



Cerema

Direction territoriale Est
Laboratoire Régional de Strasbourg

*Synthèse bibliographique des études sur la
rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de
matériaux isolants biosourcés*

Octobre 2016

A thick, solid orange curved bar that starts horizontally on the left and curves downwards and to the right, ending in a smaller, more pronounced curve at the bottom right corner.

Références de l'affaire

MEDDE/DGALN/DHUP/QC/QC2
Guillaume DEROMBISE, chef de projet « Structuration et développement des filières de matériaux de construction biosourcés »
01.40.81.26.08 – guillaume.derombise@developpement-durable.gouv.fr
Référence de l'affaire : C16PE0013-06

Historique des versions du document

Version	Auteur	Commentaires
V100	Elodie Héberlé	Version de travail
V200	Elodie Héberlé	Version de travail
V300	Elodie Héberlé	Version finale avant relecture
V400	Elodie Héberlé	Version finale avec relecture Guillaume Derombise et Frédéric Leclerc
VF	Elodie Héberlé	Version finale définitive avec relecture Julien Burgholzer et Julien Borderon

Affaire suivie par

Cerema – Direction territoriale Est – Laboratoire régional de Strasbourg – groupe « Bâtiment – Immobilier – Construction »
Elodie Héberlé, responsable d'activités « Performance énergétique des bâtiments »
03.88.77.79.31 – elodie.heberle@cerema.fr

Validation

Rapport rédigé par :	Rapport vérifié par :	Rapport validé par :
Elodie Héberlé, responsable d'activités « Performance énergétique des bâtiments »	Julien Borderon, pilote du domaine « Performance énergétique des bâtiments »	Julien Burgholzer, responsable du groupe « Bâtiment – Immobilier – Construction »

Sommaire

1. Introduction.....	7
2. Définitions et problématique.....	8
2.1. Paramètres caractérisant les propriétés physiques et hygrothermiques des matériaux. .8	8
2.1.1. Propriété physique.....	8
<i>Masse volumique.....</i>	<i>8</i>
2.1.2. Propriétés thermiques.....	8
<i>Performance thermique.....</i>	<i>8</i>
<i>Capacité thermique massique.....</i>	<i>8</i>
<i>Inertie thermique.....</i>	<i>9</i>
2.1.3. Propriétés hygriques.....	10
<i>Hygroscopicité.....</i>	<i>10</i>
<i>Résistance à la diffusion de vapeur.....</i>	<i>11</i>
<i>Capillarité.....</i>	<i>12</i>
2.2. Les matériaux isolants biosourcés.....	12
2.2.1. Définition.....	12
<i>Matériaux isolants biosourcés.....</i>	<i>12</i>
<i>Enduits isolants.....</i>	<i>13</i>
2.2.2. Propriétés physiques, thermiques et hygriques des matériaux isolants en général.....	14
2.3. Le bâti ancien.....	18
2.3.1. Définition.....	18
2.3.2. Les enjeux de la rénovation du bâti ancien.....	18
<i>Le bâti ancien représente plus d'un tiers du parc français en surface.....</i>	<i>18</i>
<i>En théorie, le bâti ancien consomme plus d'énergie que les autres bâtiments.....</i>	<i>19</i>
<i>En pratique, le bâti ancien consomme beaucoup moins.....</i>	<i>20</i>
<i>Conclusion.....</i>	<i>22</i>
2.3.3. Les spécificités du bâti ancien.....	23
<i>Une diversité des matériaux et des mises en œuvre.....</i>	<i>23</i>
<i>Une perméabilité à l'air très élevée.....</i>	<i>23</i>
<i>Un confort d'été bon, mais variable en fonction des murs anciens.....</i>	<i>24</i>
<i>Une sensibilité à l'humidité plutôt élevée, variable en fonction des murs anciens.....</i>	<i>25</i>
<i>Conclusion.....</i>	<i>26</i>
2.3.4. Propriétés physiques, thermiques et hygriques des matériaux de construction en général.....	26
2.3.5. Comparaison entre les propriétés des matériaux isolants et des matériaux de construction.....	29
2.4. Problématique.....	29
3. Le bâti ancien, les matériaux isolants et l'humidité.....	30
3.1. Les pathologies du bâtiment liées à un excès d'humidité.....	30
3.1.1. Généralités.....	30

3.1.2. Les pathologies dues à la rénovation thermique.....	30
3.2. La rénovation thermique du bâti ancien et l'excès d'humidité.....	32
3.2.1. Communications grand public généralistes.....	32
Fiches ATHEBA.....	32
Formations et conférences de Samuel Courgey.....	32
Guide ABC.....	33
Analyse critique.....	33
3.2.2. Communications grand public appliquées.....	33
Réhabiliter le bâti picard en pan de bois.....	34
Un bâti en tuffeau pour aujourd'hui et demain.....	35
Analyse critique.....	35
3.2.3. Travaux scientifiques.....	36
Les cahiers HYGROBA : étude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes.....	36
Guide de l'éco-rénovation du Parc Naturel Régional des Vosges du Nord.....	39
Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines.....	40
Evaluation des risques de pathologies liées à l'humidité au niveau des poutres encastrées dans un mur isolé par l'intérieur.....	41
Analyse critique.....	42
3.3. Les effets de l'excès d'humidité sur les matériaux isolants.....	42
3.3.1. La dégradation des propriétés des matériaux isolants.....	42
Lien entre humidité et conductivité thermique.....	42
Les essais de vieillissement accélérés.....	46
3.3.2. Le risque de développement de moisissures.....	46
Un véritable frein à la prescription des matériaux biosourcés dans la construction.....	46
Les conditions du développement de moisissures.....	46
L'évaluation du risque de développement de moisissures pour les matériaux isolants biosourcés.....	47
Cas des matériaux isolants biosourcés traités.....	48
Cas des isolants biosourcés non traités.....	48
Cas des matériaux isolants conventionnels.....	49
3.3.3. L'importance d'une bonne mise en œuvre.....	50
4. Le bâti ancien, les matériaux isolants et le confort d'été.....	51
4.1. La température intérieure.....	51
4.2. L'inertie par transmission : déphasage et amortissement.....	52
4.3. Le confort hygrothermique.....	52
4.3.1. Définition.....	52
4.3.2. La valeur de la capacité tampon hydrique ou Moisture Buffer Value (MBV).....	54
5. Synthèse générale.....	56
6. Conclusion.....	58

Index des illustrations

<i>Illustration 1 : Courbes de sorption pour un matériau peu hygroscopique (à gauche, polystyrène extrudé) et pour un matériau hygroscopique (à droite, laine de bois) (source : [logiciel WUFI, 1995]).....</i>	<i>11</i>
<i>Illustration 2 : Hygroscopicité et capillarité (source : [cahiers HYGROBA, 2013]).....</i>	<i>12</i>
<i>Illustration 3 : Schéma synoptique de la réglementation thermique des bâtiments existants en France (source : Ministère de l'Écologie, site rt-batiment.fr).....</i>	<i>18</i>
<i>Illustration 4 : Répartition des logements par période de construction, par zone climatique et par type de logement (source : d'après [Analyse parc résidentiel, 2012]).....</i>	<i>19</i>
<i>Illustration 5 : Evolution des températures extérieures et intérieures lors de deux journées types d'été pour un bâtiment en pierre de 80 cm d'épaisseur (source : [Pré-BATAN, 2007]).....</i>	<i>24</i>
<i>Illustration 6 : Équilibre hygrothermique pour le bâti ancien et le bâti contemporain (source : [fiches ATHEBA, 2011]).....</i>	<i>26</i>
<i>Illustration 7 : Fonctionnement hygrothermique d'un mur ancien rénové ou non (source : [fiches ATHEBA, 2011]).....</i>	<i>32</i>
<i>Illustration 8 : Solution d'isolation pour un mur en bon état (source : [Réhabiliter pan de bois picard, 2014])</i>	<i>34</i>
<i>Illustration 9 : Solution d'isolation pour un mur dégradé (source : [Réhabiliter pan de bois picard, 2014]).....</i>	<i>34</i>
<i>Illustration 10 : Solution d'isolation pour un mur sans remontées capillaires (source : [Tuffeau PNR, 2013]).</i>	<i>35</i>
<i>Illustration 11 : Solution d'isolation pour un mur avec remontées capillaires (source : [Tuffeau PNR, 2013]).</i>	<i>35</i>
<i>Illustration 12 : Tableau de synthèse présentant les résultats pour les murs en pan de bois et torchis (source : d'après [cahiers HYGROBA, 2013]).....</i>	<i>38</i>
<i>Illustration 13 : Valeurs-seuils en teneur en eau en pourcentage de la masse sèche pour différents isolants perméables à l'air (source : [PNR Vosges du Nord, 2014]).....</i>	<i>39</i>
<i>Illustration 14 : Conditions en température et en humidité relative favorables au développement de moisissures (source : [guide ISOLIN, 2010] d'après [logiciel WUFI, 1995]).....</i>	<i>47</i>
<i>Illustration 15 : Zone d'humidité relative optimale du point de vue hygiénique (source : energieplus-lesite.be).....</i>	<i>53</i>
<i>Illustration 16 : Les quatre zones de confort hygrothermique (source : energieplus-lesite.be).....</i>	<i>53</i>
<i>Illustration 17 : Classification du MBV (source : projet Nordtest).....</i>	<i>54</i>

