidité normale.

Question 12 : quels sont les effets d'un pare-vapeur, fixe ou hygrovariable et dans quel cas est-ce intéressant ?

Le pare-vapeur est une membrane placée entre le parement intérieur et l'isolant thermique permettant de limiter le transfert de vapeur de l'ambiance intérieure vers la paroi et donc de contribuer à maintenir un niveau d'hygrométrie modéré dans la paroi. Ainsi, les risques de condensation, de développement fongique et de diminution des performances thermiques de certains isolants sont significativement limités. Le pare-vapeur est caractérisé par le facteur S_d qui traduit sa résistance à la diffusion de la vapeur d'eau (cf. question 11).

Afin d'illustrer son incidence en approche simplifiée, la Figure 37 présente les profils de pression de vapeur obtenus par la méthode de Glaser. Le pare-vapeur fait chuter significativement la pression de vapeur dans l'enveloppe de l'intérieur vers l'extérieur. Cette dernière passe en dessous de la pression de vapeur saturante évitant ainsi la condensation.

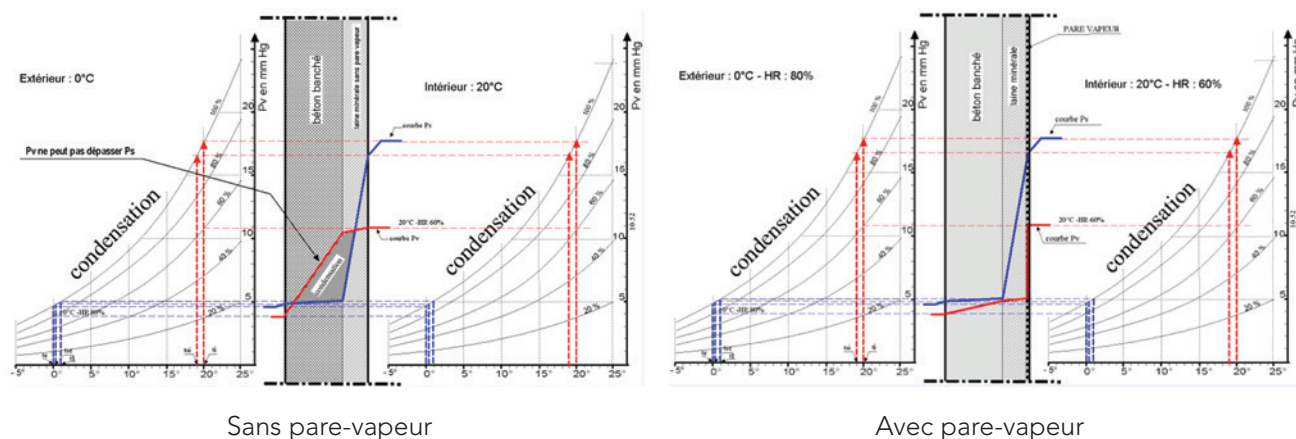


Figure 37 : Profils types de pression partielle de vapeur dans une paroi multicouche obtenus par la méthode de Glaser sans et avec pare-vapeur

Le pare-vapeur peut être obligatoire dans certaines configurations de paroi comme dans la norme NF DTU 31.2. « Construction de maisons et bâtiments à ossature bois ». Il est important de se référer à ces documents pour vérifier si un pare-vapeur est nécessaire.

À noter que la pose d'une membrane pare-vapeur hygrovariable ou non ne peut en aucun cas se substituer à une ventilation suffisante des locaux. Cet élément est complémentaire d'une bonne ventilation et permettra, dans certains cas, à la paroi d'avoir un meilleur fonctionnement hygrothermique.

La section « 5. Illustrations communes aux quatre chapitres » contient des exemples de cas où l'on peut comparer les résultats en termes de risques hygrothermiques pour différentes membranes. D'autres cas ont été analysés dans le projet HUMIBATex. Ainsi :

- Pour des parois en béton vieilli, les configurations sans membrane pare-vapeur (hygrovariable ou non) présentent toutes des risques aussi bien avec l'isolant hygroscopique que l'isolant non-hygroscopique. Ces risques sont la conséquence d'un taux d'humidité élevé dans l'isolant et le développement fongique possible aux interfaces.

- Pour des parois en pierre tendre type tuffeau, les configurations sans membrane pare-vapeur (hygrovariable ou non) présentent également des risques. Et ce sont encore une fois des risques de développement fongique à l'interface mur ancien isolant et pour l'isolant hygroscopique, le risque qu'il soit trop chargé en humidité.
- Pour des parois briques, suivant l'exemple développé :
 - Avec un climat intérieur normal, ne pas mettre de membrane en combinaison avec un isolant fibreux n'expose pas à des risques d'humidité directs tant qu'il n'y a pas d'enduit étanche à la vapeur d'eau côté extérieur. Cependant un développement fongique à l'interface mur ancien isolant est possible si les matériaux en présence y sont sensibles (plâtre, ancien papier peint, etc.). Ceux-ci devront donc être déposés avant l'isolation.
 - Avec un climat intérieur humide, ne pas mettre de membrane expose la paroi ancienne et l'isolant à une humidification importante et conduira à des pathologies.
 - L'utilisation d'une membrane pare-vapeur de S_d fixe (18 m) donne ici de bons résultats mais contrairement à une membrane hygrovariable, elle ne permettrait pas le séchage de la paroi vers l'intérieur en cas d'humidification accidentelle.
- Pour des parois en pan de bois et torchis, suivant l'exemple développé :
 - Les solutions sans membranes pare-vapeur présentent des risques aussi bien avec l'isolant hygroscopique que l'isolant non-hygroscopique avec un climat intérieur humide. L'isolant hygroscopique est trop humide avec un climat intérieur humide.
 - Les solutions avec un isolant hygroscopique se comportent légèrement mieux que les solutions avec isolant non-hygroscopique, le torchis et le pan de bois étant moins humides.
 - Les solutions avec des membranes à S_d fixes (prises à 18 m) sont celles qui obtiennent les meilleurs résultats. Les membranes hygrovariables à fort S_d (variable entre 0,2 et 26 m) obtiennent des résultats acceptables tout en apportant les avantages de la membrane hygrovariable en termes d'ouverture possible en cas d'humidification accidentelle.
 - Le développement fongique à l'interface paroi ancienne-isolant est présent pour plusieurs configurations d'isolation. Avec ce type de paroi, des enduits anciens à base de plâtre pourront être présents en surface intérieure des miroirs de torchis. De plus, les éléments en bois sont sensibles à la pourriture. Il est recommandé d'être particulièrement vigilant avec ces typologies constructives.

La membrane hygrovariable placée entre la finition intérieure et l'isolant trouve toute son utilité lorsque la paroi existante est humide et que le climat intérieur est modéré voire sec. Elle permet dans ce cas de faire sécher le mur particulièrement en été en permettant le transfert de vapeur vers l'intérieur. Au contraire, si le climat intérieur est humide alors la mise en place de ce type de membrane ne réduit pas le risque de condensation au sein de la paroi.

L'emploi de membrane hygrovariable est notamment préconisé pour l'isolation des parois comportant des remontées capillaires (cf. Question 7).

En conclusion, une membrane hygrovariable est intéressante avec un climat intérieur maîtrisé (grâce à un renouvellement d'air satisfaisant). Dans ce cas, elle permet de limiter le flux de vapeur d'eau depuis l'intérieur du bâtiment tout en réservant la possibilité d'un séchage progressif vers l'intérieur en cas d'humidification accidentelle ou parasite de la paroi. Dans certains cas un pare-vapeur hygrovariable de faible S_d (par exemple 0-4 m) peut suffire, par contre en cas de sollicitation un peu plus importante, un pare-vapeur hygrovariable avec un S_d plus élevé est préférable. Le pare-vapeur avec un S_d fixe de 18 m présente des résultats très satisfaisants dans plusieurs configurations constructives, mais la barrière permanente qu'il représente ne permettra pas le séchage vers l'intérieur de la paroi, aussi la perspiration, voire la continuité capillaire côté extérieur, doit être d'autant plus assurée pour permettre ce séchage. Enfin, les solutions d'isolation avec des isolants fibreux sans membrane pare-vapeur du tout présentent toutes des risques sauf à être dans le cas d'une paroi non exposée à la pluie battante et avec un climat côté intérieur sec. De plus, la paroi ancienne et son enduit extérieur doivent absolument être ouverts aux transferts de vapeur sous peine de condensation derrière l'isolant.

À retenir !

Question 12 : Quels sont les effets d'un pare-vapeur, fixe ou hygrovariable et dans quel cas est-ce intéressant ?

Rares sont les configurations constructives à base d'isolant fibreux qui peuvent se passer de membrane pare-vapeur, fixe ou hygro-variable sans risques hygrothermiques. En limitant le flux de vapeur qui pénètre dans la paroi depuis l'intérieur, ces membranes limitent le risque de condensation derrière l'isolant et limitent la teneur en eau dans les matériaux.

Attention, ceci ne sera plus vrai en cas de discontinuité des membranes, que ce soit suite à une pose malheureuse ou à des actions ultérieures.

La membrane hygrovariable apporte une possibilité intéressante de séchage de la paroi vers l'intérieur si le climat intérieur du bâtiment est sec. S'il est humide alors la protection pourrait être trop faible. Les pare-vapeur à S_d fixes de 18 m présentent des résultats intéressants pour des parois sans remontées capillaires. Les pare-vapeur à S_d fixes plus forts n'ont pas été testés mais présentent théoriquement plus de risques puisque la moindre ouverture dans la membrane sera un pont hydrique fort et aucun flux d'humidité ne pourra revenir de la paroi vers l'intérieur.

5. Illustrations communes aux quatre chapitres

Pour faire le bilan de ces simulations pour les exemples présentés, les indicateurs du projet suivants ont été utilisés (Figure 38).

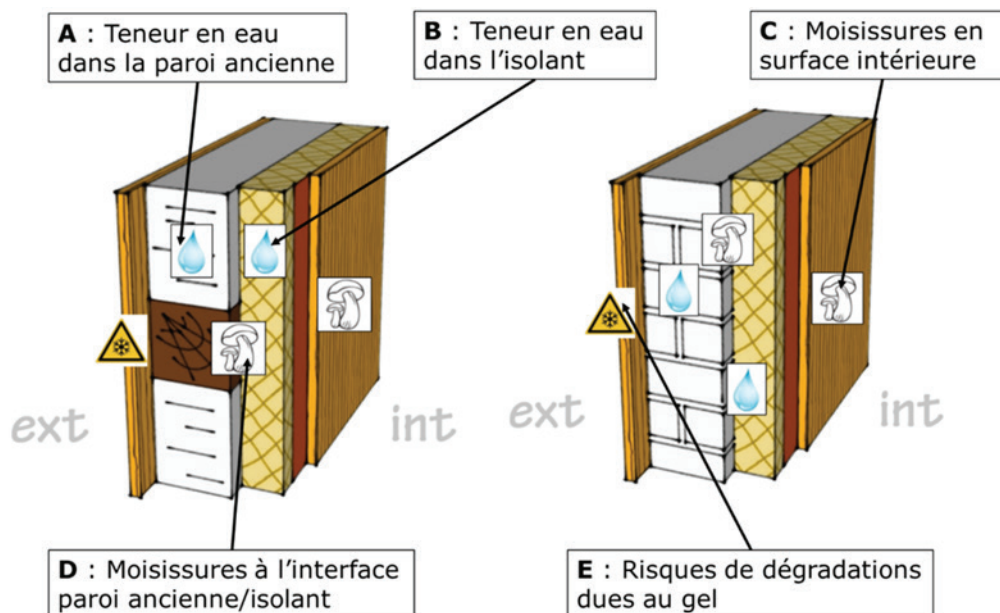


Figure 38 : Rappel des 5 indicateurs analysés

Les résultats des indicateurs sont exprimés avec les pictogrammes suivants :

A B C D E : Les indicateurs A, B, C et E n'annoncent pas de risques hygrothermiques, l'indicateur D révèle un risque.

A B C D E : Idem que précédemment mais le risque est plus situationnel.

NB : l'épaisseur d'isolant étant fixée, les résistances thermiques seront différentes selon les isolants considérés. Ceci implique que la température des parois sera plus proche de celle du climat extérieur lorsque la résistance thermique sera plus grande. Par exemple, en hiver, un isolant performant entraînera une température des parois plus faible qu'un isolant moins performant à épaisseur fixe, et par conséquent une humidité relative plus élevée. Il y aura également un effet non présenté ici sur les performances énergétiques de l'enveloppe.

5.1 Illustration A : Paroi en pan de bois-torchis

Hypothèses particulières liées à cet exemple :

- La paroi est orientée au nord
- Le climat extérieur est un climat type de la zone H1 (Est de la France)
- La pluviométrie utilisée est celle de l'année 2015 pour le sud de l'Alsace (aéroport de Mulhouse)
- La combinaison du vent (vitesse et direction) du fichier météo et du fichier pluviométrie retenus donne une forte pluie battante sur la paroi nord au printemps.
- Il est considéré que 70 % de la pluie battante est disponible pour absorption par le mur (le reste rebondit ou ruisselle trop rapidement)
- Le climat intérieur est humide, celui-ci est représentatif d'une pièce fortement utilisée mais équipée d'un système de ventilation suffisant pour assurer un renouvellement de l'air (norme EN 15026)
- La paroi est composée comme indiqué sur la figure ci-dessous (suivant un plan de symétrie horizontale au centre d'un miroir⁽⁵⁾)
- L'impact éventuel des finitions intérieures n'a pas été pris en compte ici (tapiserie, peinture, etc.)

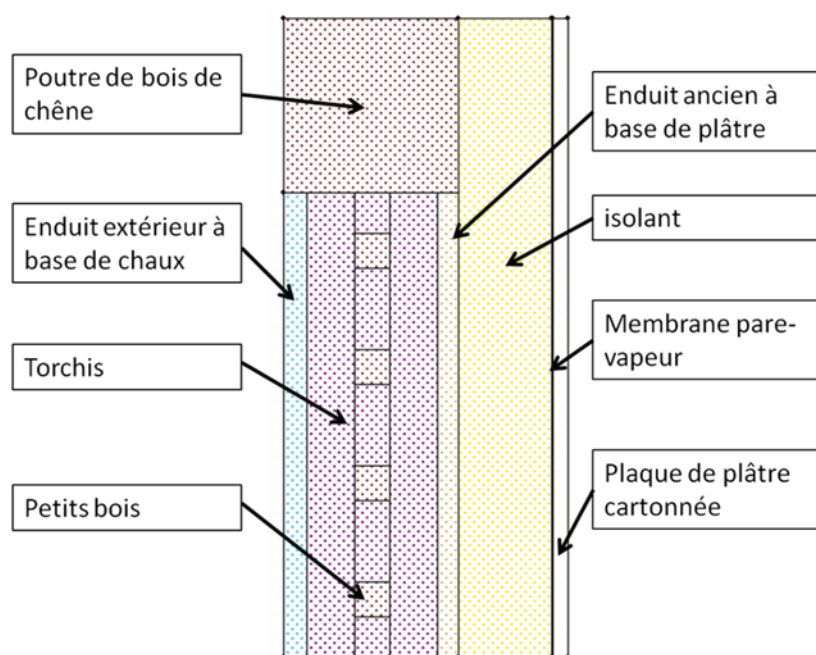


Figure 39 : Conductivité thermique type en fonction de l'humidité relative pour les deux familles d'isolants fibreux

5. Le miroir est la partie constituée de matériaux de remplissage comprise entre les éléments en bois d'un bâtiment à colombage

L'épaisseur de l'isolation pour cet exemple est de 80 mm.

En utilisant les valeurs types du projet, l'isolant hygroscopique aura une résistance thermique de $2,1 \text{ K.m}^2/\text{W}$ alors que celle de l'isolant non-hygroscopique est de $2,5 \text{ K.m}^2/\text{W}$. Cette différence de l'ordre de 20 % a un effet significatif sur les critères A, D et E en augmentant leur sévérité.

Les configurations qui sont analysées sont les suivantes :

- Isolant non hygroscopique (de type laine minérale) accompagné d'un pare-vapeur hygrovariable avec un S_d maximum de 26 m.
- Isolant non hygroscopique (de type laine minérale) accompagné d'un pare-vapeur hygrovariable avec un S_d maximum de 4 m.
- Isolant non hygroscopique (de type laine minérale) accompagné d'un pare-vapeur avec un S_d fixe de 18 m.
- Isolant non-hygroscopique (de type laine minérale) sans membrane pare-vapeur (on suppose que l'étanchéité à l'air est tout de même assuré, ce qui représente une hypothèse optimiste).
- Isolant hygroscopique (de type panneau de fibre de bois semi-rigide) accompagné d'un pare-vapeur hygrovariable avec un S_d maximum de 26 m.
- Isolant hygroscopique (de type panneau de fibre de bois semi-rigide) accompagné d'un pare-vapeur hygrovariable avec un S_d maximum de 4 m.
- Isolant hygroscopique (de type panneau de fibre de bois semi-rigide) accompagné d'un pare-vapeur avec un S_d fixe de 18 m.
- Isolant hygroscopique (de type panneau de fibre de bois semi-rigide) sans membrane pare-vapeur (on suppose que l'étanchéité à l'air est tout de même assuré, ce qui représente une hypothèse optimiste).

Dans chacune des configurations les membranes sont supposées avoir été posées dans le respect des règles de l'art et sans dégradation ultérieure.

La teneur en eau dans les différents éléments clés de la paroi est tracée sur une année après neuf années de simulation pour éliminer toute incidence des conditions initiales. Pour les explications concernant les différentes membranes pare-vapeurs, voir le chapitre suivant.

Les courbes présentées ci-dessous viennent expliciter une partie de l'analyse des résultats de simulation qui conduit à la présentation des pictogrammes dans le tableau synthèse (Tableau 9). Les courbes représentent les teneurs en eau des principaux constituants de la paroi dans les différentes configurations.

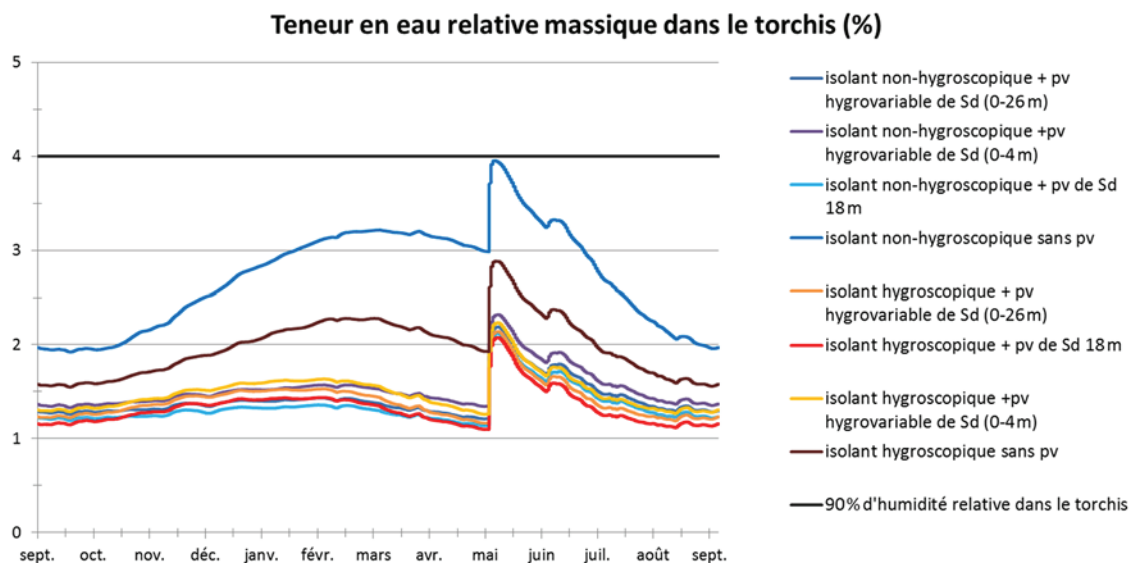


Figure 40 : Influence du type d'isolant fibreux et de la membrane associée sur la teneur en eau dans le torchis

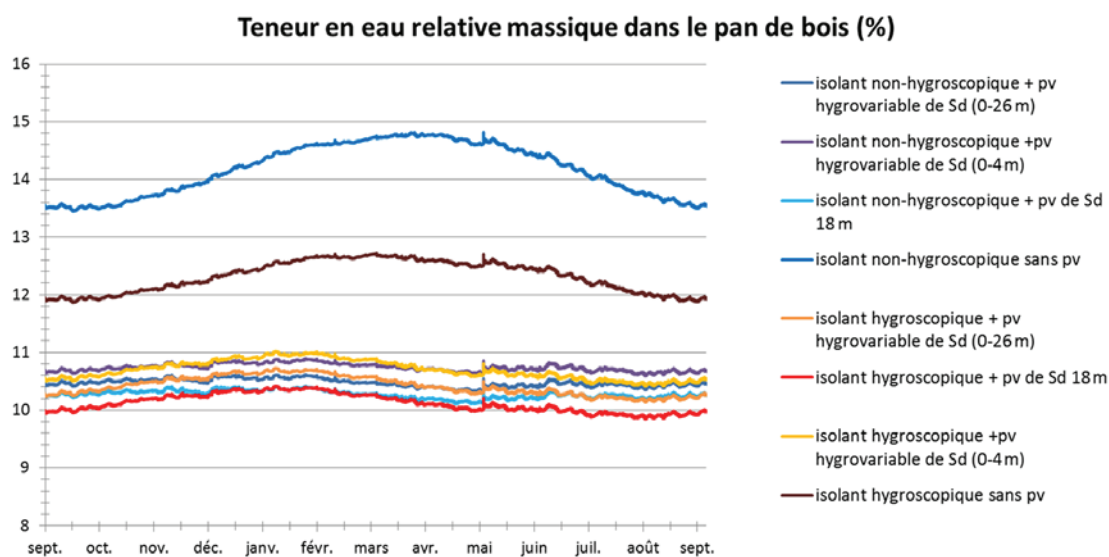


Figure 41 : Influence du type d'isolant fibreux et de la membrane associée sur la teneur en eau dans le torchis

On ne relève pas de différences significatives entre l'isolant hygroscopique et l'isolant non-hygroscopique par rapport à la teneur en eau dans le torchis dans cette configuration. Dans le bois, on peut relever un séchage un peu plus important en été dans les configurations « isolant hygroscopique » mais sans impacts notables. Sans membrane pare-vapeur, le pan de bois et torchis isolé avec un isolant non-hygroscopique est plus chargé en humidité que celui isolé avec l'isolant hygroscopique. Le « saut » d'humidité en mai correspond à un fort épisode pluvieux couplé à un vent de nord donc une quantité plus importante de pluie battante.

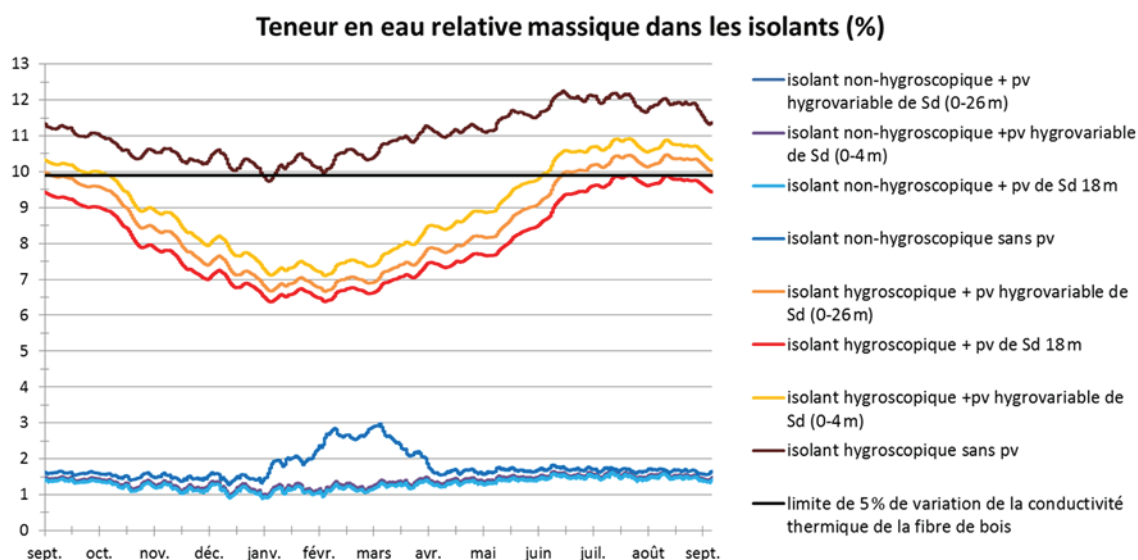


Figure 42 : Teneur en eau relative massique dans l'isolant

La teneur en eau dans l'isolant est toujours très faible ici avec l'isolant non-hygroscopique. Avec l'isolant hygroscopique, elle dépend de la membrane associée. Sans membrane, elle est la plus élevée. Cette teneur en eau n'est pas problématique du point de vue de l'état de l'isolant et la légère baisse de conductivité thermique constatée a lieu en été.

Tableau 9 : Bilan des indicateurs sur la configuration de cet exemple.

Climat intérieur humide et climat extérieur zone H1-Nancy avec pluie battante sur paroi nord (coefficient d'accroche de la pluie 0,7), et épaisseur de l'isolant 8 cm. NB : aucune radiation courte longueur d'onde n'a été prise en compte côté extérieur (paroi orientée nord), ce paramètre combiné à la pluie battante pourrait majorer les risques hygrothermiques, en particulier à l'interface isolant pare-vapeur (sous l'action du rayonnement solaire, une évaporation de l'humidité présente dans l'enduit et le torchis pourrait se produire à la fois vers l'extérieur et l'intérieur).			
Isolant non-hygroscopique	Sans membrane pare-vapeur	A B C D E	Très forte humidité à l'interface paroi ancienne-isolant qui peut souvent conduire à du développement fongique suivant les matériaux qui ont été recouverts par l'isolation (tapisserie, plâtre, etc.)
	Membrane pare-vapeur de Sd 18 m	A B C D E	Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 84 % qui peut conduire en été à du développement fongique si des matériaux constituant un substrat très favorable sont présents.
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-26 m)	A B C D E	Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 86 % qui peut conduire en été à du développement fongique si des matériaux constituant un substrat favorable sont présents.
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-4 m)	A B C D E	Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 86 % qui peut conduire en été à du développement fongique si des matériaux constituant un substrat favorable sont présents.
Isolant hygroscopique	Sans membrane pare-vapeur	A B C D E	Baisse de la conductivité thermique de l'isolant supérieure à 5 % Forte humidité à l'interface paroi ancienne-isolant qui peut conduire à du développement fongique suivant les matériaux en présence (tapisserie, plâtre, etc.)
	Membrane pare-vapeur de Sd 18 m	A B C D E	R.A.S.
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-26 m)	A B C D E	Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 83 % qui peut conduire en été à du développement fongique uniquement si des matériaux constituant un substrat très favorable sont présents comme du papier.
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-4 m)	A B C D E	Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 85 % qui peut conduire en été à du développement fongique si des matériaux constituant un substrat favorable sont présents.

Pour la configuration de cet exemple, les solutions sans membranes pare-vapeur ne sont pas adaptées. Il est nécessaire d'être vigilant aux matériaux présents à l'interface mur ancien/isolant parce qu'il y a un risque de développement fongique à cet endroit suivant les types de matériaux. Une membrane de Sd important (fixe à 18 m ou hygrovariable de Sd 0-26 m) permettra d'obtenir des résultats satisfaisants, à condition d'être posée dans les règles de l'art avec un isolant non-hygroscopique ou un isolant hygroscopique.

5.2 Illustration B : Paroi brique

En coupe 2D, le modèle de la paroi pour cet exemple est présentée Figure 43.

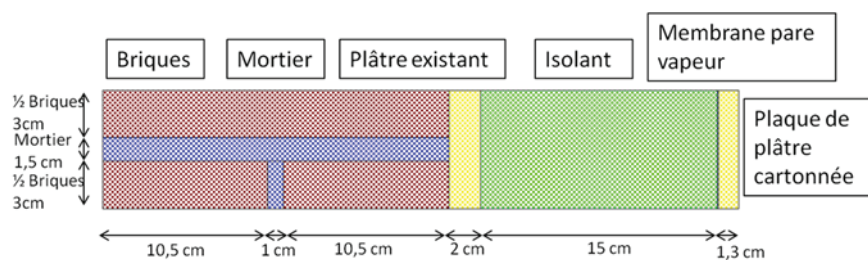


Figure 43 : Schéma de la coupe de paroi 2D modélisée dans Wufi

L'épaisseur d'isolant retenue pour cette analyse est de 15 cm.

En utilisant les valeurs types du projet, l'isolant hygroscopique aura une résistance thermique de $3,9 \text{ K.m}^2/\text{W}$ alors que celle de l'isolant non-hygroscopique est de $4,7 \text{ K.m}^2/\text{W}$. Cette différence de l'ordre de 20 % a un effet significatif sur les critères A, D et E en augmentant leur sévérité.

Par ailleurs les hypothèses spécifiques suivantes ont été prises pour les simulations :

- La paroi est exposée au nord
- La brique est découverte côté extérieur, il n'y a pas d'enduit.
- Le climat extérieur est un climat type de la zone H1 (Est de la France)
- L'impact éventuel des finitions intérieures n'a pas été pris en compte ici (tapisserie, peinture, etc.)
- Lorsqu'il y a de la pluie battante, il est considéré que 70 % de la pluie battante est disponible pour absorption par le mur (le reste rebondit ou ruisselle trop rapidement).
- La pluviométrie utilisée est celle de l'année 2015 pour le sud de l'Alsace (aéroport de Mulhouse)
- La combinaison du vent (vitesse et direction) du fichier météo et du fichier pluviométrie retenus donne une forte pluie battante sur la paroi nord au printemps.
- Mise en œuvre soignée des matériaux pour la réhabilitation selon les règles de l'art, aussi bien la membrane que l'isolant.
- Aucun flux d'humidité en provenance du sol (remontées capillaires) n'a été pris en compte ici.
- Le climat intérieur est normal, il correspond à une pièce de vie dont l'air est renouvelé avec une ventilation mécanique simple flux. Les indicateurs sont également présentés pour le cas où le climat intérieur serait très humide comme une salle de bains insuffisamment aérée et ventilée pour montrer les conséquences.

Les configurations qui sont analysées pour cette étude de cas sont les suivantes :

1. Paroi non-exposée à la pluie battante

- Isolant hygroscopique, ouvert à la vapeur d'eau et un peu capillaire :
 - avec pare-vapeur hygrovariable de $S_{dmax} 4 \text{ m}$;
 - avec pare-vapeur hygrovariable de $S_{dmax} 26 \text{ m}$;
 - avec pare-vapeur de $S_d 18 \text{ m}$;
 - sans pare-vapeur.

- Isolant non-hygroscopique, ouvert à la vapeur d'eau et non-capillaire :
 - avec pare-vapeur hygrovariable de S_{dmax} 4 m ;
 - avec pare-vapeur hygrovariable de S_{dmax} 26 m ;
 - avec pare-vapeur de S_d 18 m ;
 - sans pare-vapeur.

2. Paroi exposée à la pluie battante

Mêmes configurations que pour le cas précédent 1.

Dans chacune des configurations les membranes sont supposées avoir été posées dans le respect des règles de l'art et sans dégradation ultérieure.

Résultats

1. Pour une paroi protégée de la pluie battante

Une sélection de courbes issues des simulations est présentée pour visualiser les différences entre les configurations. Ensuite les tableaux bilans des pictogrammes de risques sont dressés.