Index des tableaux

Tableau 1 : Inventaire des matériaux isolants biosourcés.....	13
Tableau 2 : Caractéristiques physiques et hygrothermiques de matériaux isolants en général (source : [guide ISOLIN, 2010] et [logiciel WUFI, 1995]).....	16
Tableau 3 : Consommations énergétiques conventionnelles en énergie primaire pour le chauffage, la production d'ECS et les auxiliaires pour différentes périodes de construction et différents types de logements (source : [EPISCOPE, 2015]).....	20
Tableau 4 : Consommations énergétiques réelles en énergie primaire pour différentes périodes de construction et différents types de logements (source : [Pré-BATAN, 2007]).....	21
Tableau 5 : Consommations énergétiques réelles en énergie primaire pour différentes périodes de construction et différents types de logements (source : [BATAN, 2011]).....	22
Tableau 6 : Confort d'été dans deux bâtiments en tuffeau non rénovés (source : [Réhabilitation tuffeau, 2014]).....	25
Tableau 7 : Confort d'été dans une maison en terre-paille et une maison en brique mono-mur (source : [MaBioNat, 2016]).....	25
Tableau 8 : Caractéristiques physiques et hygrothermiques de matériaux de construction en général (source : [logiciel WUFI, 1995] et [cahiers HYGROBA, 2013]).....	27
Tableau 9 : Pathologies rencontrées dans le bâti picard en pan de bois / torchis et diagnostics (source : [Réhabiliter pan de bois picard, 2014]).....	31
Tableau 10 : Dénomination et matériaux utilisés pour chaque solution d'isolation (source : d'après [cahiers HYGROBA, 2013]).....	37
Tableau 11 : Influence de l'humidité relative sur la conductivité thermique de matériaux isolants en général (source : [logiciel WUFI, 1995]).....	44
Tableau 12 : Taux d'inconfort estival pour le 5e étage selon différents scénarios (source : [Ville de Bayonne, 2010]).....	51
Tableau 13 : Valeurs de MBV pour le panneau de fibre de bois, la brique de terre crue et le travertin (source : http://rugc15.sciencesconf.org/54493/document et http://www.theses.fr/2015LIMO0112).....	54

1. Introduction

L'objectif de cette synthèse bibliographique, réalisée à la demande de la DHUP et la DREAL Centre-Val de Loire, est de rassembler les arguments techniques et scientifiques en faveur ou en défaveur de l'utilisation des matériaux isolants biosourcés pour la rénovation du bâti ancien.

Pour ce faire, cette synthèse s'appuie sur des études (rapports, thèses, articles et actes de conférences, présentations techniques lors d'événements professionnels) validées techniquement et scientifiquement, basées sur des tests en laboratoire, des modélisations et des instrumentations de bâtiments anciens réels rénovés ou non.

Une autre particularité de la plupart de ces études est d'être accessibles sur internet. Si cette particularité limite quelque peu la portée de cette synthèse, elle garantit cependant une certaine transparence des arguments présentés, auxquels le lecteur pourra se référer au besoin.

2. Définitions et problématique

Dans le cadre de cette synthèse, il est nécessaire de poser quelques définitions, notamment en ce qui concerne les propriétés physiques et hygrothermiques des matériaux, les matériaux isolants biosourcés et le bâti ancien.

À partir de ces définitions, il sera alors possible de dégager une problématique ciblant les avantages et les inconvénients de l'utilisation des matériaux isolants biosourcés pour la rénovation du bâti ancien.

2.1. Paramètres caractérisant les propriétés physiques et hygrothermiques des matériaux

2.1.1. Propriété physique

Masse volumique

La masse volumique ρ (kg.m^{-3}) caractérise la masse du matériau par unité de volume. Plus un matériau est dense plus sa masse volumique est élevée.

2.1.2. Propriétés thermiques

Performance thermique

Conductivité thermique

La conductivité thermique λ ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) caractérise la capacité du matériau à transmettre la chaleur par conduction. Plus un matériau est isolant, plus sa conductivité thermique est faible.

Résistance thermique

La résistance thermique R ($\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$) caractérise la capacité d'une paroi à résister au passage de la chaleur. Il dépend à la fois de la conductivité thermique du matériau et de son épaisseur :

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Plus une paroi est isolante, plus sa résistance thermique est élevée.

Capacité thermique massique

La capacité thermique massique C_p ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) caractérise la capacité du matériau à stocker de la chaleur. Plus un matériau a une capacité thermique massique élevée et plus il est capable de stocker la chaleur. Ce coefficient correspond à l'énergie nécessaire à apporter pour faire monter de 1°C la température d'un kg de matériau.

Inertie thermique

L'inertie thermique est une notion complexe, qui caractérise la capacité d'une paroi à s'opposer à tout changement. On distingue en fait deux types d'inertie¹, toutes deux liées à la capacité thermique volumique et à la conductivité thermique : l'inertie par transmission et l'inertie par absorption.

La capacité thermique volumique

La capacité thermique volumique ρC_p ($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$) est la capacité d'un volume de matériau à stocker de la chaleur. Plus la capacité thermique volumique est grande, plus le matériau peut stocker de la chaleur.

L'inertie par transmission

L'inertie par transmission caractérise la capacité de la paroi à s'opposer à la transmission des variations de l'ambiance extérieure. Elle ralentit la vitesse de transmission et diminue l'amplitude d'une onde de chaleur extérieure. Ainsi, en été, un pic de chaleur à l'extérieur sera transmis à l'intérieur avec un décalage dans le temps et une température maximale moindre. Cette inertie concerne donc les parois séparant l'ambiance intérieure de l'ambiance extérieure, c'est-à-dire les parois extérieures.

L'inertie par transmission est caractérisée par la diffusivité thermique D ($m^2 \cdot s^{-1}$). Cette grandeur donne la vitesse à laquelle une paroi transmet la chaleur de part et d'autre de lui-même. L'inertie par transmission d'une paroi est d'autant plus forte que sa diffusivité est faible.

$$D = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$$

Une diffusivité faible est obtenue avec une paroi dont la conductivité thermique λ est faible et dont la capacité thermique volumique ρC_p est élevée.

Il est également possible de calculer un déphasage φ (h) à partir de l'épaisseur e (m) et de la diffusivité D ($m^2 \cdot s^{-1}$), selon la formule² suivante, qui correspond au temps mis par une onde de chaleur à traverser la paroi :

$$\varphi = \frac{0,023 \cdot e}{\sqrt{D}}$$

L'inertie par absorption

L'inertie par absorption caractérise la capacité de la paroi à s'opposer aux variations de l'ambiance intérieure. Elle amortit l'amplitude des variations de la température intérieure. Cette inertie concerne donc les parois intérieures, mais aussi l'intérieur des parois extérieures. Si la température intérieure est élevée par rapport à la température des parois intérieures ou de l'intérieur des parois extérieures, celles-ci absorbent de la chaleur jusqu'à atteindre une température d'équilibre avec l'ambiance intérieure. Si la température intérieure est faible par rapport à la température des parois intérieures ou de l'intérieur des parois extérieures, celles-ci libèrent de la chaleur jusqu'à atteindre une température d'équilibre avec l'ambiance intérieure.

L'inertie par absorption est caractérisée par l'effusivité thermique E ($J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{-1/2}$). Cette grandeur donne la capacité d'une paroi à stocker ou déstocker rapidement une grande quantité d'énergie. L'inertie par absorption d'une paroi est d'autant plus forte que son effusivité est forte.

$$E = \lambda \cdot \rho \cdot \sqrt{C_p}$$

Une effusivité forte est obtenue avec une paroi dont la conductivité thermique λ et la capacité thermique volumique ρC_p sont élevées.

1 <http://passivact.com/Infos/InfosConcepts/files/InertiesThermiques-Comprendre.html>

2 http://www.boisenergie.guidenr.fr/II_2_inertie-dephasage.php

Qu'est-ce qu'une paroi avec une forte inertie ?

Pour le confort d'été, le matériau idéal dispose d'une faible diffusivité, pour atténuer la vitesse et l'amplitude de l'onde de chaleur extérieure et d'une forte effusivité, pour absorber la chaleur de l'ambiance intérieure. Un tel matériau n'existe pas, puisque la conductivité thermique λ devrait être à la fois faible et forte. Par contre, dans une même paroi, on peut avoir différents matériaux, dont les propriétés thermiques sont différentes. Il convient alors de privilégier :

- les matériaux à faible diffusivité pour l'extérieur de la paroi extérieure ;
- les matériaux à forte effusivité pour l'intérieur de la paroi extérieure.

Par exemple, un mur en pierre (conductivité thermique λ et capacité thermique volumique ρC_p élevées donc effusivité élevée) isolé par l'extérieur (conductivité thermique λ faible donc diffusivité faible) est une paroi présentant une forte inertie, qui permet donc de garantir un bon confort d'été.

2.1.3. Propriétés hygriques

Remarque : Le terme «hygrique» se rapporte à l'eau sous forme de vapeur tandis que le terme «hydrique» se rapporte à l'eau sous forme liquide.

Hygroscopicité

L'hygroscopicité caractérise la capacité du matériau à stocker de l'humidité en son sein, lorsqu'il est mis en contact avec de l'air humide.

La courbe de sorption (ou isotherme de sorption), présentant en abscisse l'humidité relative et en ordonnée la teneur en eau, permet d'évaluer l'hygroscopicité d'un matériau. Plus l'aire sous la courbe de sorption est grande et plus le matériau est hygroscopique.

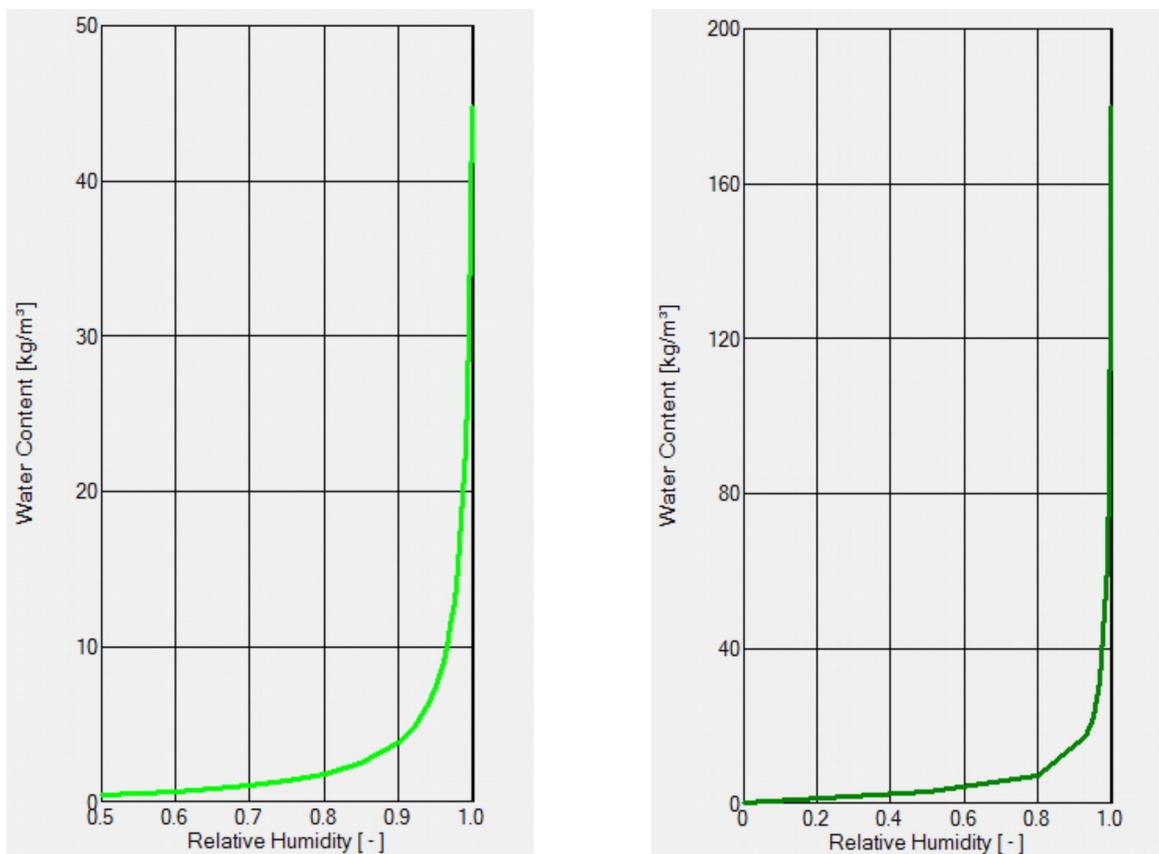


Illustration 1 : Courbes de sorption pour un matériau peu hygroscopique (à gauche, polystyrène extrudé) et pour un matériau hygroscopique (à droite, laine de bois) (source : [logiciel WUFI, 1995])

La courbe de sorption n'est cependant que rarement disponible. Aussi s'intéresse-t-on à la teneur en eau de référence w_{80} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), qui caractérise la teneur en eau d'un matériau lorsqu'il est maintenu dans une ambiance ayant une humidité relative de 80 %. Cette grandeur constitue un bon moyen d'évaluer l'hygroscopicité du matériau. Plus le w_{80} est élevé et plus le matériau est hygroscopique.

Cependant, le w_{80} peut s'avérer insuffisant pour caractériser l'hygroscopicité. Dans l'illustration 1, les deux matériaux ont un w_{80} inférieur à $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, mais l'un est considéré comme hygroscopique et l'autre pas. Dans ce cas, il peut être intéressant de comparer le w_{80} avec le w_f , qui caractérise la teneur en eau d'un matériau lorsqu'il est maintenu dans une ambiance ayant une humidité relative de 80 % : si le w_{80} et le w_f sont faibles, alors le matériau est peu hygroscopique. Dans l'illustration 1, le polystyrène extrudé (à gauche) a un w_f de $45 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ alors que la laine de bois (à droite) a un w_f de $180 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$: la laine de bois est donc plus hygroscopique que le polystyrène extrudé.

Résistance à la diffusion de vapeur

La résistance à la diffusion de vapeur est caractérisée par deux grandeurs :

- le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ (-) caractérise la capacité du matériau à empêcher son franchissement par la vapeur. Plus un matériau est étanche à la vapeur, 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 $\mu = 1$. Un matériau peu résistant à la diffusion de vapeur d'eau est parfois également qualifié de « perspirant » ;

- l'épaisseur de lame d'air équivalente S_d (m), qui se calcule à partir du coefficient de résistance à la diffusion de vapeur et de l'épaisseur du matériau e (m).

$$Sd = \mu \cdot e$$

Cela signifie qu'1 cm d'un matériau de $\mu = 10$ s'oppose au passage de la vapeur d'eau comme 10 cm d'air.

Capillarité

Le coefficient d'absorption liquide A ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$) caractérise la capacité du matériau à absorber de l'eau liquide par capillarité, 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.

Remarque : Un matériau peut être à la fois très capillaire et hygroscopique ou peu capillaire et très hygroscopique, comme le montre l'illustration 2.

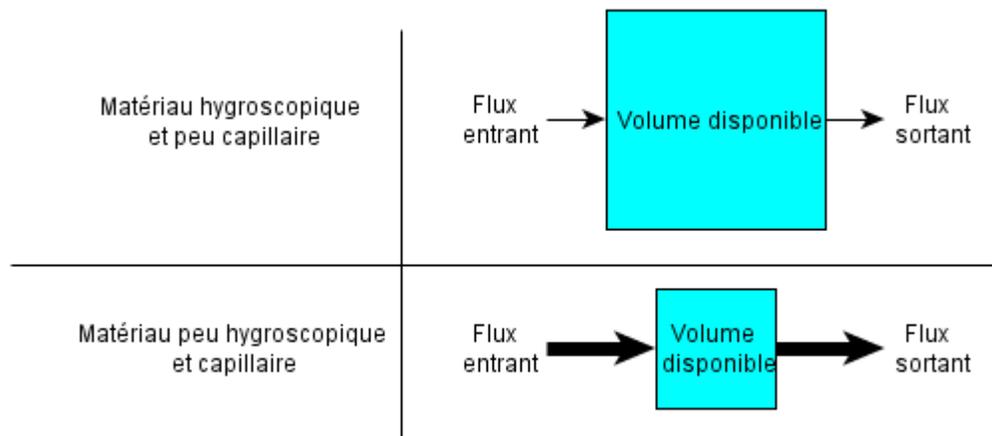


Illustration 2 : Hygroscopicité et capillarité (source : [cahiers HYGROBA, 2013])

La capillarité des matériaux dépend essentiellement de la géométrie interne à l'échelle des pores.

2.2. Les matériaux isolants biosourcés

2.2.1. Définition

Matériaux isolants biosourcés

Nous nous intéressons ici aux matériaux isolants biosourcés issus de la biomasse végétale ou animale, tels que définis dans l'article 1 de l'arrêté du 19 décembre 2012 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « bâtiment biosourcé » [Arrêté Label biosourcé, 2012].