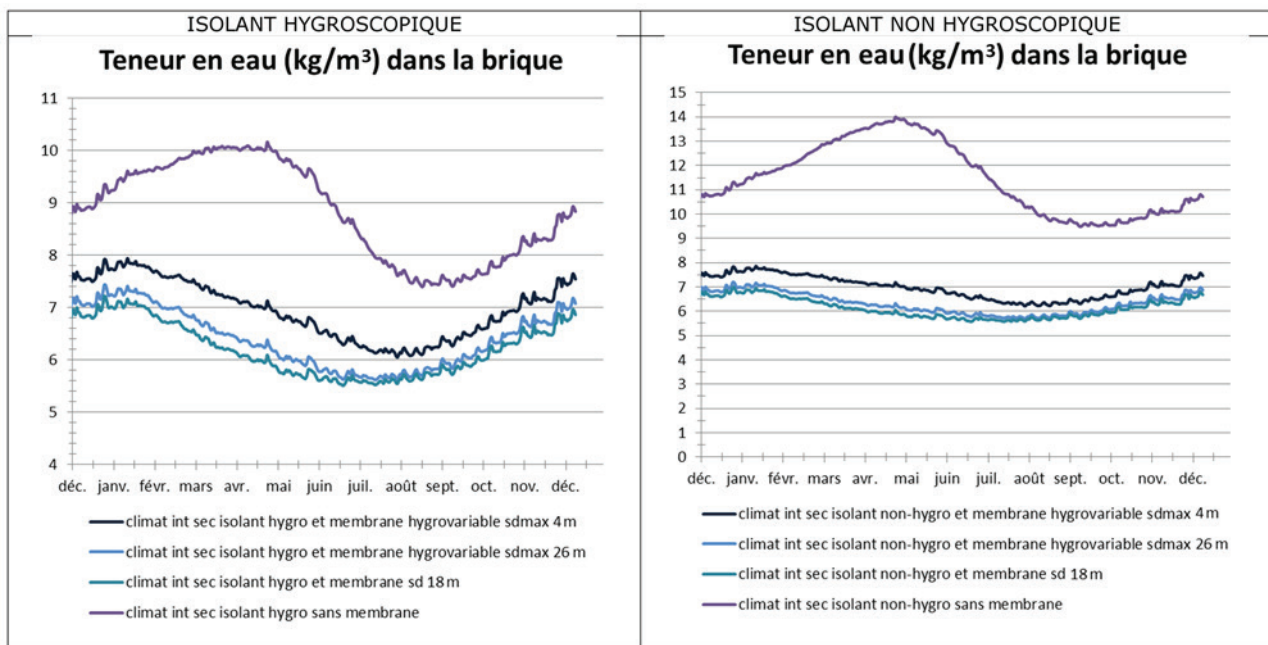


Figure 44 : Climat intérieur normal, teneur en eau dans la brique

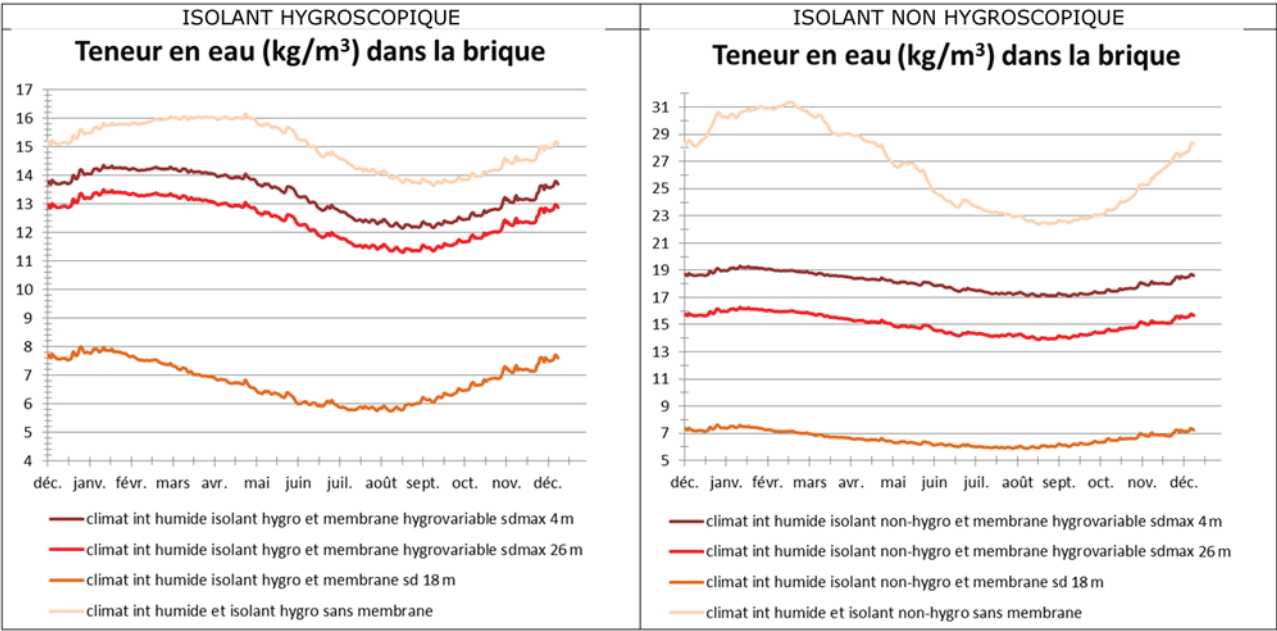


Figure 45 : Climat intérieur très humide, teneur en eau dans la brique

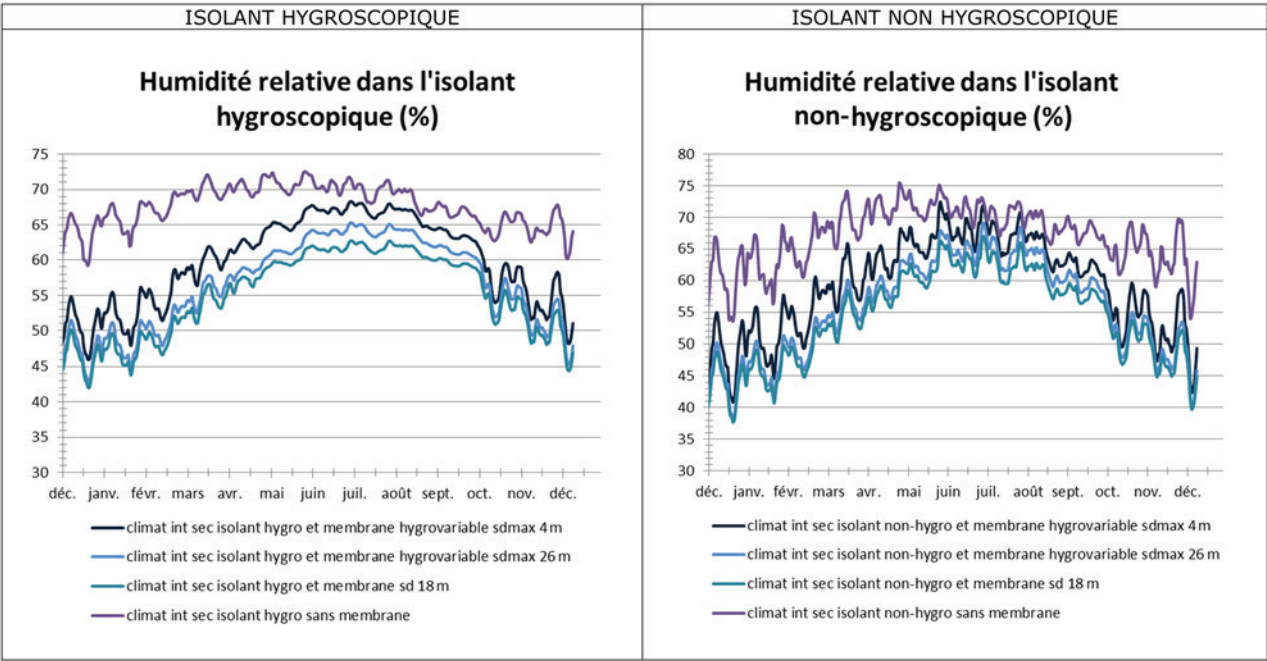


Figure 46 : Climat intérieur normal, humidité relative dans l'isolant

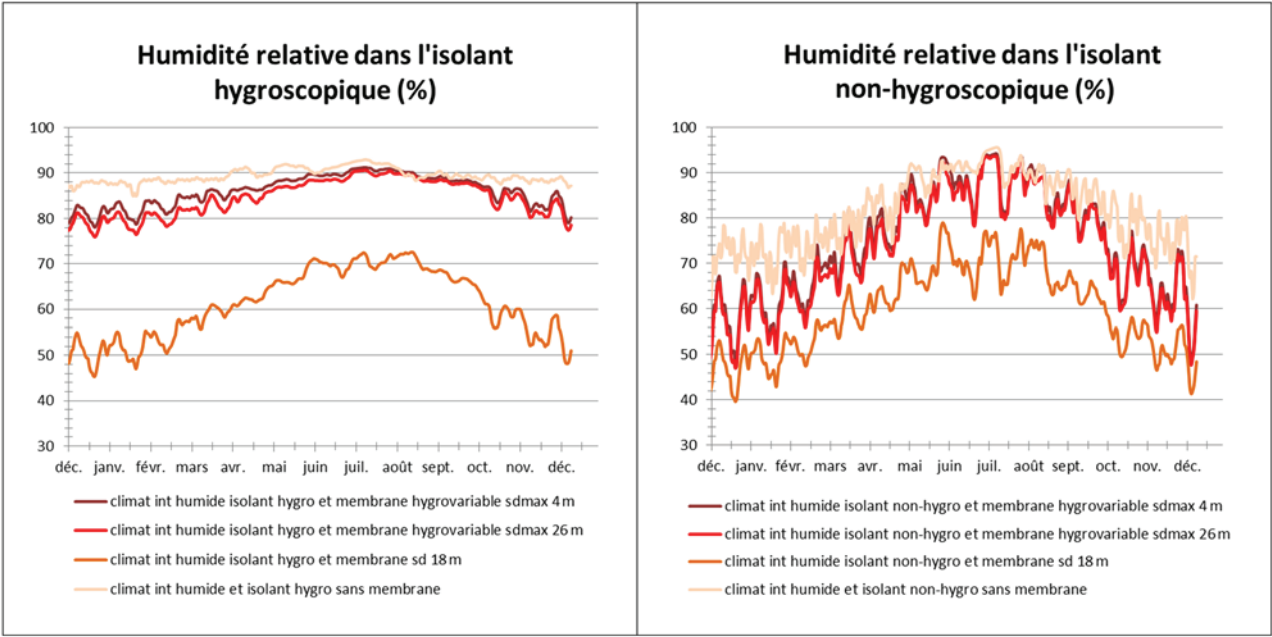


Figure 47 : Climat intérieur humide, humidité relative dans l'isolant

Tableau 10 : Bilan des indicateurs pour la configuration de cet exemple pour une paroi protégée de la pluie battante (1) avec une ambiance intérieure normale

Climat intérieur normal et climat extérieur zone H1-Nancy sans pluie battante, sur paroi nord, épaisseur de l'isolant 15 cm.			
Isolant non-hygroscopique	Sans membrane pare-vapeur	A B C D E	Très forte humidité à l'interface paroi ancienne-isolant, de maximum 96 %, qui peut souvent conduire à du développement fongique suivant les matériaux en présence (tapisserie, plâtre, etc.)
	Membrane pare-vapeur de Sd 18 m	A B C D E	R.A.S.
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-26 m)	A B C D E	R.A.S.
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-4 m)	A B C D E	Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 85 % qui peut conduire en été à du développement fongique si des matériaux constituant un substrat très favorable sont présents.
Isolant hygroscopique	Sans membrane pare-vapeur	A B C D E	Forte humidité à l'interface paroi ancienne-isolant, maximum 95 %, qui peut conduire à du développement fongique suivant les matériaux en présence (tapisserie, plâtre, etc.)
	Membrane pare-vapeur de Sd 18 m	A B C D E	R.A.S.
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-26 m)	A B C D E	R.A.S.
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-4 m)	A B C D E	R.A.S.

À noter que dans les configurations qui présentent une humidité forte à l'interface paroi ancienne-isolant, une vigilance particulière devra être adoptée vis-à-vis des poutres en bois, de plancher par exemple, qui traversent cette interface.

Tableau 11 : Bilan des indicateurs pour la configuration de cet exemple pour une paroi protégée de la pluie battante (1) avec une ambiance intérieure très humide

Climat intérieur très humide et climat extérieur zone H1-Nancy sans pluie battante, sur paroi nord, épaisseur de l'isolant 15 cm.			
Isolant non-hygroscopique	Sans membrane pare-vapeur	A B C D E	Développement fongique possible important suivant les matériaux en présence en surface intérieure. Très forte humidité à l'interface paroi ancienne-isolant, de maximum 99 %, qui peut vraisemblablement conduire à du développement fongique.
	Membrane pare-vapeur de Sd 18 m	A B C D E	Développement fongique possible important suivant les matériaux en présence en surface intérieure.
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-26 m)	A B C D E	Développement fongique possible important suivant les matériaux en présence en surface intérieure. Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 95 % qui peut conduire à du développement fongique.
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-4 m)	A B C D E	Développement fongique possible important suivant les matériaux en présence en surface intérieure. Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 96 % qui peut conduire à du développement fongique.
Isolant hygroscopique	Sans membrane pare-vapeur	A B C D E	Développement fongique possible important suivant les matériaux en présence en surface intérieure. Forte humidité à l'interface paroi ancienne-isolant, maximum 95 %, qui peut conduire à du développement fongique suivant les matériaux en présence (tapisserie, plâtre, etc.)
	Membrane pare-vapeur de Sd 18 m	A B C D E	Développement fongique possible important suivant les matériaux en présence en surface intérieure. Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 85 % qui peut conduire à du développement fongique si des matériaux constituant un substrat très favorable sont présents.
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-26 m)	A B C D E	Développement fongique possible important suivant les matériaux en présence en surface intérieure. Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 94 % qui peut conduire à du développement fongique.
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-4 m)	A B C D E	Développement fongique possible important suivant les matériaux en présence en surface intérieure. Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 94 % qui peut conduire à du développement fongique.

Ces résultats en ambiances intérieures très humides mettent en avant les solutions avec des pare-vapeur à Sd fixes élevés logiquement. Les risques hygrothermiques sont beaucoup plus présents qu'en ambiance intérieure normale. Le climat intérieur est un paramètre très impactant sur la bonne tenue des différentes solutions d'isolation. C'est une occasion de rappeler l'importance de l'aération et de la ventilation pour éviter de se retrouver dans ce type de configuration.

2. Pour une paroi exposée à de la pluie battante

Tableau 12 : Bilan des indicateurs pour la configuration de cet exemple pour une paroi exposée à la pluie battante (2) avec une ambiance intérieure normale

Climat intérieur normal et climat extérieur zone H1-Nancy avec pluie battante, sur paroi nord, épaisseur de l'isolant 15 cm.			
Isolant non-hygroscopique	Sans membrane pare-vapeur	A B C D E	Humidité très importante de la paroi ancienne (supérieure à 95 % par endroit 41 jours dans l'année). Humidité relative assez forte dans l'isolant (maximum 98 %). Très forte humidité à l'interface paroi ancienne-isolant, de maximum 96 %, qui peut souvent conduire à du développement fongique suivant les matériaux en présence.
	Membrane pare-vapeur de Sd 18 m	A B C D E	Humidité très importante de la partie extérieure de la paroi ancienne (supérieure à 95 % par endroit 13 jours dans l'année). Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 93 % qui peut conduire à du développement fongique suivant les matériaux en présence (tapisserie, plâtre, etc.).
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-26 m)	A B C D E	Humidité très importante de la partie extérieure de la paroi ancienne (supérieure à 95 % par endroit 11 jours dans l'année). Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 92 % qui peut conduire à du développement fongique suivant les matériaux en présence (tapisserie, plâtre, etc.).
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-4 m)	A B C D E	Humidité très importante de la partie extérieure de la paroi ancienne (supérieure à 95 % par endroit 10 jours dans l'année). Forte humidité à l'interface paroi ancienne-isolant, maximum 95 %, qui peut conduire à du développement fongique suivant les matériaux en présence (tapisserie, plâtre, etc.).
Isolant hygroscopique	Sans membrane pare-vapeur	A B C D E	Humidité importante de la partie extérieure de la paroi ancienne (supérieure à 95 % par endroit 10 jours dans l'année). Forte humidité à l'interface paroi ancienne-isolant, maximum 95 %, qui peut conduire à du développement fongique suivant les matériaux en présence (tapisserie, plâtre, etc.).
	Membrane pare-vapeur de Sd 18 m	A B C D E	Humidité importante de la partie extérieure de la paroi ancienne (supérieure à 95 % par endroit 10 jours dans l'année). Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 94 % qui peut conduire à du développement fongique suivant les matériaux en présence (tapisserie, plâtre, etc.).
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-26 m)	A B C D E	Humidité importante de la partie extérieure de la paroi ancienne (supérieure à 95 % par endroit 10 jours dans l'année). Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 94 % qui peut conduire à du développement fongique suivant les matériaux en présence (tapisserie, plâtre, etc.).
	Membrane pare-vapeur hygrovariable Sd (0-4 m)	A B C D E	Humidité importante de la partie extérieure de la paroi ancienne (supérieure à 95 % par endroit 10 jours dans l'année). Humidité relative à l'interface paroi ancienne-isolant de maximum 93 % qui peut conduire à du développement fongique suivant les matériaux en présence (tapisserie, plâtre, etc.).

Sur cet exemple, si le mur en briques non revêtues est exposé à la pluie battante, il y a des risques hygrothermiques dans toutes les configurations d'isolation par l'intérieur plus ou moins importantes selon les choix de matériaux et de membranes pare-vapeur.

6. Conclusion

Ce guide a été rédigé dans le cadre du projet ANR HUMIBATex « Comment prédire les désordres causés par l'humidité ? Quelles solutions techniques pour rénover le bâti existant ? »

Le projet HUMIBATex s'inscrit dans une démarche de rénovation énergétique « globale » contribuant à :

- l'amélioration thermique de l'enveloppe ;
- aux conséquences des transferts hydriques au travers de l'enveloppe ;
- la ventilation et à la perméabilité à l'air ;
- la vérification de l'impact de la dégradation des parois (développement fongique, risques d'apparition de moisissures).

Il traite de l'élaboration d'un outil qui permet de prédire les désordres causés par l'humidité. Une plateforme de simulation a été mise en place. Cet outil couplé avec des modèles existants permet de prédire les risques de pathologies liés à l'humidité après une rénovation. Les matériaux nécessaires aux données d'entrées des modèles ont été caractérisés. Les caractérisations hygrothermiques ont été réalisées sur des échantillons prélevés directement sur des habitations anciennes et sur des échantillons issus de la construction de la cellule test. Le projet HUMIBATex complète ainsi les connaissances sur les transferts couplés « chaleur-humidité-air » dans les bâtiments existants en combinant des mesures in-situ dans les bâtiments réels, des essais en laboratoires et un grand nombre de simulations. Ces dernières ont été effectuées sur quatre typologies de parois anciennes en isolation par l'intérieur (brique, béton, pierre, pan de bois-torchis).

Ce guide de recommandations techniques HUMIBATex regroupe :

- la méthodologie choisie pour le calcul des indicateurs des risques de pathologies dans les bâtiments,
- des réponses illustrées par des solutions techniques issues de résultats de simulations pour traiter les questions les plus problématiques lors de la réhabilitation de bâtiment.

Méthodologie employée

Toutes les solutions ne sont pas référencées dans ce guide, celui-ci présente la méthodologie employée, les professionnels pourront faire appel aux partenaires du projet pour répondre à des besoins spécifiques.

Des indicateurs ont été définis pour déterminer le risque de pathologies lié à l'humidité dans une paroi simulée.