Les principaux matériaux isolants biosourcés utilisés dans la construction sont inventoriés dans le tableau 1.

Ils comprennent à la fois :

- les isolants thermiques, dont la conductivité thermique est inférieure à $0,065 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et la résistance thermique supérieure à $5 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ (limites données par la norme NF P 75-101 d'octobre 1983);

- d'autres matériaux, dont la conductivité thermique est supérieure à $0,065 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et la résistance thermique inférieure à $5 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$, utilisés en tant que correction thermique (blocs) et/ou dont la conductivité thermique dépend de l'association avec une matrice minérale et/ou de la densité de mise en œuvre (enduits, torchis, bétons végétaux, sous-produits végétaux).

	Isolants thermiques	Autres matériaux isolants
Bois	<i>Fibre de bois</i> <i>Laine de bois</i>	<i>Copeaux de bois</i>
Ouate de cellulose (papier recyclé)	<i>Ouate de cellulose</i>	
Chanvre	<i>Laine de chanvre</i>	<i>Bloc de chanvre</i> <i>Enduit chaux-chanvre</i> <i>Béton de chanvre</i> <i>Chènevotte ou paille de chanvre</i>
Lin	<i>Laine de lin</i>	<i>Anas de lin</i>
Paille		<i>Botte de paille</i> <i>Torchis</i>
Liège	<i>Granulés expansés</i> <i>Panneau de liège expansé</i> <i>ou non</i>	
Laine de mouton	<i>Laine de mouton</i>	
Plumes de canard	<i>Panneau de plumes de canard</i>	
Fibres textiles recyclées dont majoritairement le coton	<i>Fibres textiles recyclées</i> <i>dont majoritairement le</i> <i>coton</i>	
Sous-produits du miscanthus ou d'autres plantes (lavande, épeautre, riz, coco, roseau)		<i>Sous-produits du miscanthus ou d'autres plantes</i>

Tableau 1 : Inventaire des matériaux isolants biosourcés

Remarque : Une étude réalisée par [Colinart, 2013] a montré que pour le béton de chanvre, la conductivité thermique diminuait de $0,006 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ lorsque les transferts d'humidité étaient pris en compte dans les calculs. Si pour le béton de chanvre (dont la conductivité thermique est d'environ $0,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), cette différence est minime, il peut en être autrement pour les isolants biosourcés hygroscopiques.

Enduits isolants

Il n'existe pas de définition officielle d'un enduit isolant, mais ses caractéristiques sont les suivantes :

- il s'agit d'un parement d'une épaisseur en général inférieure à 6 cm ;
- dont la conductivité thermique est comprise entre $0,045$ et $0,065 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour les marques commerciales actuellement sur le marché³.

Un enduit isolant n'est donc pas un isolant au sens de la norme NF P 75-101 d'octobre 1983 puisque sa résistance thermique ne peut dépasser les $5 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ mais constitue, tout comme le béton de chanvre ou l'enduit chaux-chanvre, ce que Jean-Pierre Oliva appelle une correction thermique dans son ouvrage L'isolation thermique écologique [Oliva, 2010].

3 On peut par exemple citer les marques commerciales HAGA Biotherm, Unilit 20, Isolteco et Diathonite Evolution.

Cependant, il ne faut pas confondre l'enduit isolant avec l'enduit chaux-chanvre ou le béton de chanvre, qui ont une conductivité thermique plus élevée, de l'ordre de 0,19 pour le premier et 0,11 W.m⁻¹.K⁻¹ pour le deuxième⁴.

Une autre différence avec l'enduit chaux-chanvre et le béton de chanvre est que l'enduit isolant ne contient pas forcément des matériaux biosourcés. Certains enduits isolants sont purement minéraux, d'autres sont à base de poudre d'algues, de liège et d'argile voire de billes de polystyrène. Dans tous les cas, ils présentent une excellente perméabilité à la vapeur d'eau ($\mu < 10$).

Les enduits isolants constituent donc une alternative intéressante à l'isolation thermique du bâti ancien (voir 3.2.1), notamment par l'extérieur, puisqu'ils sont mis en œuvre en faible épaisseur, ce qui permet de préserver l'aspect patrimonial de la façade tout en améliorant sa performance thermique.

À noter l'existence du projet IBIS – Systèmes d'Isolation Bio-sourcés innovants pour la rénovation du bâti ancien [IBIS, 2013], porté par Parex Group, entreprise spécialisée dans la chimie de la construction et les mortiers industriels et soutenu par l'ADEME. Ce projet, lancé en Octobre 2013 pour une durée de 3 ans, vise à développer une matrice minérale permettant d'intégrer tout type de granulats bio-sourcés afin d'obtenir des enduits isolants bio-sourcés durables, économiques et à faible impact environnemental.

2.2.2. Propriétés physiques, thermiques et hygriques des matériaux isolants en général

Il est possible de classer les matériaux isolants en fonction des caractéristiques physiques et hygrothermiques détaillées au paragraphe 2.1. Nous distinguerons par la suite :

- les matériaux isolants biosourcés ;
- les matériaux isolants conventionnels (laine de roche, laine minérale, verre cellulaire, polystyrène expansé, polystyrène extrudé, polyuréthane) ;
- les nouveaux matériaux isolants minéraux (mousse de pierre, silicate de calcium).

Dans le [guide ISOLIN, 2010], la cellule de recherche Architecture et Climat de l'Université catholique de Louvain (Belgique) s'est intéressée à l'isolation par l'intérieur des murs existants en briques, matériau prédominant en Belgique. Ce guide a été financé par le département Energie et Bâtiment durable du Service Public de Wallonie et a découlé sur un outil, téléchargeable en ligne, permettant d'étudier la compatibilité de différents matériaux isolants et de murs existants en briques selon plusieurs critères. Les critères concernant la compatibilité hygrothermique ont été déterminés à l'aide du logiciel de simulation hygrothermique [logiciel WUFI, 1995].

À l'occasion de ce guide, un tableau recensant la plupart des propriétés hygrothermiques de matériaux isolants a été réalisé. Il est précisé que «les valeurs des différents paramètres hygrothermiques repris ont été définies suite à une analyse des propriétés de différents produits existants, des certificats des matériaux d'isolation existants (ACERMI), de la littérature et des normes belges établissant les valeurs de calcul pour la conductivité thermique et les propriétés hygrothermiques des matériaux de construction (NBN 62-002 et NBNEN 12524).». Le w80 (permettant de caractériser l'hygroscopicité) n'ayant pas été recensé dans le guide ISOLIN, les valeurs ont été complétées par celles de la base de données des matériaux de WUFI pour des matériaux équivalents.

Dans le tableau 2, :

- une couleur de police rouge signifie qu'il s'agit d'une valeur de la base de données des matériaux de WUFI ;
- un «/» signifie que la valeur n'a pas été mesurée ou qu'elle est sans objet pour le matériau étudié ;
- une case dont le fond est jaune correspond à la plus petite valeur recensée ;
- une case dont le fond est bleu correspond à la plus grande valeur recensée.

Remarque 1 : Selon les grandeurs, une grande valeur ne correspond pas forcément à la «meilleure» valeur. Pour la conductivité thermique d'un matériau isolant, on recherche par exemple la plus petite valeur possible. Pour les autres grandeurs, cela dépend du projet de rénovation (il est parfois préférable d'avoir beaucoup ou au contraire peu d'inertie, ou d'être perméable ou au contraire étanche à l'humidité).

4 Voir par exemple la documentation technique du fabricant Tradical : <http://www.bcb-tradical.com/ressources/document/chaux-chanvre-R-lambda.pdf>

Remarque 2 : Les grandeurs thermiques sont ici données pour une teneur en eau nulle. Dans le cadre d'une certification ACERMI, la conductivité thermique « est exprimée à 10 °C, pour un isolant stabilisé à l'équilibre hygrométrique 23 °C, 50 % HR »⁵. Nous verrons dans le paragraphe 3.3.1 que dans des conditions peu humides (inférieure à 80 %), la valeur de la conductivité thermique varie de toute façon assez peu.