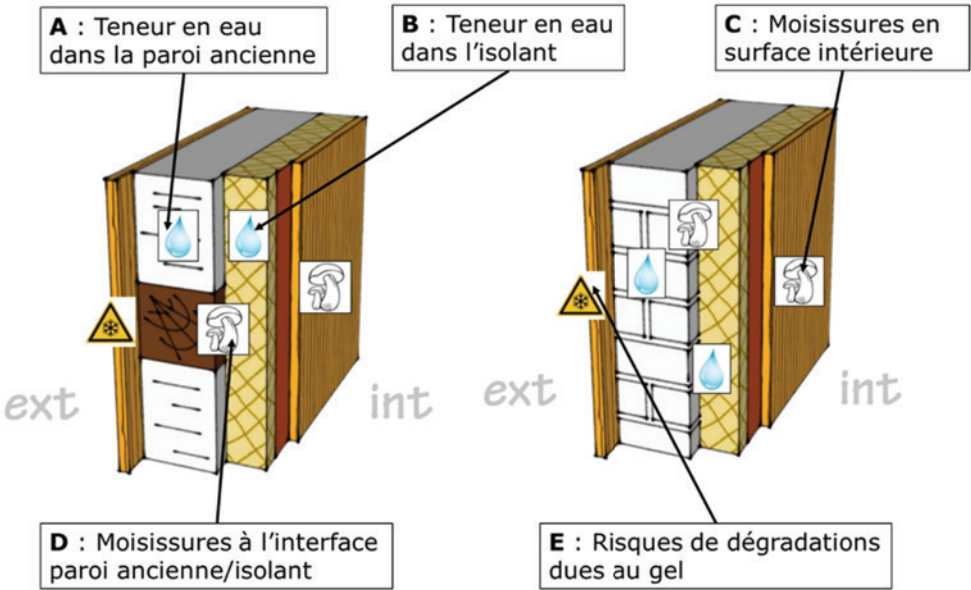


Figure 48 : Indicateurs HUMIBATex

À partir des indicateurs 1-2-3-4-5 (tableau ci-dessous), des pictogrammes A-B-C-D-E ont été définis pour permettre de déterminer la viabilité d'une solution. En effet, si l'un des pictogrammes est actif, la solution peut amener certains risques jusqu'à rendre la solution non viable.

Tableau 13 : Définition des indicateurs HUMIBATex

Indicateurs	Indicateur 1 : condensation en surface	Indicateur 2 : développement fongique	Indicateur 3 : condensation aux interfaces	Indicateur 4 : développement fongique pour les biosourcés	Indicateur 5 : dégradation thermique
Caractéristiques	Moment où de la condensation apparaît sur la surface intérieure du mur	Relation liant l'humidité relative et la température qui permet de statuer sur le développement fongique sur la surface intérieure	Valeur d'humidité relative à partir de laquelle de la condensation apparaît à la liaison entre deux matériaux	Teneur en eau des matériaux biosourcés à partir de laquelle un développement fongique est susceptible d'apparaître	Dégradation moyenne maximale de la conductivité thermique de l'isolant sur 24 h
Limites	HR ≥ 98 %	Si $HR \geq 0,033 T^2 - 1,5 T + 96$ (°C) pendant 8 semaines par an avec à minima 1 semaine en continu ¹	HR ≥ 98 % aux interfaces	$w \geq 24$ % en masse pendant 8 semaines par an avec à minima 1 semaine en continu ou $w \geq 30$ % ponctuellement	

1. Hens H. Fungal defacement in buildings, a performance related approach. International Journal of Heating Ventilation Air conditioning Refrigeration Res 1999; 5(3) : 265-89.

Tableau 14 : Définition des pictogrammes HUMIBATex à partir des indicateurs

Pictogrammes	A	B	C	D	E
Définition du pictogramme	Teneur en eau dans le mur existant	Teneur en eau et dégradation de l'isolant	Comportement du parement intérieur	Condensation interne et développement fongique	Gel côté extérieur
Caractéristiques	Stabilisation de la teneur en eau dans le temps et taux d'humidité max pour le mur existant	Condensation dans l'isolant et dégradation thermique	Développement fongique et condensation du parement intérieur	Développement fongique des matériaux biosourcés et à l'interface de l'isolant	Condensation et température négative aux interfaces
Limites	Equilibre hygrothermique : l'écart doit être inférieur à 2 % d'une année à l'autre après 10 ans. HR ≤ 95 % dans le mur existant	Indicateur 3 Indicateur 5 : $\lambda \geq 5 \%$ de variation sur un hiver ou $\geq 1,05 \cdot \lambda_{sec}$	Indicateur 2	Indicateur 2 (pour le plâtre gâché) et indicateur 4	Si HR ≥ 98 % et T ≤ 0 °C

Questions-réponses

Des questions-réponses ont été formulées afin de mettre à disposition des recommandations à suivre pour réhabiliter sans risque le bâtiment ancien vis-à-vis de l'humidité.

- 1 – La gestion du climat intérieur (Questions 1-2-3)
- 2 – La paroi (Questions 4-5-6-7)
- 3 – L'isolant (Questions 8-9-10)
- 4 – Le pare-vapeur (Questions 11-12)

Les principales conclusions sont reportées ci-après.

À retenir ! LA GESTION DU CLIMAT INTÉRIEUR

Question 1 : Que se passe-t-il quand le climat intérieur est très humide ?

Le climat intérieur peut être très humide, notamment en l'absence de ventilation à l'intérieur du logement.

Lorsque le climat intérieur est très humide, de la condensation apparaît sur la surface intérieure de la paroi et le parement intérieur est beaucoup plus humide que lorsque le climat est normal.

Cette humidité risque de se transmettre aux autres matériaux constitutifs de la paroi.

Globalement cela peut donc entraîner des surconsommations de chauffage, des apparitions de moisissures en surface et/ou à l'intérieur de la paroi, et être la cause de dégradation de certains matériaux.

Question 2 : Comment éviter la condensation intérieure ?

Si la condensation intérieure est prolongée dans le temps ou récurrente, elle peut être une source de désordres.

Pour l'éviter, il faut :

- réduire au maximum les ponts thermiques lors de l'isolation du logement ;
- assurer un renouvellement d'air adapté, notamment dans les zones soumises à de fortes sources d'humidité (cuisine, salle de bains, buanderie, chambre à coucher pendant la nuit, etc.) ;
- garantir une température suffisante dans le logement assurée par un système de chauffage correctement dimensionné.

Question 3 : Quel type de système de ventilation employer ?

Assurer le renouvellement d'air dans le logement est une nécessité absolue. Il est préférable de le faire sans gaspillage d'énergie et en assurant le confort des occupants.

Pour cela, des systèmes de VMC correctement dimensionnés et installés sont une bonne solution pour éliminer les polluants intérieurs et l'humidité en excès.

Enfin, il faut avoir conscience qu'une aération par ouvertures des fenêtres d'une dizaine de minutes même en hiver, au lever dans les chambres et après une cuisson, du bricolage ou une douche dans les pièces correspondantes est un comportement à adopter qui contribuera grandement à garder un climat intérieur de bonne qualité.

**À retenir !
LA PAROI**

Question 4 : Est-il préférable de rénover en isolation thermique par l'intérieur (ITI) ou en isolation thermique par l'extérieur (ITE) ?

Si l'architecture et la problématique de conservation du patrimoine le permettent alors l'isolation par l'extérieur est préférable du point de vue des risques hygrothermiques.

En ITE, veiller à ce que d'éventuelles remontées capillaires soient traitées et puissent s'évacuer correctement vers l'extérieur.

Question 5 : Quelle est l'incidence de la présence d'un pont thermique ?

De manière générale les ponts thermiques sont à éviter autant que faire se peut. En isolation par l'intérieur, il en restera très souvent. Ils vont représenter des points de faiblesse et seront les premiers concernés par les risques hygrothermiques. Ils seront le siège de condensation interne et si la ventilation est insuffisante de condensation en surface intérieure.

Cette condensation interne ne posera pas de problème si la paroi est suffisamment perspirante et capillaire, permettant à cette humidité de sécher au niveau des surfaces lorsque les conditions sont favorables.

Question 6 : Faut-il poser un enduit extérieur perméable ou étanche sur le bâti ancien (à l'eau liquide/à la vapeur d'eau) ?

Sur un bâti perméable à la vapeur, il faut poser un enduit extérieur perméable à la vapeur pour ne pas accumuler de l'eau à l'interface avec l'isolant. Cet enduit doit protéger la paroi de la pluie battante et être perméable à la vapeur d'eau. Les enduits à la chaux hydraulique ou aérienne sont préférables sur le bâti ancien. Ils ne sont pas imperméables à la pluie mais capillaires et une épaisseur suffisante permet de se charger en eau de pluie avant de perdre cette eau sous les effets du vent et du soleil. Ce rôle de tampon hydrique permet de diminuer l'impact sur le reste du mur.

Des enduits modernes industriels prêts à l'emploi, notamment pour recouvrir des ITE, sont vendus comme perméables à la vapeur et protecteurs vis-à-vis de la pluie. Leurs propriétés peuvent être très variables d'un produit à l'autre. Il est important de consulter attentivement les fiches techniques.

Question 7 : Comment traiter les remontées capillaires ?

La problématique doit faire l'objet d'un diagnostic avant mise en œuvre de l'isolation. Autant que possible les solutions traditionnelles pour limiter les remontées capillaires doivent être utilisées.

Sur un mur sain, qui comporte un enduit capillaire et perméable à la vapeur d'eau, l'isolation peut être réalisée avec de préférence un isolant fibreux et si possible hygroscopique et associé à une membrane pare-vapeur hygroviable.

Un mur enduit avec un produit étanche non adapté au bâti ancien ne pourra pas être isolé sans risques.

À retenir ! L'ISOLANT

Question 8 : Quelle est la différence entre un produit isolant « étanche » à la vapeur d'eau et un produit isolant fibreux ?

La mise en œuvre entre ces deux familles est différente puisque les plaques d'isolant « étanche » se posent seules en assurant une continuité de la couche isolante, tandis que les isolants fibreux devront être associés à une membrane de la famille des pare-vapeurs qui va limiter la migration de vapeur de l'ambiance intérieure vers la paroi et qui va assurer l'étanchéité à l'air.

L'utilisation de la famille des isolants étanches comporte des limites pour éviter des pathologies. L'accumulation de l'humidité dans la partie froide du mur est à proscrire. Attention ce phénomène est fréquent sur le bâti ancien.

Question 9 : Quel est l'impact du choix de l'isolant, entre isolant hygroscopique et peu hygroscopique ?

La différence de comportement entre les isolants fibreux « hygroscopiques » et les isolants fibreux « peu hygroscopiques » s'observe lorsqu'il y a des sollicitations d'humidité importantes. Autrement dit, lorsqu'une ou plusieurs sources d'humidité sont importantes (par exemple en cas de brèche dans une membrane constituant un fort passage d'air humide). Dans ce cas l'aspect hygroscopique permet de retenir une partie de l'humidité au sein du matériau en vue d'un séchage ultérieur jouant ainsi le rôle de tampon. Si le séchage ultérieur n'est pas possible alors des dégradations du matériau dues à l'accumulation d'humidité sont à prévoir (le séchage peut être empêché si la paroi est fermée par d'un côté un enduit étanche et de l'autre un pare-vapeur à fort Sd par exemple). À noter qu'un matériau hygroscopique et capillaire est plus avantageux car il sèche plus rapidement.

Question 10 : Quel est l'impact de l'épaisseur de l'isolant ?

L'épaisseur de l'isolant a, avant tout, un rôle sur le comportement thermique de la paroi. Dans certaines situations, notamment quand le séchage côté extérieur est impossible du fait des propriétés des matériaux (non perspirants et non capillaires) alors plus la résistance thermique rapportée est importante plus le risque de condensation derrière l'isolant et d'accumulation d'humidité est fort. Cela peut mener à du développement fongique et à dégrader des pièces de bois qui seraient présentes.

À retenir ! LE PARE-VAPEUR

Question 11 : Quels sont les différents types de pare-vapeur ?

Les pare-vapeur sont des membranes apportant plus ou moins de résistance au passage de la vapeur d'eau. Parfois ils assurent également la fonction de barrière d'étanchéité à l'air. Leur pose doit être soignée, avec les recouvrements et les fixations prévus par les documents techniques sous peine de performances dégradées, voire d'être contreproductif pour le comportement hygrothermique de la paroi. Il existe des pare-vapeur qui bloquent quasiment tout passage de vapeur d'eau, avec des S_d de 50 m voire plus, des pare-vapeur qui bloquent fortement la vapeur d'eau avec des S_d supérieurs à 15 m et des pare-vapeur que l'on qualifie parfois de frein-vapeur qui bloquent une partie de la vapeur d'eau avec des S_d inférieurs à 15 m. Enfin, il existe des membranes pare-vapeur hygrovariables dont la résistance au passage de la vapeur d'eau varie en fonction de l'hygrométrie à proximité. Celles-ci ont pour but de laisser la possibilité à un mur humide de sécher vers l'intérieur tout en assurant le rôle de pare-vapeur lorsque le mur a une humidité normale.

Question 12 : quels sont les effets d'un pare-vapeur, fixe ou hygrovariable et dans quel cas est-ce intéressant ?

Rares sont les configurations constructives à base d'isolant fibreux qui peuvent se passer de membrane pare-vapeur, fixe ou hygro-variable sans risques hygrothermiques. En limitant le flux de vapeur qui pénètre dans la paroi depuis l'intérieur, ces membranes limitent le risque de condensation derrière l'isolant et limitent la teneur en eau dans les matériaux.

Attention, ceci ne sera plus vrai en cas de discontinuité des membranes, que ce soit suite à une pose malheureuse ou à des actions ultérieures.

La membrane hygrovariable apporte une possibilité intéressante de séchage de la paroi vers l'intérieur si le climat intérieur du bâtiment est sec. S'il est humide alors la protection pourrait être trop faible. Les pare-vapeur à S_d fixes de 18 m présentent des résultats intéressants pour des parois sans remontées capillaires. Les pare-vapeur à S_d fixes plus forts n'ont pas été testés mais présentent théoriquement plus de risques puisque la moindre ouverture dans la membrane sera un pont hydrique fort et aucun flux d'humidité ne pourra revenir de la paroi vers l'intérieur.

Les principales conclusions issues de l'analyse des simulations effectuées sur quatre typologies de parois anciennes en isolation par l'intérieur (brique, béton, pierre, pan de bois-torchis) sont les suivantes :

L'élément le plus impactant vis-à-vis des risques hygrothermiques est l'importance des sollicitations. Celles-ci sont soit climatiques comme la pluie battante, soit liées à la configuration du site et du reste du bâtiment comme les remontées capillaires, soit liées à une ambiance intérieure trop humide.

- Concernant l'ambiance intérieure, la grande majorité des simulations avec un climat intérieur humide ou très humide présente des risques en termes de durabilité de la paroi rénovée et ou de développement fongique. Cela appuie fortement la nécessité de ventiler et d'aérer convenablement son intérieur pour éviter de se retrouver dans ces configurations. Une membrane pare-vapeur de S_d suffisant peut résoudre ce problème même si le climat intérieur est chargé en humidité mais les défauts de mise en œuvre pourraient créer des risques de pathologies. L'ensemble des simulations réalisées a donc mis en évidence la nécessité d'une ventilation lors de la rénovation, quels que soient les matériaux utilisés et le type de rénovation. Celle-ci est indispensable mais peut ne pas être suffisante.
- Concernant les remontées capillaires, le nombre de simulations réalisées est insuffisant pour tirer des conclusions définitives mais il apparaît déjà, qu'avoir une paroi non étanche aux transferts de vapeur d'eau côté extérieur est primordial. De plus la combinaison d'un isolant hygroscopique et d'une membrane pare-vapeur hygrovariable apporte potentiellement un meilleur comportement de la paroi.
- La pluie battante est un élément naturel difficile à gérer sur les parois anciennes isolées par l'intérieur. Les cas les plus critiques (parois très exposées avec une pluviométrie importante) devront faire appel à l'application d'hydrofuges non étanches aux transferts de vapeur d'eau sur la façade extérieure non enduite. Les enduits à base de chaux, s'il y en a, devront être bien entretenus. Les enduits à base de ciment seront à surveiller parce qu'ils peuvent potentiellement créer des pathologies dans le mur ancien.

En termes de perspectives, les éléments retenus par les partenaires sont les suivants :

- L'impact du taux de renouvellement d'air sur le climat intérieur et donc sur les condensations surfaciques est connu et bien maîtrisé, par contre, prédire les risques de pathologie dans les parois en fonction du type de ventilation (simple flux par extraction ou insufflation, double flux, etc.) ou du taux de renouvellement d'air reste à explorer plus en détails.
- Actuellement, le dimensionnement d'une ventilation est réalisé sur ses performances thermiques ; des critères de risques de condensation surfacique ainsi que de taux de CO₂ sont pris en compte. Dans l'état actuel des connaissances, rajouter un critère sur le risque de désordre dans les parois en fonction du taux de renouvellement d'air n'est pas envisageable. Un complément d'étude pourrait amener des réponses. Ceci permettrait d'optimiser le dimensionnement des installations de renouvellement d'air, développer un système spécifique à la rénovation et ainsi garantir une excellente qualité d'air sans risques pour le bâti.
- Des solutions d'isolation plus alternatives devraient être étudiées comme les isolants à grande capillarité (mousse de pierre, plaques de silicate de calcium, etc.).
- Les remontées capillaires doivent être étudiées plus en détails et sur un plus grand nombre de parois. En effet, l'impact du type de ventilation sur les remontées capillaires, n'est à ce jour, pas démontré, celui-ci fait l'objet d'un autre programme de recherche financé par l'ADEME (Projet CAPVENT 2016-2018).
- Les résultats du projet sont conséquents et les données disponibles suite aux expérimentations pourraient faire l'objet de nouvelles analyses (Projet PACTE BDD/Climats 2017-2018).
- Il serait intéressant de proposer une mise en forme plus pratique avec une interface informatique des résultats du projet (Projet PACTE OPERA 2017-2018).

ANNEXES

1. Annexe 1

Étude de cas : paroi ancienne en briques pleines

1.1 Illustrations des résultats par une étude de cas : paroi ancienne en briques pleines

L'étude a permis de mettre en place une méthodologie pour répondre aux questions que se posent les maîtres d'œuvre ou les maîtres d'ouvrage concernant l'humidité. Cette méthodologie est basée sur une étude initiale pour permettre de prendre en compte les conditions d'utilisation du logement afin de définir les températures et humidités rencontrées dans ce logement. Ensuite à partir des matériaux utilisés et des autres conditions aux limites (climat extérieur) la démarche adoptée permet de définir les conditions d'humidité rencontrées par les parois.

Après cette première simulation, si les conditions ne sont pas satisfaisantes le maître d'œuvre ou le maître d'ouvrage pourra faire varier un certain nombre de paramètres afin d'aboutir soit à une paroi satisfaisante soit mieux contrôler les conditions intérieures (ventilation, chauffage).

Pour illustrer cette méthodologie et montrer ce qu'il est possible de faire, une étude de cas est développée ci-dessous.

1.1.1 Définition du type de paroi (géométrie, type de matériaux, emplacements de ceux-ci)

La première étape consiste à définir le type de paroi. Cela implique de connaître sa géométrie, les types de matériaux et les emplacements de ceux-ci.

Parmi les différents types de structure, le mur en briques pleines, Figure 1, a été simulé pour cette étude de cas :

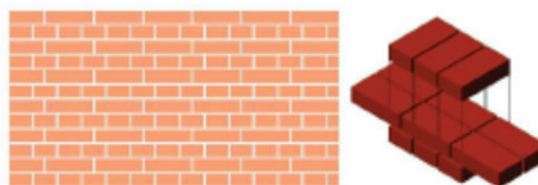


Figure 1 : Schéma de la paroi

En coupe 2D pour la simulation cela donne la figure suivante :

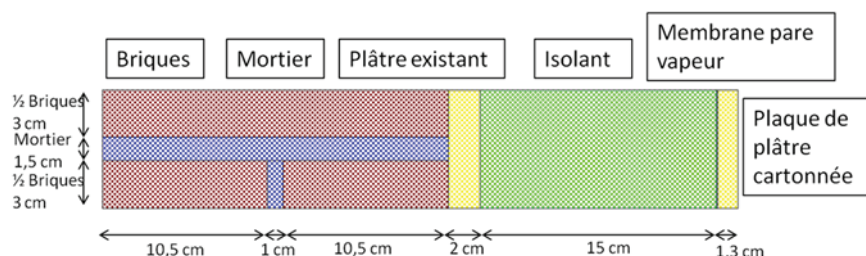


Figure 2 : Schéma de la simulation en 2D de la paroi

Les plans de symétrie horizontaux de la paroi sont utilisés au maximum pour réduire le modèle et donc le temps de calcul.

1.2 Définition des caractéristiques des composants de la paroi

La deuxième étape consiste à définir les caractéristiques des composants de la paroi.

Afin de simuler correctement les transferts hygrothermiques à travers une paroi, il est important de connaître le plus précisément possible les caractéristiques suivantes :

- la masse volumique du produit à l'état sec (en kg/m^3) ;
- la porosité ;
- la conductivité thermique à l'état sec (en W/m.K), et également en fonction de l'humidité relative et de la température. Suivant la nature du produit, la variation de la conductivité thermique en fonction de sa teneur en eau peut être très importante. Cette variation peut influencer les températures obtenues dans un produit ainsi que sa capacité à absorber de l'humidité ;
- la chaleur spécifique en J/(kg.K) à l'état sec. Il est facile de déterminer la chaleur spécifique d'un produit humide car elle est égale à la somme de la chaleur spécifique du produit à l'état sec auquel il faut rajouter celle de l'eau en multipliant chacun des éléments par sa proportion dans le produit final ;
- le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ (sans dimension). Cette caractéristique peut être variable en fonction de l'humidité relative suivant la nature du produit ;
- le coefficient de transport liquide.

Tableau 1 : Principales caractéristiques

Caractéristiques	Symbole	Unité	Dépend de	Quelques normes
Masse volumique sèche	ρ	Kg/m^3	Humidité	EN 822, EN 823, EN 1602, EN 12085, etc.
Porosité	ε	Sans		EN ISO 4590
Chaleur spécifique	C_p	J/(Kg.K)	Humidité	EN ISO 11357, EN 1159
Conductivité thermique	λ	W/(m.K)	Humidité et température	EN 12667, EN 12939, EN ISO 22007, EN 821
Facteur de résistance à la vapeur d'eau	μ	Sans	Humidité	EN 12086, EN ISO 12572, EN 1931
Courbe de sorption	Courbe d'absorption d'eau en fonction de l'humidité relative		Humidité	EN ISO 12571
Coefficient de diffusion d'eau liquide		m^2/s	Humidité	EN ISO 15148

Les caractéristiques peuvent :

- soit être parfaitement connues par le maître d'œuvre ou maître d'ouvrage. Les simulations dans ce cas seront réalisées avec ces éléments ;
- soit avec des caractéristiques variables suivant le type de produit pour une étude de l'impact de ces produits. Cette dernière solution permettra de paramétrer des caractéristiques pour définir ou choisir la meilleure solution.

Pour cet exemple il est proposé d'étudier la variation du type d'isolant et du type de pare-vapeur en fonction des paramètres définis ci-dessous :

- Isolant hygroscopique, ouvert à la vapeur d'eau et un peu capillaire :
 - avec pare-vapeur hygrovariable de S_{dmax} 4 m ;
 - avec pare-vapeur hygrovariable de S_{dmax} 26 m ;
 - avec pare-vapeur de S_d 18 m ;
 - sans pare-vapeur.
- Isolant non-hygroscopique, ouvert à la vapeur d'eau et non capillaire (type laine minérale) :
 - avec pare-vapeur hygrovariable de S_{dmax} 4 m ;
 - avec pare-vapeur hygrovariable de S_{dmax} 26 m ;
 - avec pare-vapeur de S_d 18 m ;
 - sans pare-vapeur.

L'épaisseur d'isolant retenue pour cet exemple est de 15 cm.

Les différences essentielles entre les deux types d'isolants résident dans la courbe de sorption et dans l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau. L'isolant hygroscopique peut contenir beaucoup plus d'eau que l'isolant non-hygroscopique mais en contrepartie sa conductivité thermique augmentera d'autant plus qu'il contient de l'eau.

La variation du type de pare-vapeur permettra de définir la limite acceptable de la résistance aux transferts de vapeur d'eau de cette barrière.

1.2.1 Définition des conditions aux limites (climats intérieur et extérieur, caractéristiques de surface)

Les conditions aux limites sont également variables. Une étude spécifique dans un lieu donné obligera à une utilisation d'un climat extérieur local. Pour une zone spécifique ce sera plutôt le climat extérieur le plus défavorable qu'il faudra choisir.

Dans ces conditions aux limites extérieures d'autres éléments peuvent intervenir comme la pluie, le rayonnement solaire, le rayonnement nocturne, la vitesse et la direction du vent, etc.

Peuvent également varier l'inclinaison de la paroi, son exposition à la pluie et son orientation. Tous ces éléments demandent des données d'entrées déterminées.

Pour les conditions aux limites intérieures plusieurs scénarii sont possibles :

- prendre des situations spécifiques dans différentes normes (normes EN ISO 13788, EN 15026) ;
- utiliser celles définies dans les normes DTU (classes d'hygrométrie intérieures) ;
- définir les conditions spécifiques pour des utilisations données (par exemple faible ventilation avec un nombre de personnes important, climatisation, production de vapeur importante, etc.).

Pour cette dernière hypothèse, des simulations spécifiques sont à effectuer avant les simulations sur la paroi à l'aide des logiciels définis ci-dessus (DYMOLA, MATHIS, TRNSys).

Enfin les conditions d'échanges surfaciques doivent être définies comme les échanges superficiels intérieurs et extérieurs, les caractéristiques optiques de surface de la paroi et la capacité d'absorption d'eau liquide en surface extérieure.

Pour l'exemple présenté, les hypothèses spécifiques suivantes ont été prises en compte pour les simulations :

- la paroi est exposée au nord
- la brique est découverte côté extérieur, il n'y a pas d'enduit ;
- le climat extérieur est un climat type de la zone H1 (est de la France)
- l'impact d'éventuelles finitions intérieures n'a pas été pris en compte ici (tapisserie, peinture, etc.) ;
- une mise en œuvre soignée des matériaux pour la réhabilitation a été réalisée selon les règles de l'art, aussi bien la membrane que l'isolant ;
- aucun flux d'humidité en provenance du sol (remontées capillaires) n'a été pris en compte ici ;
- deux climats intérieurs sont considérés :
 - un climat calculé selon la norme EN 15026 « normal » qui correspond à une pièce de vie dont l'air est renouvelé avec une ventilation mécanique simple flux (dit climat « sec » dans la suite),
 - un climat obtenu à l'aide de simulations spécifiques et correspondant à une pièce avec beaucoup d'apport d'humidité insuffisant évacué (dit climat « humide » dans la suite).

Avec l'ensemble de ces éléments il est possible de réaliser les simulations.

Avec les hypothèses ci-dessus, il est possible de résumer les différentes simulations associées à chacune des variables dans le Tableau 2 ; cela en représente 16.

Tableau 2 : Liste des paramètres

Paroi support	Système d'isolation	Finition extérieure	Climats intérieurs	Pare-vapeur	Climats extérieurs
Briques	Perméable non-hygroscopique	Sans	Normal	Sans	H1
	Perméable hygroscopique		Climat fortement humide	Sd 4 m	
				Sd 18 m	
				Sd 26 m	

Une fois les simulations effectuées, les résultats peuvent être analysés pour permettre de définir la configuration la plus pertinente par rapport à la problématique posée.

Suivant toujours l'exemple proposé, voici ci-après les différentes interprétations qui peuvent être faites.

La teneur en eau dans les différents éléments clés de la paroi sont tracés sur la dernière année, après neuf années de simulation pour éliminer toute incidence des conditions initiales. Enfin les conditions de température et d'humidité relative au niveau de l'ancien enduit intérieur, à l'interface avec l'isolant, sont déterminées sur la dernière année pour obtenir des informations sur le risque de développement fongique.

La Figure 3 représente les résultats obtenus avec l'isolant hygroscopique avec les différents pare-vapeur pour les deux climats intérieurs.

La Figure 4 permet la comparaison entre ces différentes configurations sur l'humidité de l'isolant et de la paroi ancienne (briques et mortier).

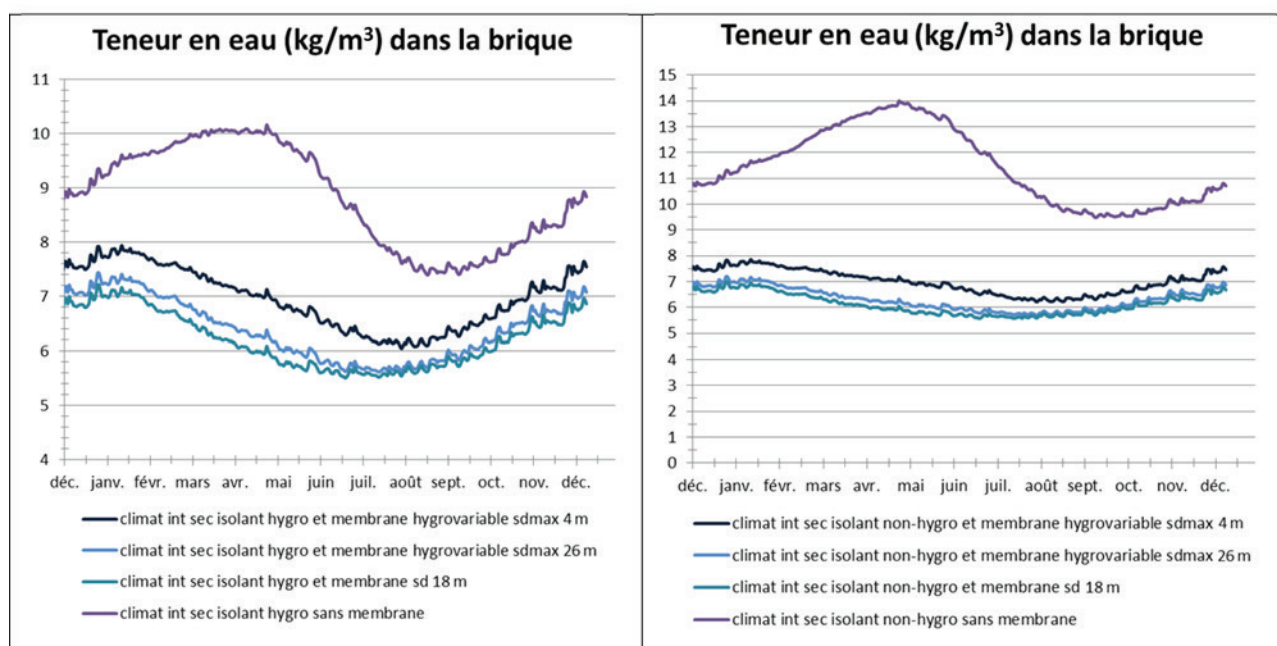


Figure 3 : Climat intérieur normal, teneur en eau dans la brique

Quel que soit le type d'isolant fibreux, la teneur en eau dans la brique est nettement plus élevée lorsqu'il n'y a pas de membrane pare-vapeur. Avec un pare-vapeur les teneurs en eau de la brique avec un isolant hygroscopique ou non-hygroscopique sont identiques.

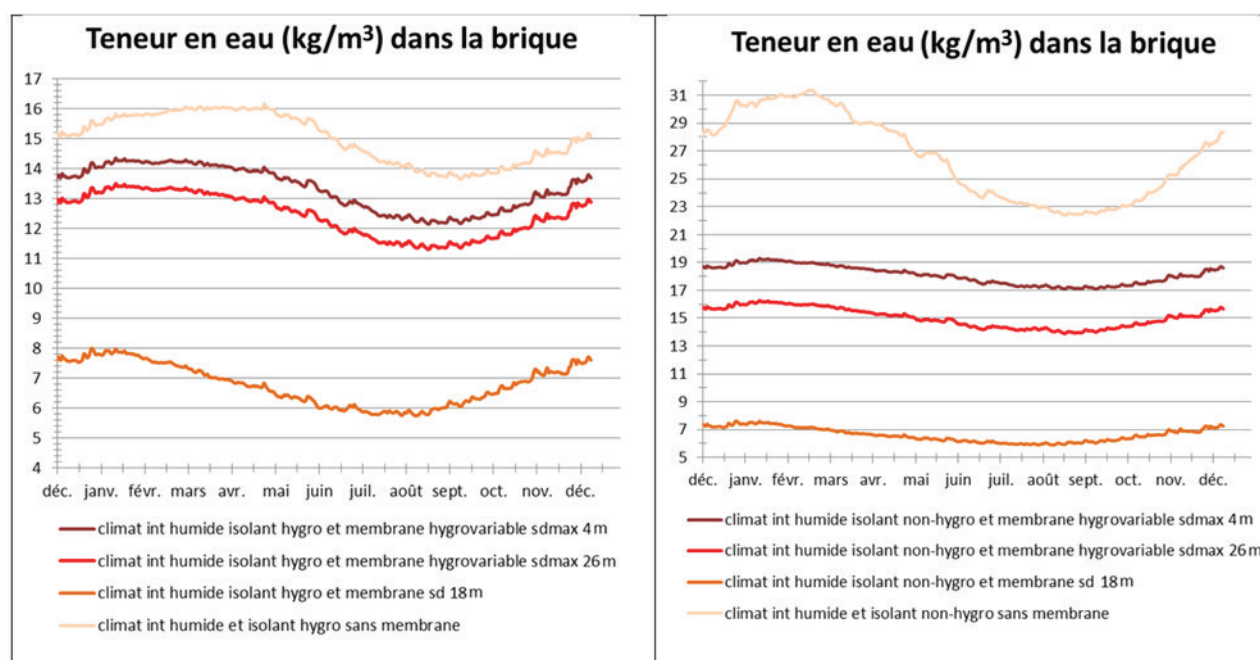


Figure 4 : Climat intérieur très humide, teneur en eau dans la brique

Lorsque le climat intérieur est très humide, l'isolant de la paroi comportant un pare-vapeur ayant un S_d de 18 m obtient une teneur en eau identique qu'il soit hygroscopique ou non-hygroscopique.

Lorsque le pare-vapeur est hygrovariable ou lorsqu'il n'y a pas de pare-vapeur l'isolant hygroscopique permet d'absorber une partie de l'humidité ainsi la brique a une teneur en eau plus faible dans ce cas.