5 <http://www.acermi.com/doc/cahiers-techniques/ct-01-determination-conductivite-thermique.pdf>

	Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Capacité thermique massique Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Capacité thermique volumique ρCp (kJ.m ⁻³ .K ⁻¹)	Diffusivité D (*10 ⁻⁶ m ² .s ⁻¹)	Déphasage ϕ (h) pour 20 cm de paroi	Effusivité E (J.m ⁻² .K ⁻¹ .s ^{-1/2})	Hygroscopicité – teneur en eau de référence w80 (kg.m ⁻³)	Hygroscopicité – teneur en eau finale pour une humidité relative de 100 % wf (kg.m ⁻³)	Résistance à la diffusion de vapeur μ (-)	Epaisseur de lame d'air équivalente Sd (m) pour 20 cm de paroi	Capillarité – coefficient d'absorption liquide A (kg.m ⁻² .s ^{-1/2})
Panneau de laine de roche	100	0,04	1030	103	0,34	7,9	60	0,02	0,5	1	0,2	/
Panneau de laine de verre	50	0,04	1030	52	0,68	5,6	42	0,7	329	1	0,2	/
Panneau de verre cellulaire	110	0,04	1000	110	0,36	7,7	66	2	12	∞	∞	/
Panneau de polystyrène expansé	25	0,04	1450	36	0,97	4,7	36	2	45	40	8	/
Panneau de polystyrène extrudé	38	0,03	1450	55	0,58	6,0	42	2	45	80	16	/
Panneau de polyuréthane	30	0,02	1400	42	0,55	6,2	31	1,12	28	30	6	/
Panneau de silicate de calcium	270	0,07	1000	270	0,26	9,0	137	20	793	1	0,2	1,12
Panneau de mousse de pierre	115	0,04	850	98	0,41	7,2	63	8,1	197	4,1	0,82	0,01
Cellulose en vrac	40	0,04	2150	86	0,48	6,6	59	7,9	614	1	0,2	0,2
Matelas souple de cellulose	50	0,04	2150	108	0,37	7,6	66	7,9	614	1	0,2	0,2
Matelas souple de fibre de bois	75	0,04	2100	158	0,24	9,4	77	7	180	3	0,6	0,04
Panneau rigide de fibre de bois	160	0,04	2100	336	0,12	13,3	116	17,3	526	3	0,6	0,003
Panneau de liège	120	0,04	1600	192	0,21	10,0	88	2	45	5	1	/
Panneau semi-rigide de fibres de chanvre	30	0,04	1600	48	0,83	5,0	44	5	348	1	0,2	0,02
Mélange chaux-chanvre	440	0,11	1560	686	0,16	11,5	275	30	546	3	0,6	0,07

Tableau 2 : Caractéristiques physiques et hygrothermiques de matériaux isolants en général (source : [guide ISOLIN, 2010] et [logiciel WUFI, 1995])

Dans le tableau 2, on peut lire que :

- le matériau isolant présentant la masse volumique la plus faible est le polystyrène expansé et celui présentant la plus élevée est le mélange chaux-chanvre ;
- le matériau isolant présentant la conductivité thermique la plus faible est le polyuréthane et celui présentant la plus élevée est le mélange chaux-chanvre ;
- le matériau isolant présentant la capacité thermique massique la plus faible est la mousse de pierre et ceux présentant la plus élevée sont les matériaux isolants à base de cellulose, de fibre ou de laine de bois ;
- le matériau isolant présentant la capacité thermique volumique la plus faible est le polystyrène expansé et celui présentant la plus élevée est le mélange chaux-chanvre ;
- le matériau isolant présentant la diffusivité thermique la plus faible (et le déphasage pour 20 cm le plus fort) est le panneau rigide en fibre de bois et ceux présentant la plus élevée (et le déphasage pour 20 cm le plus faible) sont le polystyrène expansé et le panneau semi-rigide de fibres de chanvre. Ainsi, pour le panneau semi-rigide de fibres de bois, le déphasage pour 20 cm de paroi s'élève à 13,3 h contre 4,7 h pour le polystyrène expansé ;
- les matériaux isolants présentant l'effusivité thermique la plus faible sont le polystyrène expansé et le polyuréthane et celui présentant la plus élevée est le mélange chaux-chanvre ;
- en comparant le w80 et le wf, on peut affirmer avec certitude que le panneau de laine de roche, le panneau de verre cellulaire, le panneau de polystyrène expansé, le panneau de polystyrène extrudé, le panneau de polyuréthane, et le panneau de liège sont peu hygroscopiques (car leur w80 et leur wf sont faibles).

Pour les autres matériaux isolants, le w80 est faible et le wf est élevé. Comme précisé dans le paragraphe 2.1.3, cela ne signifie pas forcément que ces matériaux sont hygroscopiques. Il est donc nécessaire d'analyser plus en détail les courbes de sorption de ces matériaux. On constate ainsi que ces derniers sont tous hygroscopiques, sauf le panneau de laine de verre, qui ne le devient qu'à des humidités relatives très élevées (la courbe de sorption dépasse les 45 kg/m⁻³ à partir d'une humidité relative supérieure à 99,95%).

- les matériaux isolants présentant la résistance à la diffusion de vapeur (et l'épaisseur de lame d'air équivalente pour 20 cm de paroi) la plus faible sont la laine de roche, la laine de verre, le silicate de calcium, la cellulose en vrac, le panneau semi-rigide de fibre de chanvre et la cellulose en matelas souple ;
- le matériau isolant présentant la capillarité la plus élevée est le silicate de calcium. On peut supposer que la capillarité n'a pas été mesurée pour les matériaux conventionnels et le liège, car ils sont réputés non capillaires (voir même note de bas de page que précédemment), ce qui les place donc parmi les matériaux présentant la capillarité la plus faible.

On peut aussi constater que :

- le mélange chaux-chanvre se distingue des autres matériaux isolants du fait de son effusivité thermique élevée et de sa diffusivité thermique faible. Il en découle qu'il s'agit du matériau dont l'inertie par transmission et par absorption est la plus forte. À l'inverse, le polystyrène expansé est le matériau dont l'inertie par transmission et par absorption est la plus faible ;
- La laine de roche et la laine de verre sont peu hygroscopiques ;
- Les matériaux isolants de type laine ont une résistance à la diffusion de vapeur très faible ;
- Les matériaux isolants conventionnels et le liège ne sont pas capillaires ;
- Le panneau rigide de fibre de bois est hygroscopique mais peu capillaire ;
- Les nouveaux matériaux isolants minéraux sont hygroscopiques et peu résistants à la diffusion de vapeur.

2.3. Le bâti ancien

2.3.1. Définition

Parmi les bâtiments existants, il était d'usage de distinguer ceux construits avant 1975, c'est-à-dire avant le premier choc pétrolier de 1973 et la mise en place de la première réglementation thermique française en 1974, et ceux construits après 1975, ces derniers étant considérés comme plus performants, thermiquement parlant, que les précédents.

Cependant, une grande variabilité des performances thermiques des bâtiments construits avant 1975 a été constatée. Il s'avère, notamment, que les bâtiments construits selon un mode constructif traditionnel ne sont pas comparables avec ceux construits selon un mode constructif plus industrialisé. Il convient donc de définir une distinction supplémentaire dans la catégorie des bâtiments construits avant 1975, pour laquelle la date charnière se situe aux alentours de 1948.

En effet, la fin de la Seconde Guerre Mondiale marque le début de l'industrialisation et de la systématisation des procédés de construction : de nouveaux matériaux apparaissent (béton, acier), tout comme de nouvelles techniques (systèmes poteaux-poutres) et de nouvelles contraintes (urgence de la reconstruction et disparition des savoir-faire due aux pertes humaines subies pendant les deux guerres mondiales) [fiches ATHEBA, 2011].

Les bâtiments construits avant 1948 et basés sur un mode constructif traditionnel, constitue le bâti ancien.

Remarque : à noter que cette distinction apparaît clairement dans la réglementation thermique des bâtiments existants en vigueur actuellement (2016), puisque sa déclinaison globale (nécessitant des calculs effectués par un logiciel de simulation thermique réglementaire) ne s'applique qu'aux bâtiments construits après 1948 (du fait de l'inadaptation de ces logiciels aux spécificités du bâti ancien), comme le montre l'illustration 3.

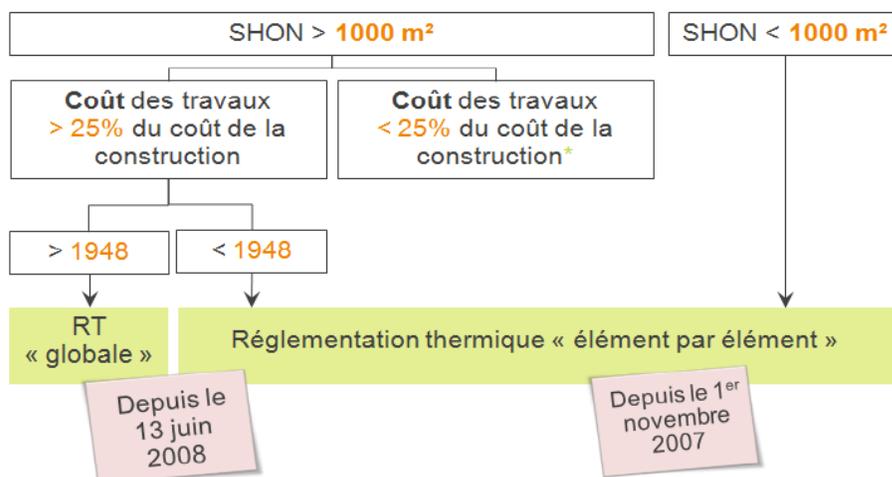


Illustration 3 : Schéma synoptique de la réglementation thermique des bâtiments existants en France (source : Ministère de l'Écologie, site rt-batiment.fr)

2.3.2. Les enjeux de la rénovation du bâti ancien

Le bâti ancien représente plus d'un tiers du parc français en surface

Un tiers du parc existant est constitué par le bâti ancien.