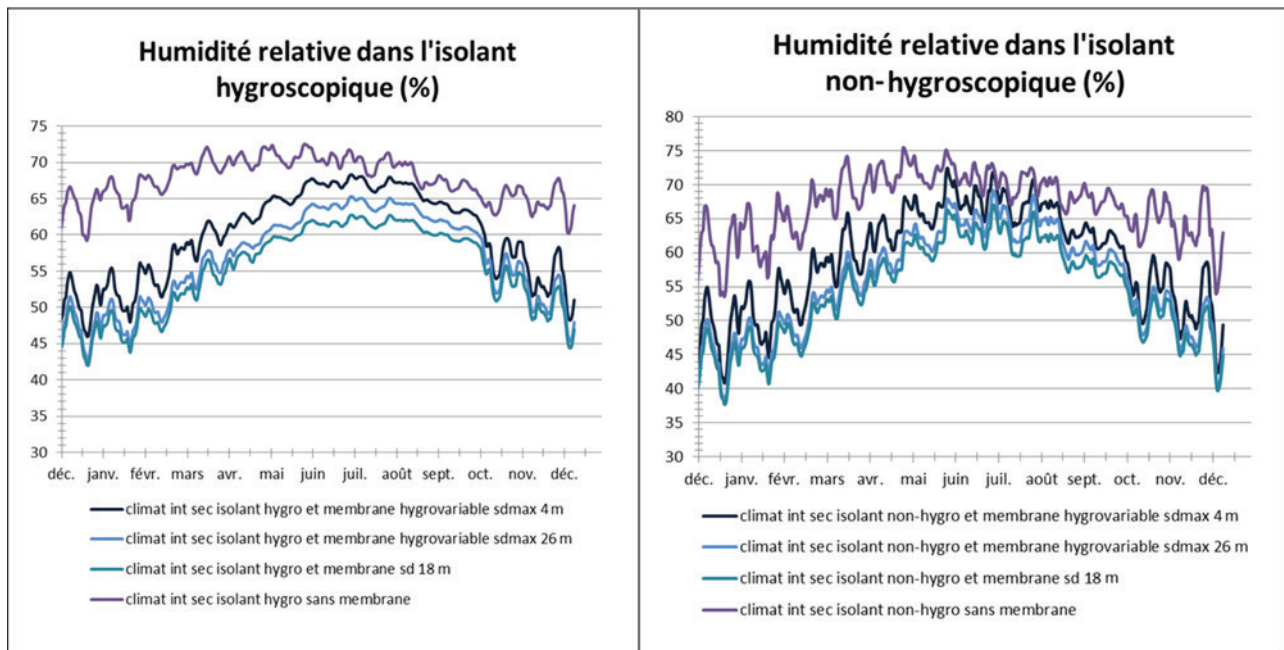


Figure 5 : Climat intérieur normal, humidité relative dans l'isolant

En moyenne dans l'isolant, qu'il soit hygroscopique ou non-hygroscopique, l'humidité relative varie de 60 à 75 % lorsqu'il n'y a pas de pare-vapeur et varie de 40 à 70 % lorsqu'il y a un pare-vapeur.

À la vue des courbes il apparaît que la variable d'humidité est moins fluctuante lorsque l'isolant est hygroscopique. Celui-ci peut absorber et désorber plus d'eau et ainsi amortir les fluctuations d'humidité.

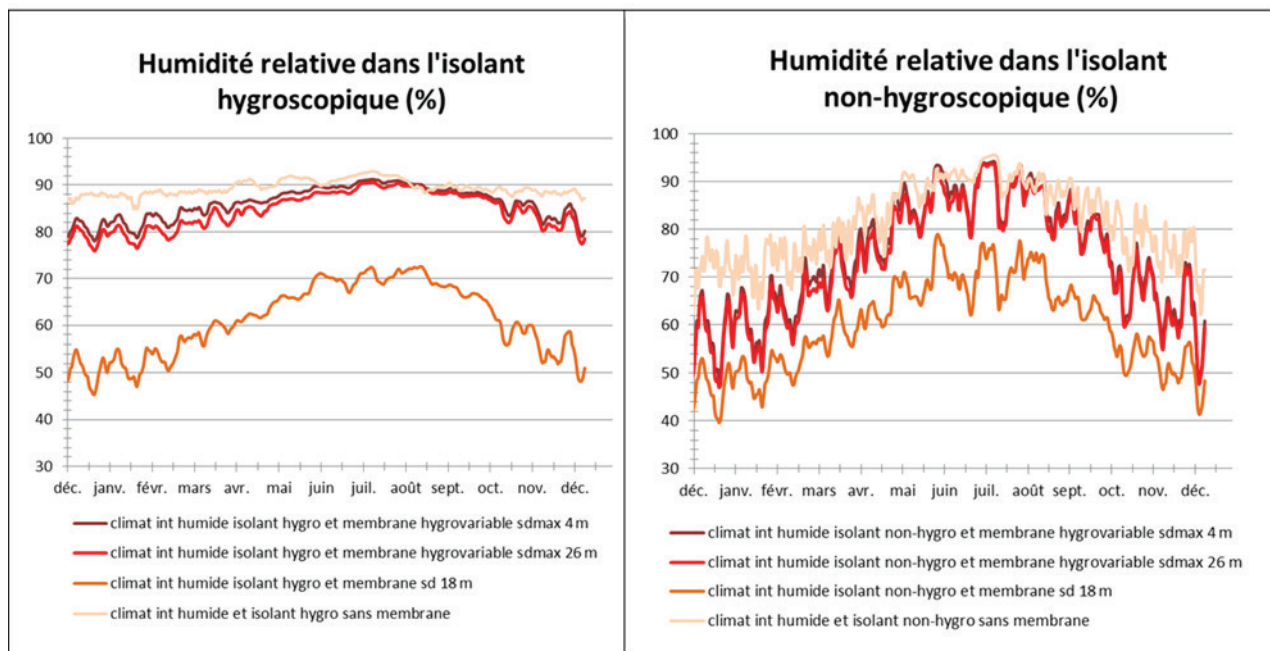


Figure 6 : Climat intérieur humide, humidité relative dans l'isolant

Lorsque le climat intérieur est sévère ou très humide, l'humidité moyenne dans l'isolant atteint plus de 90 %, sauf lorsque la paroi comporte un pare-vapeur ayant un S_d de 18 m.

Plus généralement, les observations réalisées montrent que le climat intérieur fortement humide a une incidence non négligeable, car la plupart des pare-vapeur ne permettent pas de réduire suffisamment l'humidité relative des composants de la paroi.

Dès que le climat intérieur est normal les humidités relatives sont moins importantes. Une paroi sans pare-vapeur a une humidité relative plus élevée que celle avec pare-vapeur.

L'analyse de l'état simulé de l'isolant montre un impact du climat intérieur sauf pour les configurations avec une membrane pare-vapeur de S_d fixe de 18 m. Ce qui est logique puisque l'hypothèse que les membranes sont parfaitement continues a été prise dans le modèle. Ceci confirme déjà que d'assurer un renouvellement d'air par aération et ventilation est la première des choses à faire pour prévenir les risques liés à l'humidité.

Si le climat intérieur a le risque d'être tout de même humide, alors une membrane pare-vapeur de S_d suffisant doit être utilisée (ici dans l'exemple, un S_d de 18 m). Les membranes à S_d trop important peuvent présenter des problèmes en cas d'humidifications parasites, point qui n'est pas développé ici.

En climat intérieur normal, l'humidité des isolants, qu'ils soient hygroscopiques ou non, n'est pas un problème pour les configurations étudiées.

Par rapport à la teneur en eau dans la brique, la première constatation est qu'elle n'est problématique dans aucune configuration étudiée ici. Elle est très semblable pour les configurations avec pare-vapeur S_d 18 m pour les deux climats intérieurs ainsi que pour les configurations avec membranes hygrovariables en climat normal.

En climat intérieur humide, l'isolant hygroscopique joue son rôle de tampon et l'humidité dans la brique est moindre qu'avec l'isolant non-hygroscopique.

À partir de ces constats il est possible d'approfondir l'analyse en se focalisant sur tel ou tel paramètre, afin de montrer son efficacité sur les transferts hygrothermiques.

Par exemple Figures 5-6-7-8 sont présentés des histogrammes et courbes de comparaison entre l'humidité relative à l'interface isolant paroi ancienne et la limite des conditions qui permettrait un développement fongique (par rapport un substrat de classe 0, donc type papier peint par exemple). Cela permet de vérifier le risque de développement de moisissures sur l'enduit intérieur ancien en fonction du type de membrane pare-vapeur et suivant le type d'isolant.

Les courbes Figures 9 à 13 sont déterminées sur la dernière année de simulation ; le risque est avéré si la courbe d'humidité dépasse la limite pendant plus de 15 jours consécutifs d'après la littérature scientifique (plus l'humidité relative dépasse le seuil limite, plus le développement peut apparaître rapidement). Les histogrammes indiquent un nombre de jours global, il est nécessaire d'approfondir l'analyse pour vérifier le nombre de jours consécutifs.

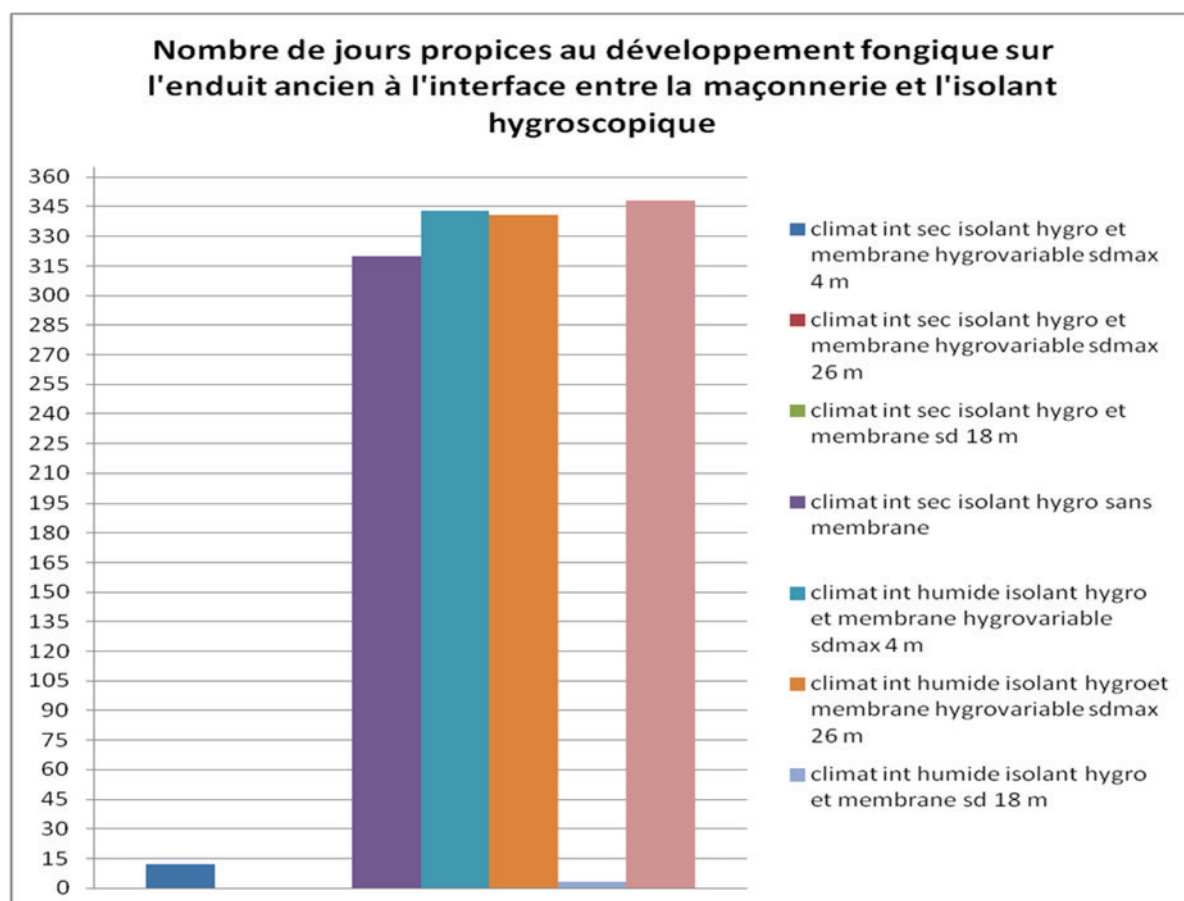


Figure 7 : Nombre de jours propices au développement fongique de l'isolant hygroscopique en fonction du climat intérieur et du type de pare-vapeur

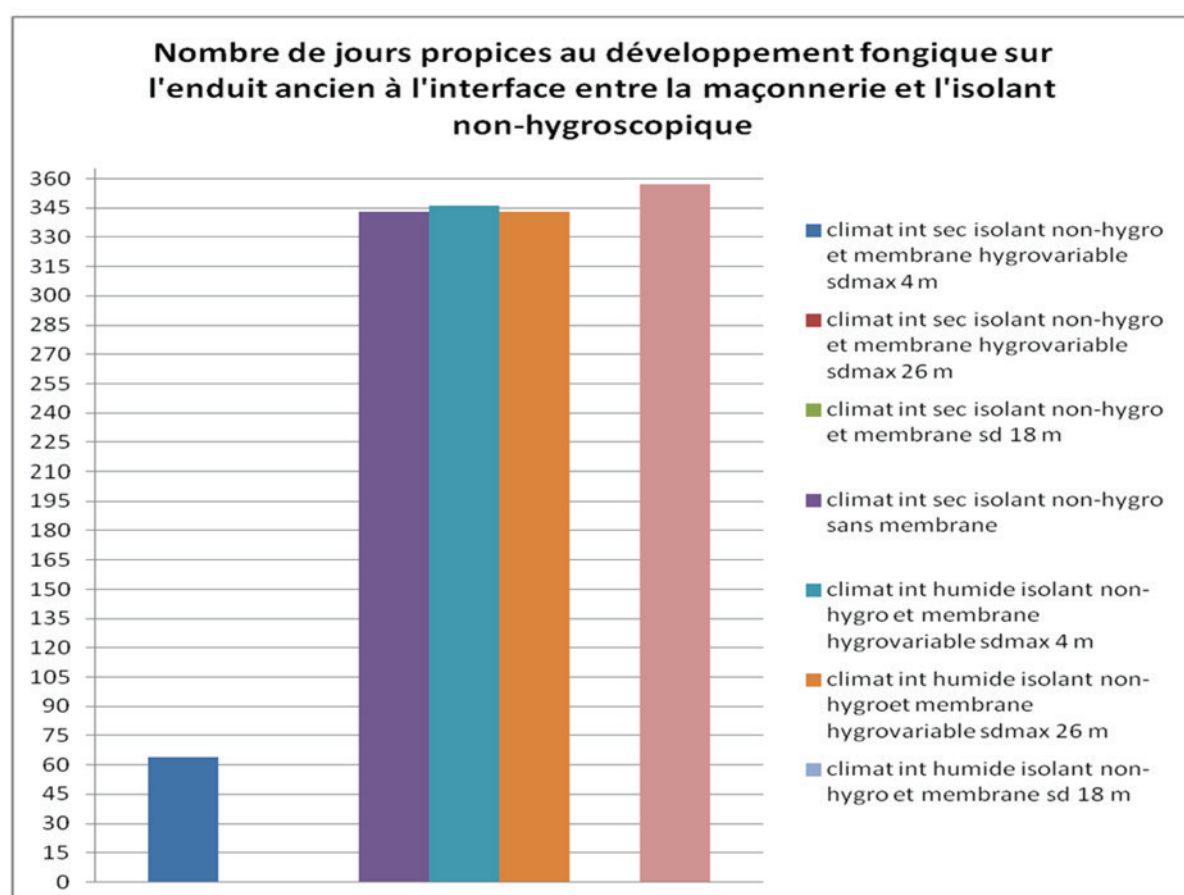


Figure 8 : Nombre de jours propices au développement fongique de l'isolant non hygroscopique en fonction du climat intérieur et du type de pare-vapeur

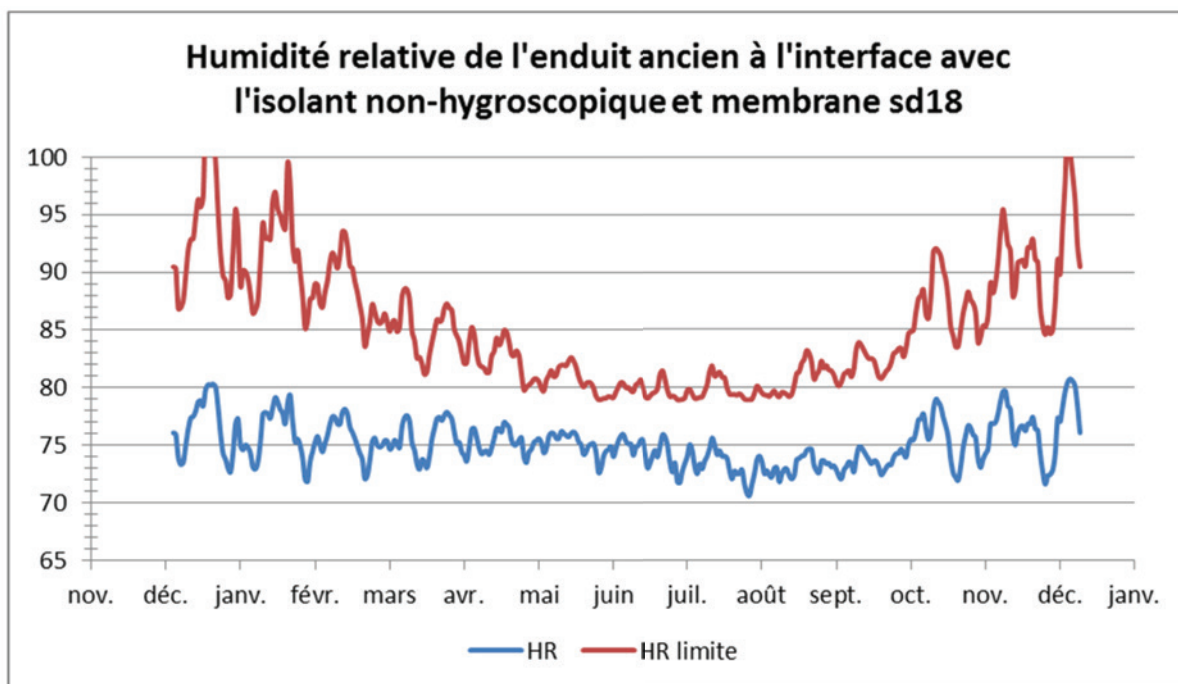


Figure 9 : Analyse du risque de développement fongique avec le climat intérieur normal (1/5)

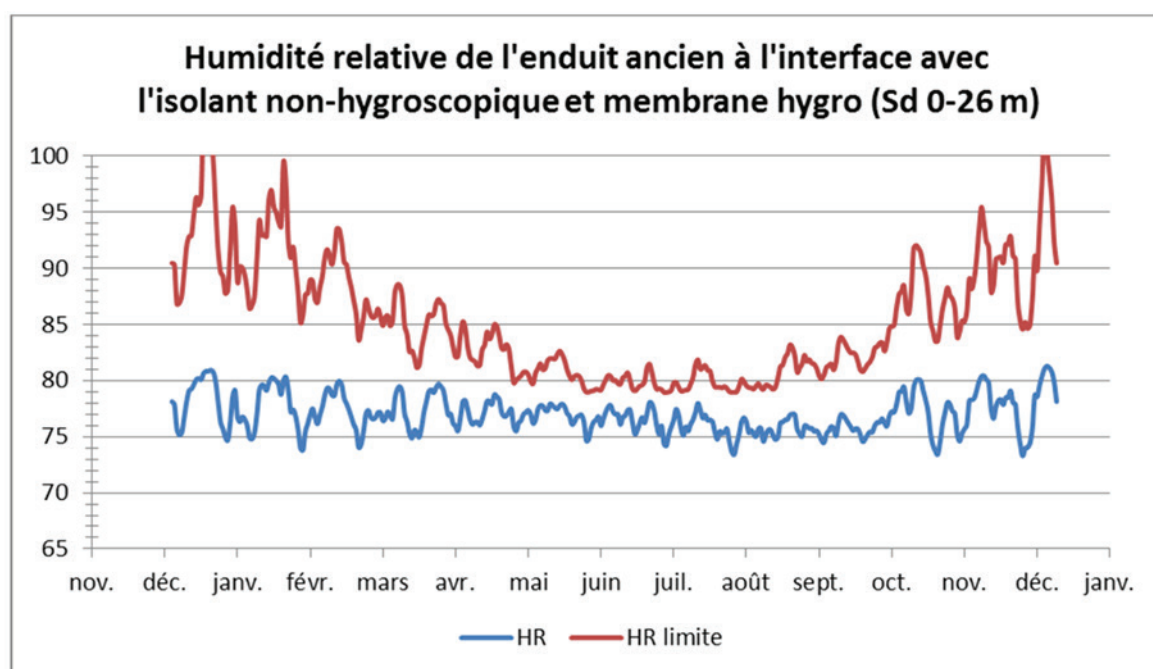


Figure 10 : Analyse du risque de développement fongique avec le climat intérieur normal (2/5)

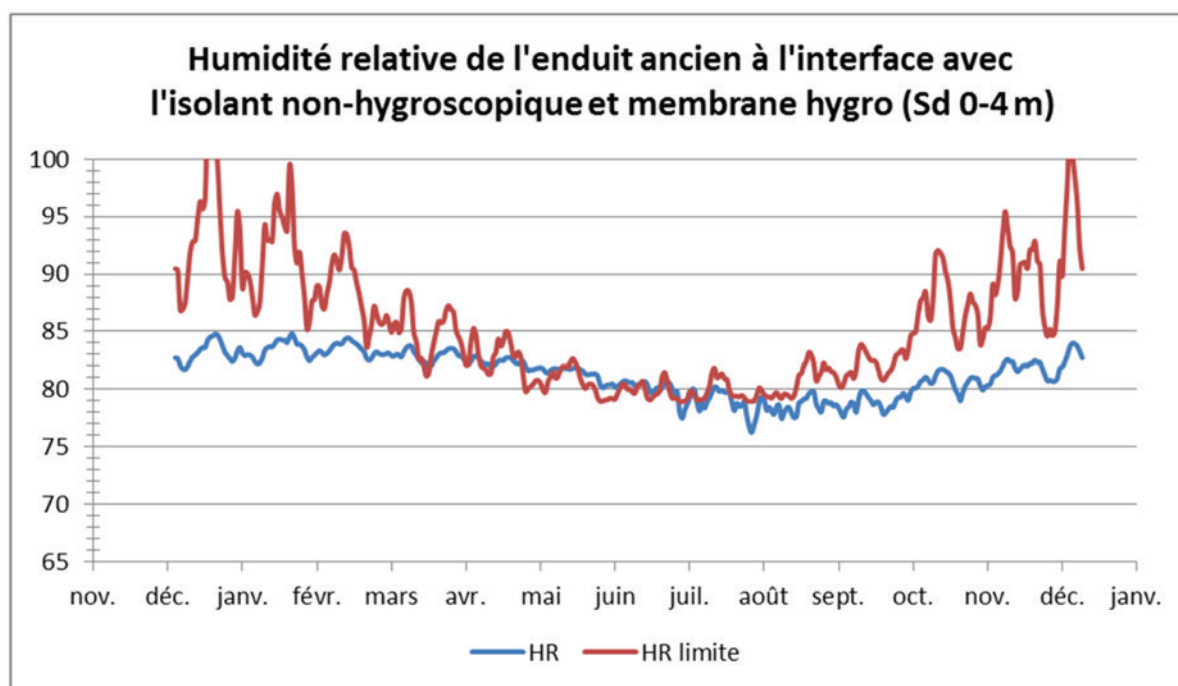


Figure 11 : Analyse du risque de développement fongique avec le climat intérieur normal (3/5)

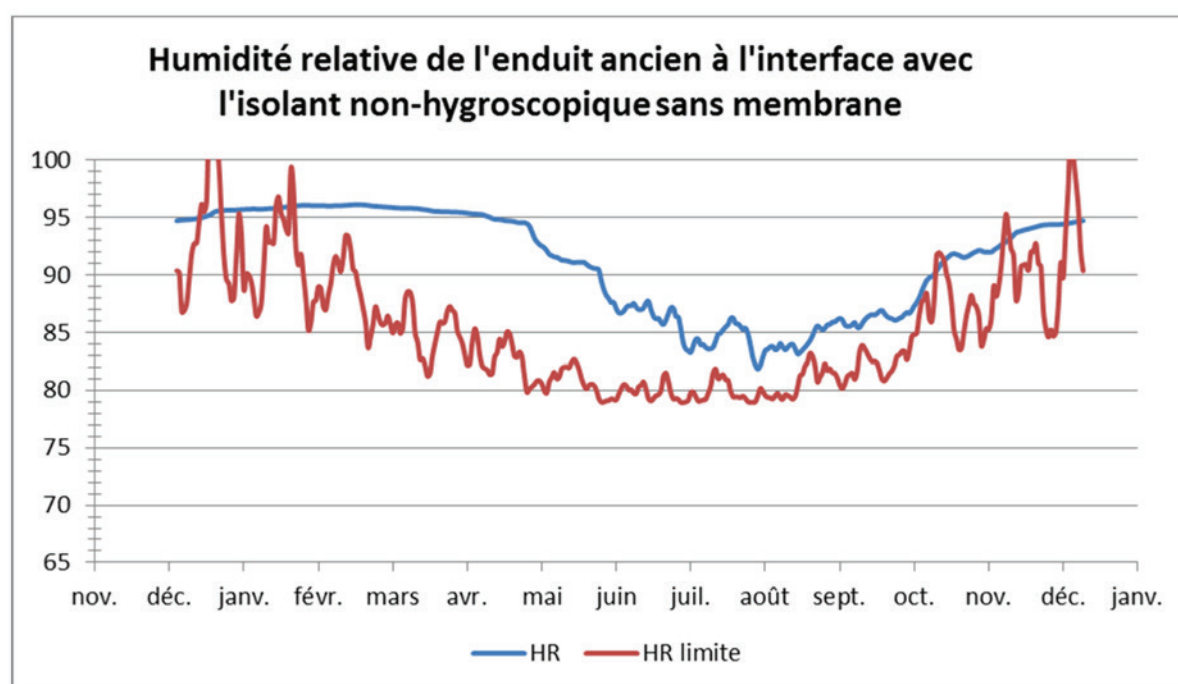


Figure 12 : Analyse du risque de développement fongique avec le climat intérieur normal (4/5)

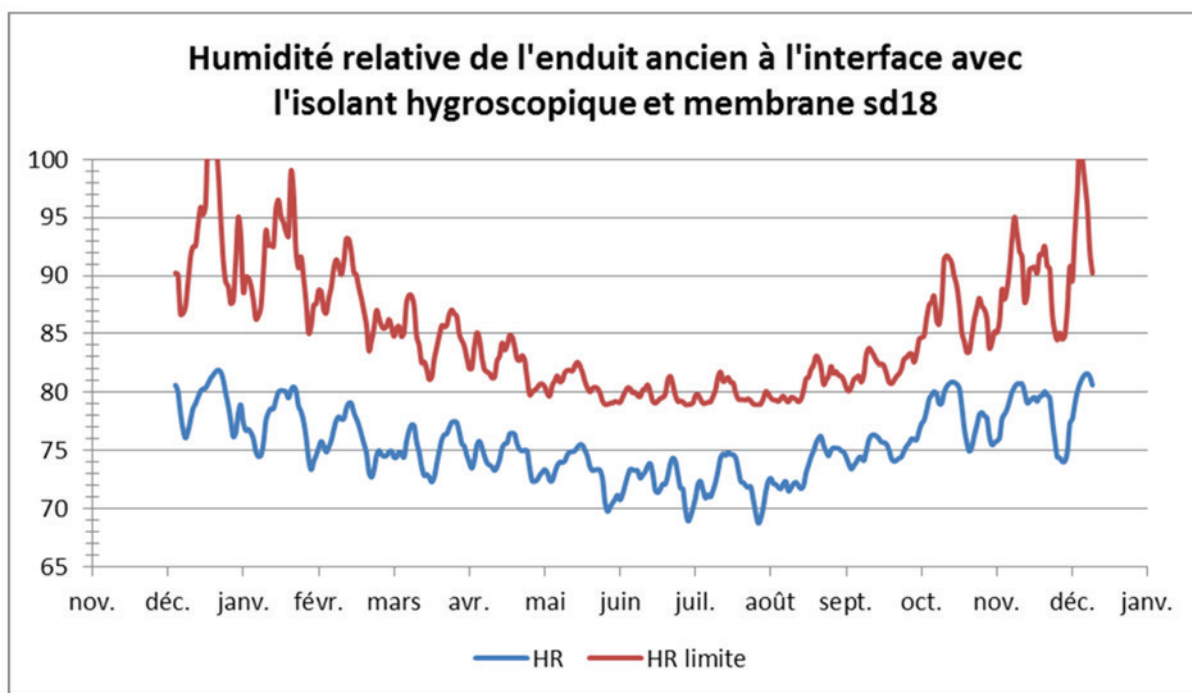


Figure 13 : Analyse du risque de développement fongique avec le climat intérieur normal (5/5)

Pour les deux types d'isolants, l'analyse illustrée par les figures ci-dessus montrent que les configurations sans membranes pare-vapeur en climats humide et normal présentent un fort risque de développement fongique à l'interface maçonnerie/isolation au niveau de l'ancien enduit intérieur (en plâtre dans les simulations). Par ailleurs, en climat intérieur humide seulement, les configurations avec membranes pare-vapeur hygrovariables présentent un risque de développement fongique.

1.2.2 Conclusion générale

- Si le climat intérieur est tout de même humide après réhabilitation, ce qui n'est en aucun cas souhaitable, alors une membrane pare-vapeur de Sd suffisant (ici 18 m) devrait être utilisée et posée/entretenu avec le plus grand soin.
- Au niveau du choix de l'isolant fibreux entre hygroscopique et non-hygroscopique, peu d'impacts sont relevés dans les conditions de ces simulations (rappelé en tête). En association avec un pare-vapeur hygrovariable de Sd faible (4 m dans cet exemple), il est préférable d'utiliser un isolant hygroscopique par rapport au risque de développement fongique (à noter que dans les simulations réalisées ici les deux types d'isolants n'ont pas la même performance énergétique et par conséquent l'isolant non-hygroscopique présente un risque plus sévère que l'isolant hygroscopique).
- Avec un climat intérieur normal, une membrane pare-vapeur hygrovariable ou une membrane pare-vapeur de Sd 18 m devrait être associée à l'isolant fibreux. Pour une meilleure résilience dans le temps, face à des humidifications parasites de la paroi, une membrane hygrovariable de Sdmax élevé est préférable lorsqu'on a le choix.

Il est possible d'approfondir l'analyse, dans le choix des variables pour montrer l'efficacité de tel ou tel élément, produit, variable, etc.

Il est nécessaire de définir l'objectif visé avant de réaliser les simulations ; des données d'entrées seront nécessaires en fonction des paramètres étudiés. Par exemple, l'intégration de la pluie battante impactera les résultats de l'étude (Figure 14).

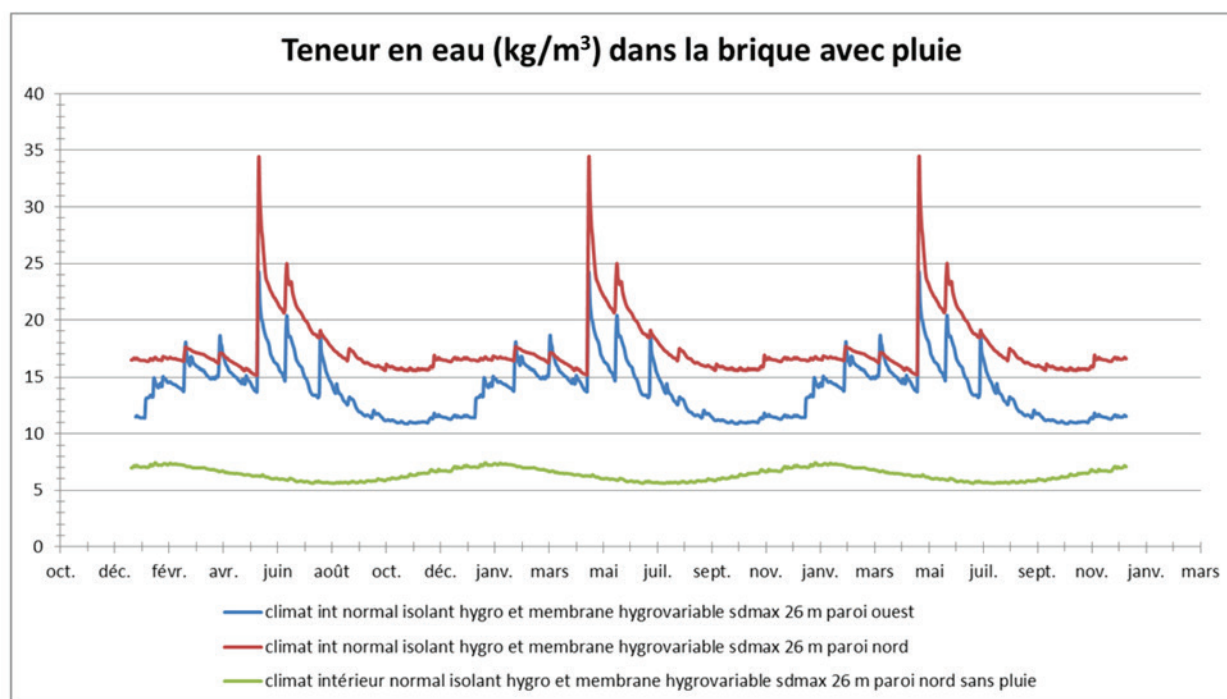


Figure 14 : Comparatif de teneur en eau dans la brique entre une paroi nord sans pluie battante, une paroi nord avec pluie battante et une paroi ouest avec pluie battante. Toutes trois isolées avec un isolant hygroscopique et une membrane à S_d variable (0-26 m).

La paroi ouest est atteinte par plus de pluie battante mais est également plus ensoleillée. Au final sa teneur en eau est moindre que celle de la paroi nord.

2. Annexe 2

Bases de données matériaux pour les simulations

Il existe de nombreuses bases de données proposant des caractéristiques des produits de bâtiment.

La première d'entre elles est celle proposée dans le cadre de la Réglementation Thermique. Le fascicule 2 des Règles Th-U liste les caractéristiques suivantes pour un certain nombre de produits du bâtiment :

- masse volumique sèche ;
- conductivité thermique à 10 °C de température moyenne ;
- chaleur spécifique ;
- facteur de résistance à la vapeur d'eau (m).

Une deuxième base de données potentielle correspond aux bases de données indiquées dans un logiciel de simulation de transferts hygrothermiques. Ces bases apportent un peu plus d'éléments que la base de données de la Réglementation Thermique. La courbe de sorption est souvent indiquée pour les différents produits. Sont indiqués également :

- les coefficients de diffusion liquide en fonction de l'humidité relative ;
- la conductivité thermique en fonction de la température et de la teneur en eau ;
- la teneur en eau en fonction de l'humidité relative ;
- le facteur de résistance à la vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative.

La base de données créée pour les simulations du projet HUMIBATex est basée sur :

- les résultats de mesures obtenus dans cette étude ;
- les valeurs moyennes de produits équivalents dans les bases de données indiquées dans le logiciel de simulation hygrothermique après vérification des indications de la base de données du fascicule 2 des Règles Th-U.