Dans [Analyse parc résidentiel, 2012], l'AQC, à partir de nombreuses références bibliographiques, a étudié la composition du parc existant français. Dans l'illustration 4, sur les 16 millions de maisons individuelles

recensées, 7 millions ont été construites avant 1948 (44 %). De même, sur les 13 millions de logements collectifs recensés, 4,5 millions ont été construits avant 1948 (35 %). Ces chiffres varient cependant en fonction des zones climatiques⁶.

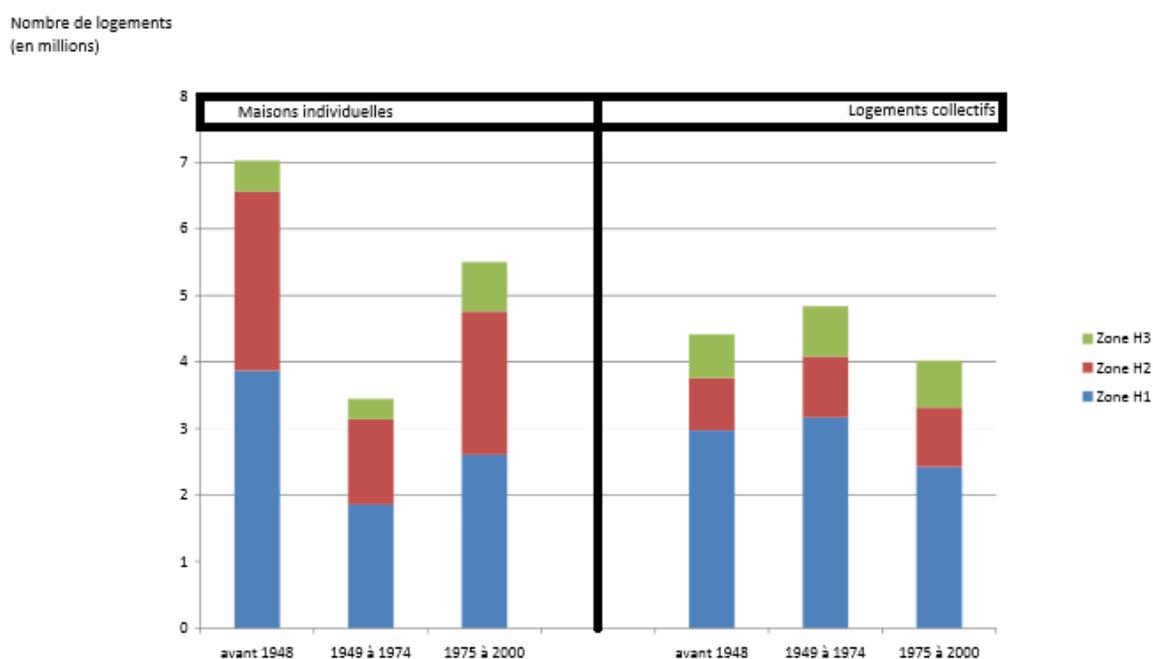


Illustration 4 : Répartition des logements par période de construction, par zone climatique et par type de logement (source : d'après [Analyse parc résidentiel, 2012])

En théorie, le bâti ancien consomme plus d'énergie que les autres bâtiments

Les consommations énergétiques des logements construits avant 1948 ne sont pas négligeables d'après les calculs conventionnels.

Dans [EPISCOPE, 2015], une étude typologique du parc existant a été réalisée par le bureau d'études Pouget Consultants sur 40 bâtiments construits d'avant 1915 jusqu'à 2012 (pour le bâti ancien, en brique et moellon, en brique et pierre de taille, en pierre de taille et pan de bois), dans le cadre du projet européen EPISCOPE. Elle présente les consommations conventionnelles (calculées à partir d'un ensemble d'hypothèses proche de celles du DPE) d'énergie primaire⁷ pour le chauffage, la production d'ECS et les auxiliaires (chauffage, ECS, ventilation), ajustées par rapport aux consommations observées et pour le nord de la France (zone climatique H1a), suivantes :

- 6 Les zones climatiques sont définies pour les besoins des réglementations thermiques françaises. Elles permettent d'associer à chaque logement un climat moyen caractéristique de la zone où il se situe. Pour faire simple, la zone climatique la plus froide est la zone H1 (Nord et Est de la France), la plus chaude la H3 (pourtour méditerranéen).
- 7 L'énergie finale (EF) est l'énergie consommée par le consommateur tandis que l'énergie primaire (EP) comprend également l'énergie qu'il a fallu pour produire, transformer et acheminer l'énergie consommée jusqu'au consommateur. Par convention, le coefficient d'énergie primaire est en France de 2,58 pour l'électricité et de 1 pour toutes les autres énergies. En effet, pour 2,58 kWhEF d'énergie électrique produite à la centrale, seul 1 kWhEF arrive au consommateur du fait des pertes induites par l'effet Joule dans les lignes à haute tension. Ce coefficient varie d'un pays à l'autre du fait des caractéristiques de production d'énergie propre à chaque pays.



	Maisons individuelles			Immeubles collectifs		
	Avant 1948	De 1949 à 1975	De 1975 à 2000	Avant 1948	De 1949 à 1975	De 1975 à 2000
Consommations énergétiques conventionnelles en énergie primaire de chauffage, de production d'ECS et des auxiliaires (kWhEP.m ⁻² .an ⁻¹)	579 (G)	476 (G)	201 (D)	444 (F)	315 (E)	196 (D)
Effectif	4	4	6	4	4	6
Minimum	557	426	73	308	239	113
Maximum	600	599	325	633	433	345

Tableau 3 : Consommations énergétiques conventionnelles en énergie primaire pour le chauffage, la production d'ECS et les auxiliaires pour différentes périodes de construction et différents types de logements (source : [EPISCOPE, 2015])

Remarque : dans [EPISCOPE, 2015], l'utilisation d'une étiquette-énergie pour illustrer ces consommations énergétiques ne correspond pas à l'utilisation réglementaire. En effet, le DPE s'intéresse aux consommations énergétiques de chauffage et de production d'ECS uniquement. D'autre part, pour les bâtiments d'avant 1948, le DPE se calcule réglementairement à partir des factures et non par calcul conventionnel.

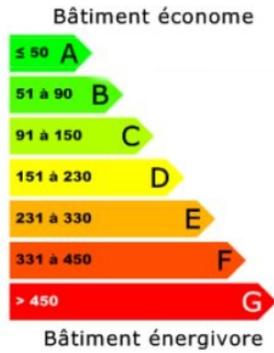
Les maisons individuelles anciennes sont donc les plus énergivores et correspondent à peu près à une étiquette-énergie de classe G. À noter que la moyenne française se situe à 272 kWhEP.m⁻².an⁻¹, soit une étiquette-énergie de classe E⁸.

En pratique, le bâti ancien consomme beaucoup moins

Lorsque l'on s'intéresse aux factures, le bâti ancien consomme moins que ce qui est prévu par les calculs conventionnels.

Ainsi dans [Pré-BATAN, 2007], des consommations énergétiques conventionnelles ont été calculées à partir des logiciels de simulation réglementaire du DPE de l'époque et ont été comparées aux consommations énergétiques réelles, grâce aux factures, pour 10 bâtiments anciens (en brique, en tuffeau, en pisé, en pierre calcaire, en granite, en pan de bois / torchis et en pierre non définie) et une maison individuelle construite en 2003. Ces bâtiments sont répartis dans toute la France. Les résultats obtenus sont les suivants :

8 http://www.anah.fr/fileadmin/anah/Mediatheque/Publications/Les_etudes/rapport_performances_energetiques.pdf



	Maisons individuelles		Immeubles collectifs
	Avant 1948	2003	Avant 1948
Consommations énergétiques réelles en énergie primaire de chauffage et de production d'ECS (kWhEP.m ⁻² .an ⁻¹)	139 (C)	110 (C)	176 (D)
Effectif	5	1	5
Minimum	107	/	120
Maximum	205	/	187

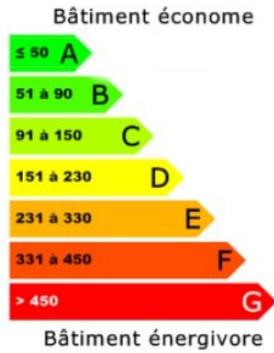
Tableau 4 : Consommations énergétiques réelles en énergie primaire pour différentes périodes de construction et différents types de logements (source : [Pré-BATAN, 2007])

Les calculs conventionnels réalisés sur ces mêmes bâtiments ont montré des écarts allant de 54 à 536 % avec les factures, ce qui signifie donc que les consommations énergétiques conventionnelles sont beaucoup plus élevées que les consommations énergétiques réelles.