2.1 Base de données pour les simulations dans le cadre de l'étude

Les principales caractéristiques proposées pour les produits désignés dans les différentes simulations sont indiquées dans le tableau ci-après.

Tableau 3 : Caractéristiques générales des différents produits utilisés dans les simulations

Caractéristiques	Densité	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur μ
Dimensions	en kg/m ³	en m ³ /m ³	J/(kg.K)	W/(m.K)	Sans
Béton vieilli	2 200	0,18	850	1,6	100
Brique ancienne	1 800	0,3	850	0,7	11
Bois ancien	650	0,7	1 600	0,14	150
Pierre tendre	1 920	0,25	720	1,8	15
Torchis	1 500	0,3	1 000	0,4	6
Isolant non-hygroscopique (type laine minérale)	50	0,95	850	0,032	1,1
Isolant hygroscopique (type fibre de bois)	55	0,95	2 100	0,038	2
Isolant étanche (type polystyrène expansé)	30	0,95	1 500	0,035	50
Pare-vapeur classique	130	0,001	2 300	2,3	18 000
Pare-vapeur hygrovariable	100	0,1	1 800	2	4 000
Enduit extérieur perméable (type chaux)	1 600	0,3	850	0,7	7
Enduit extérieur étanche (type minéral)	2 000	0,3	850	1,2	25

Le détail des différentes caractéristiques en fonction des autres paramètres est indiqué ci-après.

2.1.1 Béton vieilli

■ Données générales

Caractéristiques	Densité	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur μ
Dimensions	en kg/m ³	en m ³ /m ³	J/(kg.K)	W/(m.K)	Sans
Béton vieilli	2 200	0,18	850	1,6	100

■ Courbe de sorption

Humidité relative	0	0,33	0,43	0,63	0,8	0,85	0,93	1,0
Teneur en eau en kg/m ³	0	23	26	44	53	55	85	175

■ Coefficient de transport liquide (suction)

Teneur en eau en kg/m ³	0	35	87	140	157	175
DWS en m ² /s	3 ^{E-10}	8 ^{E-9}	2 ^{E-8}	3 ^{E-8}	5 ^{E-8}	2 ^{E-7}

■ Coefficient de transport liquide (redistribution)

Teneur en eau en kg/m ³	0	35	87	122	140	157	175
DWS en m ² /s	2 ^{E-11}	2 ^{E-10}	2,5 ^{E-10}	1,3 ^{E-9}	7,2 ^{E-9}	2 ^{E-8}	7 ^{E-8}

■ Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative

Teneur en eau en kg/m ³	0	180
Conductivité thermique en W/(m.K)	1,6	2,647

2.1.2 Brique ancienne

■ Données générales

Caractéristiques	Densité	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur μ
Dimensions	en kg/m ³	en m ³ /m ³	J/(kg.K)	W/(m.K)	Sans
Brique ancienne	1 800	0,3	850	0,7	11

■ Courbe de sorption

Humidité relative	0	0,113	0,462	0,755	0,851	0,976	0,999	1,0
Teneur en eau en kg/m ³	0	0,53	3,97	5,78	9,21	29,14	110	230

■ Coefficient de transport liquide (succion)

Teneur en eau en kg/m ³	0	23	184	220	225	230
DWS en m ² /s	0	7 ^{E-8}	7 ^{E-7}	3 ^{E-6}	5 ^{E-5}	3 ^{E-4}

■ Coefficient de transport liquide (redistribution)

Teneur en eau en kg/m ³	0	23	160	184	207	230
DWS en m ² /s	0	7 ^{E-9}	7 ^{E-9}	5 ^{E-8}	1 ^{E-7}	9 ^{E-5}

■ Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative

Teneur en eau en kg/m ³	0	310
Conductivité thermique en W/(m.K)	0,7	2,5

■ Conductivité thermique en fonction de la température

Température en °C	-20	80
Conductivité thermique en W/(m.K)	0,69	0,71

2.1.3 Bois ancien

■ Données générales

Caractéristiques	Densité	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur μ
Dimensions	en kg/m ³	en m ³ /m ³	J/(kg.K)	W/(m.K)	Sans
Bois ancien	650	0,7	1 600	0,14	150

■ Courbe de sorption

Humidité relative	0	0,113	0,462	0,755	0,851	0,976	0,999	1,0
Teneur en eau en kg/m ³	0	0,69	27,4	65,08	75,35	130,15	350	570

■ Coefficient de transport liquide (succion et redistribution)

Teneur en eau en kg/m ³	0
DWS en m ² /s	0

■ *Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau*

Humidité relative	0	0,25	0,5	0,6	0,7	0,9	1
Valeur de μ	150	100	45	30	25	18	10

■ *Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative*

Teneur en eau en kg/m³	0	570
Conductivité thermique en W/(m.K)	0,14	0,35

■ *Conductivité thermique en fonction de la température*

Température en °C	-20	80
Conductivité thermique en W/(m.K)	0,13	0,16

2.1.4 Pierre tendre

■ *Données générales*

Caractéristiques	Densité	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur μ
Dimensions	en kg/m³	en m³/m³	J/(kg.K)	W/(m.K)	Sans
Pierre tendre	1 920	0,25	720	1,8	15

■ *Courbe de sorption*

Humidité relative	0	0,113	0,462	0,755	0,851	0,976	0,999	1,0
Teneur en eau en kg/m³	0	0,50	5	10	20	35	50	250

■ *Coefficient de transport liquide (suction)*

Teneur en eau en kg/m³	0	15	250
DWS en m²/s	0	3 ^{E-8}	1 ^{E-8}

■ *Coefficient de transport liquide (redistribution)*

Teneur en eau en kg/m³	0	15	250
DWS en m²/s	0	2.5 ^{E-9}	1 ^{E-8}

■ *Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau*

Humidité relative	0
Valeur de μ	15

■ *Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative*

Teneur en eau en kg/m³	0	250
Conductivité thermique en W/(m.K)	1,8	4

■ *Conductivité thermique en fonction de la température*

Température en °C	-20	80
Conductivité thermique en W/(m.K)	1,7	1,9

2.1.5 Torchis

■ Données générales

Caractéristiques	Densité	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur μ
Dimensions	en kg/m ³	en m ³ /m ³	J/(kg.K)	W/(m.K)	Sans
Torchis	1 500	0,3	1 000	0,4	6

■ Courbe de sorption

Humidité relative	0	0.2	0.5	0.8	0.9	0.95	0.99	1.0
Teneur en eau en kg/m ³	0	10	40	50	60	130	220	300

■ Coefficient de transport liquide (succion)

Teneur en eau en kg/m ³	0
DWS en m ² /s	0

■ Coefficient de transport liquide (redistribution)

Teneur en eau en kg/m ³	0
DWS en m ² /s	0

■ Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau

Humidité relative	0
Valeur de μ	6

■ Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative

Teneur en eau en kg/m ³	0	300
Conductivité thermique en W/(m.K)	0,4	1,5

■ Conductivité thermique en fonction de la température

Température en °C	0
Conductivité thermique en W/(m.K)	0.4

2.1.6 Isolant non-hygroscopique

■ Données générales

Caractéristiques	Densité	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur μ
Dimensions	en kg/m ³	en m ³ /m ³	J/(kg.K)	W/(m.K)	Sans
Isolant non-hygroscopique (style laine minérale)	50	0,95	850	0,032	1,1

■ Courbe de sorption

Humidité relative	0	0,5	0,8	0,93	0,97	0,99	0,995	0,999	0,9995	0,9999	1,0
Teneur en eau en kg/m ³	0	0,57	0,82	1,08	2,03	4,57	7,35	21,7	34	90	473

■ Coefficient de transport liquide (suction)

Teneur en eau en kg/m ³	0
DWS en m ² /s	0

■ Coefficient de transport liquide (redistribution)

Teneur en eau en kg/m ³	0
DWS en m ² /s	0

■ Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau

Humidité relative	0
Valeur de μ	1.1

■ Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative

Teneur en eau en kg/m ³	0	10	20	50	100	200	300	400	600	800	950
Conductivité thermique en W/(m.K)	0,032	0,032	0,033	0,034	0,039	0,056	0,1	0,15	0,27	0,44	0,6

■ Conductivité thermique en fonction de la température

Température en °C	-20	80
Conductivité thermique en W/(m.K)	0,026	0,046

2.1.7 Isolant hygroscopique

■ Données générales

Caractéristiques	Densité	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur μ
Dimensions	en kg/m ³	en m ³ /m ³	J/(kg.K)	W/(m.K)	Sans
Isolant hygroscopique (style fibre de bois)	55	0,95	2 100	0,038	2

■ Courbe de sorption

Humidité relative	0	0,1	0,5	0,8	0,9	0,93	0,95	0,97	0,99	0,995	0,999	0,9999	1,0
Teneur en eau en kg/m ³	0	0,25	0,89	3	6,6	9,7	14	24,4	69	123	296	411	426

■ Coefficient de transport liquide (suction)

Teneur en eau en kg/m ³	0	20	426
DWS en m ² /s	0	1.8E-12	5E-10

■ Coefficient de transport liquide (redistribution)

Teneur en eau en kg/m ³	0	5.5	426
DWS en m ² /s	0	5E-9	9E-9

■ Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau

Humidité relative	0
Valeur de μ	2

■ Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative

Teneur en eau en kg/m ³	0	20	50	100	200	400	600	800	950
Conductivité thermique en W/(m.K)	0,038	0,039	0,041	0,047	0,067	0,15	0,27	0,44	0,6

■ Conductivité thermique en fonction de la température

Température en °C	-20	80
Conductivité thermique en W/(m.K)	0,033	0,053

2.1.8 Isolant étanche

■ Données générales

Caractéristiques	Densité	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur μ
Dimensions	en kg/m ³	en m ³ /m ³	J/(kg.K)	W/(m.K)	Sans
Isolant étanche (style polystyrène expansé)	30	0,95	1 500	0,035	50

■ Courbe de sorption

Humidité relative	0	0,9	0,97	0,99	1,0
Teneur en eau en kg/m ³	0	4	10	30	400

■ Coefficient de transport liquide (succion)

Teneur en eau en kg/m ³	0
DWS en m ² /s	0

■ Coefficient de transport liquide (redistribution)

Teneur en eau en kg/m ³	0
DWS en m ² /s	0

■ Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau

Humidité relative	0
Valeur de μ	50

■ Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative

Teneur en eau en kg/m ³	0	10	20	50	100	200	300	400
Conductivité thermique en W/(m.K)	0,035	0,035	0,037	0,04	0,045	0,065	0,1	0,14

■ Conductivité thermique en fonction de la température

Teneur en eau en °C	-20	80
Conductivité thermique en W/(m.K)	0,034	0,054

2.1.9 Pare-vapeur classique

■ Données générales

Caractéristiques	Densité	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur μ
Dimensions	en kg/m ³	en m ³ /m ³	J/(kg.K)	W/(m.K)	Sans
Pare-vapeur classique	130	0,001	2 300	2,3	18 000

■ Courbe de sorption

Humidité relative	0
Teneur en eau en kg/m ³	0

■ Coefficient de transport liquide (succion)

Teneur en eau en kg/m ³	0
DWS en m ² /s	0

■ Coefficient de transport liquide (redistribution)

Teneur en eau en kg/m ³	0
DWS en m ² /s	0

■ Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (pour une épaisseur de 1 mm)

Humidité relative	0
Valeur de μ	18 000

■ Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative

Teneur en eau en °C	10
Conductivité thermique en W/(m.K)	2,3

■ Conductivité thermique en fonction de la température

Température en °C	10
Conductivité thermique en W/(m.K)	2,3

2.1.10 Pare-vapeur hygrovariable

■ Données générales

Caractéristiques	Densité	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur μ
Dimensions	en kg/m ³	en m ³ /m ³	J/(kg.K)	W/(m.K)	Sans
Pare-vapeur hygrovariable	100	0,1	1 800	2	4 000

■ Courbe de sorption

Humidité relative	0
Teneur en eau en kg/m ³	0

■ Coefficient de transport liquide (succion)

Teneur en eau en kg/m ³	0
DWS en m ² /s	0

■ Coefficient de transport liquide (redistribution)

Teneur en eau en kg/m ³	0
DWS en m ² /s	0

■ Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau
(pour une épaisseur de 1 mm)

Humidité relative	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Valeur de μ	4 000	3 820	3 780	3 500	3 030	2 380	1 640	990	540	280	140

■ Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative

Teneur en eau en kg/m ³	10
Conductivité thermique en W/(m.K)	2

■ Conductivité thermique en fonction de la température

Température en °C	10
Conductivité thermique en W/(m.K)	2

2.1.11 Enduit perméable

■ Données générales

Caractéristiques	Densité	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur μ
Dimensions	en kg/m ³	en m ³ /m ³	J/(kg.K)	W/(m.K)	Sans
Enduit extérieur perméable (style chaux)	1 600	0,3	850	0,7	7

■ Courbe de sorption

Humidité relative	0	0,5	0,8	0,9	0,93	0,96	0,99	0,996	1,0
Teneur en eau en kg/m ³	0	20	30	50	70	120	180	210	250

■ Coefficient de transport liquide (suction)

Teneur en eau en kg/m ³	0	10	250
DWS en m ² /s	0	1,5 ^{E-10}	1,5 ^{E-7}

■ Coefficient de transport liquide (redistribution)

Teneur en eau en kg/m ³	0	10	250
DWS en m ² /s	0	1,5 ^{E-10}	1 ^{E-8}

■ Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau

Humidité relative	0
Valeur de μ	7

■ Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative

Teneur en eau en kg/m ³	10	250
Conductivité thermique en W/(m.K)	0,7	1,75

■ Conductivité thermique en fonction de la température

Température en °C	-20	80
Conductivité thermique en W/(m.K)	0,69	0,71

2.1.12 Enduit étanche

■ Données générales

Caractéristiques	Densité	Porosité	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Facteur μ
Dimensions	en kg/m ³	en m ³ /m ³	J/(kg.K)	W/(m.K)	Sans
Enduit extérieur étanche (style minéral)	2 000	0,3	850	1,2	25

■ Courbe de sorption

Humidité relative	0	0,113	0,462	0,755	0,851	0,9766	0,999	1,0
Teneur en eau en kg/m ³	0	0,95	2,47	4,18	7,03	12,35	50	250

■ Coefficient de transport liquide (suction)

Teneur en eau en kg/m ³	0	25	250
DWS en m ² /s	0	9 ^{E-12}	2,9 ^{E-9}

■ Coefficient de transport liquide (redistribution)

Teneur en eau en kg/m ³	0	25	250
DWS en m ² /s	0	9 ^{E-12}	3 ^{E-10}

■ Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau

Humidité relative	0
Valeur de μ	25

■ Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative

Teneur en eau en kg/m ³	10	250
Conductivité thermique en W/(m.K)	1,2	3

■ Conductivité thermique en fonction de la température

Température en °C	-20	80
Conductivité thermique en W/(m.K)	1,19	1,21

3. Références bibliographiques

ASHRAE. *Indoor Air Quality Guide: Best Practices for Design, Construction, and Commissioning*. W. Stephen Comstock, 2009. <https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/indoor-air-quality-guide>.

Baïz, Nour, Rémy Slama, Marie-Christine Béné, Marie-Aline Charles, Marie-Nathalie Kolopp-Sarda, Antoine Magnan, Olivier Thiebaugeorges, Gilbert Faure, and Isabella Annesi-Maesano. "Maternal Exposure to Air Pollution before and during Pregnancy Related to Changes in Newborn's Cord Blood Lymphocyte Subpopulations. The EDEN Study Cohort." *BMC Pregnancy and Childbirth* 11, no. 1 (November 2, 2011): 87. doi:10.1186/1471-2393-11-87.

EEA. "Air Quality in Europe — 2013 Report." European Environment Agency, October 15, 2013.

Genc, Sermin, Zeynep Zadeoglulari, Stefan H. Fuss, and Kursad Genc. "The Adverse Effects of Air Pollution on the Nervous System." *Journal of Toxicology* 2012 (February 19, 2012). doi:10.1155/2012/782462.

Otto, D., L. Molhave, G. Rose, H. K. Hudnell, and D. House. "Neurobehavioral and Sensory Irritant Effects of Controlled Exposure to a Complex Mixture of Volatile Organic Compounds." *Neurotoxicology and Teratology* 12, no. 6 (November 1990): 649–52. doi:10.1016/0892-0362(90)90079-R.

Peuhkuri, Ruut. "Moisture Dynamics in Building Envelopes." Technical University of Denmark, 2003.

Qin, Menghao. "Etude Des Phénomènes de Transfert Hygrothermiques Dans Les Parois Des Bâtiments." Université de La Rochelle, 2007.

Sedbauer, K. 2001. Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in bauteilen (Prediction of mould manifestation on and in building parts). Thesis, University of Stuttgart.

van Kempen, Elise, Paul Fischer, Nicole Janssen, Danny Houthuijs, Irene van Kamp, Stephen Stansfeld, and Flemming Cassee. "Neurobehavioral Effects of Exposure to Traffic-Related Air Pollution and Transportation Noise in Primary Schoolchildren." *Environmental Research* 115 (May 2012): 18–25. doi:10.1016/j.envres.2012.03.002.

WHO. "Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution – REVIHAAP Project: Final Technical Report." Technical report, 2013. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/review-of-evidence-on-health-aspects-of-air-pollution-revihaap-project-final-technical-report>.

SIÈGE SOCIAL

84, AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2
TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX (33) 01 60 05 70 37 | www.cstb.fr

CSTB
le futur en construction

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT

MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA ANTIPOLIS