Cette étude a permis de valider le recours aux factures pour l'établissement du DPE⁹ pour le bâti ancien mais a aussi permis d'identifier les spécificités à l'origine de ces écarts (voir 2.3.3).

Les consommations énergétiques réelles en énergie primaire de chauffage et de production d'ECS obtenue dans [BATAN, 2011] grâce, cette fois-ci, à des mesures, a donné des résultats similaires pour les immeubles collectifs, mais plus faibles pour les maisons individuelles :

9 <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000025509925&categorieLien=id>



	Maisons individuelles	Immeubles collectifs
	Avant 1948	Avant 1948
Consommations énergétiques réelles en énergie primaire de chauffage et de production d'ECS (kWhEP.m ⁻² .an ⁻¹)	40 (A)	158 (D)
Effectif	2	10
Minimum	30	63
Maximum	49	275

Tableau 5 : Consommations énergétiques réelles en énergie primaire pour différentes périodes de construction et différents types de logements (source : [BATAN, 2011])

Conclusion

Même si les consommations énergétiques du bâti ancien font aujourd'hui encore débat¹⁰, il est nécessaire de rénover le bâti ancien, ne serait-ce que parce qu'il représente une part non négligeable de la surface du parc existant.

¹⁰ <http://www.cler.org/Projet-de-loi-transition>

« Projet de loi transition énergétique et rénovation des bâtiments anciens : en finir avec les contre-vérités ! »

2.3.3. Les spécificités du bâti ancien

Une diversité des matériaux et des mises en œuvre

En France, les murs anciens sont très divers. De plus, selon les régions, les matériaux et la catégorie sociale du maître d'ouvrage [Graulière, 2005], l'épaisseur caractéristique mise en œuvre :

- varie de 20 à 70 cm pour les pierres (granite, calcaire, grès schiste, meulières, etc.);
- varie de 30 à 40 cm pour la brique (de porosité variable avant la normalisation du processus de fabrication à la fin du XIXe siècle);
- varie de 20 à 50 cm pour la terre crue (pisé, bauge, adobe, etc.);
- est d'environ 20 cm pour le pan de bois (remplissage torchis ou briques).

A cela s'ajoute, pour chaque mur ancien, une proportion variable de mortier, de tout-venant ou de pan de bois en fonction des assemblages.

Enfin, la composition physico-chimique des matériaux constitutifs des murs anciens varie fortement en fonction des régions et un torchis normand n'est par exemple pas identique à un torchis alsacien.

Sous la dénomination de « murs anciens », se cache donc une diversité de matériaux, d'épaisseurs et d'assemblages particulièrement importants.

Une perméabilité à l'air très élevée

La perméabilité à l'air du bâti ancien est très élevée, notamment par rapport aux standards actuels.

Dans [BATAN, 2011], des tests de perméabilité à l'air ont été réalisés sur un panel de 14 bâtiments anciens (en calcaire, en pan de bois / torchis, en pan de bois / brique, en calcaire extra-dur, en brique, en granit, en calcaire tendre, en pisé, en adobe) non rénovés thermiquement et ont montré que l'indice de perméabilité à l'air $Q_{4Pa, surf}$ était compris entre 0,77 et 5,6 $m^3.m^{-2}.h^{-1}$ pour une moyenne de 2,5 $m^3.m^{-2}.h^{-1}$. Rappelons qu'une maison individuelle construite aujourd'hui en 2015 doit respecter un $Q_{4Pa, surf}$ de 0,6 $m^3.m^{-2}.h^{-1}$ pour être réglementaire¹¹.

Une étude menée sur un panel de 7 bâtiments anciens (en brique, en grès, en pan de bois / torchis et en pan de bois / brique) en Alsace [Habitat ancien en Alsace, 2015] a également montré que les défauts d'étanchéité à l'air représentent entre 20 et 50 % des déperditions de chaleur. Pour les maisons individuelles du panel, les défauts d'étanchéité à l'air constituent même le premier poste de déperditions, devant les murs.

Bien qu'une part non négligeable des déperditions thermiques se font par les défauts d'étanchéité à l'air du logement, ces derniers contribuent, en l'absence de ventilation contrôlée, permanente et continue, à la ventilation hygiénique du logement.

11 <http://www.rt-batiment.fr/batiments-neufs/etancheite-a-lair/etancheite-a-lair-des-batiments.html>

Un confort d'été bon, mais variable en fonction des murs anciens

Dans [Pré-BATAN, 2007], des capteurs de températures ont été posés à l'intérieur et à l'extérieur du panel de 11 bâtiments¹², dont 10 bâtiments anciens. Pendant la période estivale, la différence entre la température maximale intérieure et la température maximale extérieure avoisinait les 7 °C pour 4 bâtiments anciens sur 10 et était de 4,5 °C pour le bâtiment construit en 2003.

Dans cette même étude, le bon confort d'été est expliqué par plusieurs autres spécificités du bâti ancien :

- une conception bioclimatique du bâtiment.

L'adaptation du bâti ancien, surtout rural, au climat local (vents, ensoleillement, zone de montagne ou de littoral, etc.), au relief proche (flanc de colline, etc.) et aux masques solaires (végétation, autres bâtiments, etc.) se traduit par des dispositions architecturales telles que la présence d'espaces-tampons (combles et caves), de larges baies vitrées au sud, protégées en été par des débords de toiture importants et une végétation caduque, voire des façades enterrées à flanc de colline. De plus, ces bâtiments sont en général traversants. Tout ceci donne au bâti ancien la possibilité de gérer au mieux la chaleur provenant de l'extérieur ;

- un comportement bioclimatique des occupants ;

En général, les occupants du bâti ancien connaissent les bonnes pratiques en matière de gestion du confort d'été et s'emploient à fermer les volets aux heures les plus chaudes et à ventiler le bâtiment la nuit de manière à évacuer la chaleur accumulée durant la journée ;

- des murs anciens présentant une forte inertie par transmission.

L'étude met en avant le cas particulier d'un bâtiment en pierre de 80 cm d'épaisseur. Sur l'illustration 5, les températures extérieures et intérieures ont été mesurées durant deux journées d'été. L'amortissement de la température extérieure atteint 19 %¹³ et son déphasage 8h.

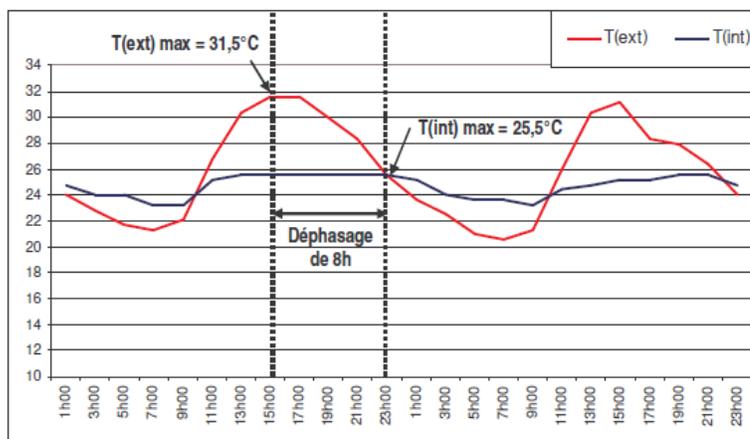


Illustration 5 : Evolution des températures extérieures et intérieures lors de deux journées types d'été pour un bâtiment en pierre de 80 cm d'épaisseur (source : [Pré-BATAN, 2007])

Un bon confort thermique a également été mis en avant par une étude réalisée par le CETE de l'Ouest [Réhabilitation tuffeau, 2014] sur des pièces non rénovées de bâtiments en tuffeau (dont l'épaisseur des murs varie de 22 à 65 cm), sans pour autant être aussi bon que ci-dessus, comme le montre le tableau 6. Les auteurs expliquent ce résultat contre-intuitif par le fait qu'un des facteurs influençant le confort d'été est la perméabilité à l'air du bâtiment : le bâti ancien étant en général très perméable à l'air, de l'air chaud extérieur peut s'infiltrer au travers des défauts d'étanchéité et dégrader le confort thermique.

12 cf. 2.3.2

13 L'amortissement se calcule en prenant le quotient de la différence entre la température maximale extérieure (31,5 °C) et la température maximale intérieure (25,5 °C) sur la température maximale extérieure.

	Bâtiments en tuffeau non rénové
Amortissement (%)	9
Déphasage (h)	1,75

Tableau 6 : Confort d'été dans deux bâtiments en tuffeau non rénovés (source : [Réhabilitation tuffeau, 2014])

Enfin, dans [BATAN, 2011], un déphasage minimal de 2 h a systématiquement été observé et 86 % des occupants considéreraient leur logement confortable en été.

A titre de comparaison, une étude menée par le Cerema Sud-Ouest dans le cadre du projet MaBioNat [MaBioNat, 2016] (article intitulé Comparaison des performances hygrothermiques réelles d'une maison en terre-paille et d'une maison en briques monomurs), a comparé l'amortissement et le déphasage au milieu des parois pour une maison en terre-paille (30 cm d'épaisseur) et une maison en briques monomur (37,5 cm). On constate, dans le tableau 7, que la maison en brique monomur présente un meilleur amortissement et un meilleur déphasage que la maison en terre-paille, pour laquelle les résultats obtenus sont néanmoins bons et proches de ceux obtenus pour la maison en brique monomur.

	Maison en terre-paille	Maison en brique monomur
Amortissement au milieu de la paroi (%)	79	89
Déphasage au milieu de la paroi (h)	9	9,75

Tableau 7 : Confort d'été dans une maison en terre-paille et une maison en brique mono-mur (source : [MaBioNat, 2016])

Remarque : Le projet MaBioNat, rassemblant l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar), le Cerema et d'autres organismes publics, écoles et universités, a notamment pour objectif d'évaluer la durabilité des matériaux biosourcés en fonction de l'environnement dans lequel ils sont utilisés. Une synthèse a été publiée en mai 2016 [MaBioNat, 2016] et rassemble des articles résumés de tous les travaux réalisés dans le cadre du projet.

Au final, le confort d'été du bâti ancien est correct pour les bâtiments en pierre, sans pour autant atteindre les performances de la brique mono-mur ou du terre-paille. Pour les autres murs anciens (brique, terre crue, pan de bois, etc...), le confort d'été serait moins bon, mais la conception bioclimatique du bâtiment ou le comportement bioclimatique des occupants pourra empêcher sa dégradation. En général, on peut supposer que la faible étanchéité à l'air des bâtiments anciens fait que le confort d'été est plus faible que ce qu'il devrait être.

Une sensibilité à l'humidité plutôt élevée, variable en fonction des murs anciens

Le tableau 8 présente les propriétés physiques, thermiques et hygriques de matériaux constitutifs de murs, aussi bien anciens que contemporains (béton, brique monomur, enduit ciment).

En ce qui concerne les trois propriétés hygriques, à savoir l'hygroscopicité, la résistance à la diffusion de vapeur et la capillarité, on constate :

- le béton est plus résistant à la diffusion de vapeur et beaucoup moins capillaire (hors pierre calcaire dure) que les matériaux anciens ;
- la brique monomur a des propriétés hygriques proches de celles du bâti ancien (hors pierre calcaire dure et grès)
- l'enduit ciment est légèrement plus résistant à la diffusion de vapeur mais beaucoup moins capillaire que les matériaux anciens (hors pierre calcaire dure).

Cette analyse montre que globalement, les murs contemporains sont plus résistants à la diffusion de vapeur et moins capillaires que les murs anciens et justifie donc l'approche simplifiée que l'on peut par exemple retrouver dans les fiches ATHEBA (illustration 6).

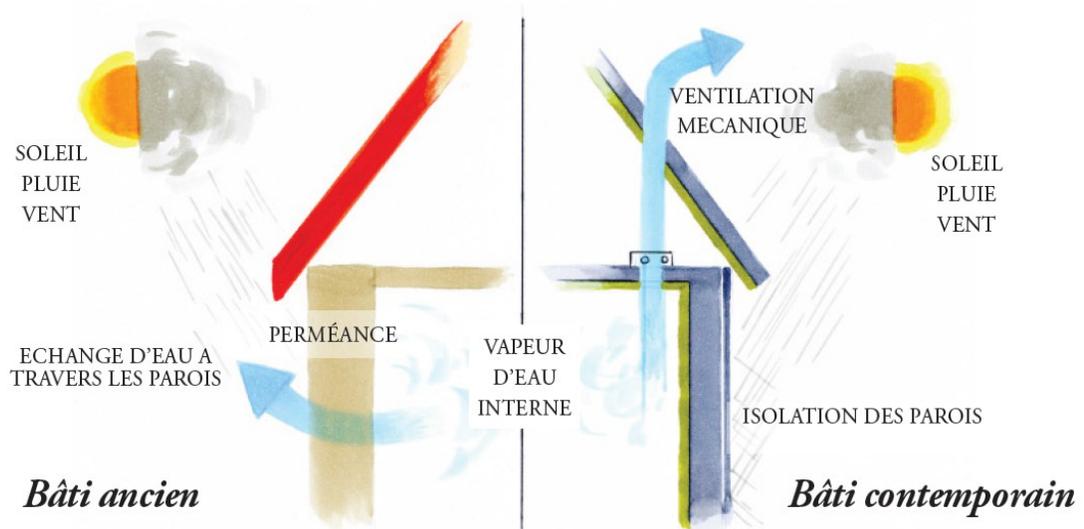


Illustration 6 : Équilibre hygrothermique pour le bâti ancien et le bâti contemporain
(source : [fiches ATHEBA, 2011])

Dans les deux cas, les parois sont en équilibre hygrothermique avec leur environnement : ce qui rentre doit pouvoir sortir. En l'occurrence, dans les murs contemporains, rien ne rentre et rien ne sort.

Les murs anciens sont donc, de ce point de vue, plus sensibles à l'humidité.

Conclusion

Les spécificités du bâti ancien sont donc :

- une diversité de matériaux et de mises en œuvre ;
- une perméabilité à l'air très élevée ;
- un confort d'été plutôt bon, variable en fonction des murs anciens ;
- une sensibilité à l'humidité plutôt élevée, variable également en fonction des murs anciens.

Tout ceci contribue à faire du bâti ancien un objet d'étude à part entière, séparé des bâtiments plus récents dont les spécificités sont différentes.

La rénovation thermique du bâti ancien devra donc s'attacher à améliorer ses points faibles et à maintenir ses points forts.

2.3.4. Propriétés physiques, thermiques et hygriques des matériaux de construction en général

Nous avons pu voir au paragraphe 2.3.3 que les matériaux anciens étaient très divers.

Le tableau 8 présente les propriétés physiques, thermiques et hygriques de matériaux de construction en général, anciens et modernes. Les données sont issues de mesures en laboratoire (pisé) et de la base de données des matériaux de WUFI. Elles sont données à titre indicatif, étant donné que la composition physico-chimique des matériaux anciens dépend fortement des régions desquelles ils proviennent.

	Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Capacité thermique massique Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Capacité thermique volumique ρC_p (kJ.m ⁻³ .K ⁻¹)	Diffusivité D (*10 ⁻⁶ m ² .s ⁻¹)	Déphasage ϕ (h) pour 20 cm de paroi	Effusivité E (J.m ⁻² .K ⁻¹ .s ^{-1/2})	Hygroscopicité – teneur en eau de référence w80 (kg.m ⁻³)	Hygroscopicité – teneur en eau finale pour une humidité relative de 100 % wf (kg.m ⁻³)	Résistance à la diffusion de vapeur μ (-)	Epaisseur de lame d'air équivalente Sd (m) pour 20 cm de paroi	Capillarité – coefficient d'absorption liquide A (kg.m ⁻² .s ^{-1/2})
Tuffeau	1450	0,34	925	1341	0,25	9,2	673	76	259	10	2	0,1
Grès	2150	2,3	850	1828	1,26	4,1	2050	3,4	110	32	6,4	0,05
Pierre calcaire dure	2440	2,25	850	2074	1,08	4,4	2160	2,5	75	140	28	/
Pisé	1620	0,59	830	1345	0,44	6,9	891	28	390	10,3	2,1	0,62
Torchis	1514	0,59	1000	1514	0,39	7,4	945	19	294	11	2,2	0,05
Brique ancienne	1800	0,6	850	1530	0,39	7,4	958	4,5	230	15	3	0,36
Mortier à la chaux hydraulique	1785	0,7	850	1517	0,46	6,8	1031	6,5	248	15	3	0,15
Béton	2300	1,6	850	1955	0,82	5,1	1769	85	150	180	36	0,003
Brique monomur	1650	0,6	850	1403	0,43	7	917	9,2	370	10	2	0,4
Enduit ciment	2000	1,2	850	1700	0,71	5,5	1428	35	280	25	5	0,01

Tableau 8 : Caractéristiques physiques et hygrothermiques de matériaux de construction en général (source : [logiciel WUFI, 1995] et [cahiers HYGROBA, 2013])

Dans le tableau 8, on peut lire que :

- le matériau de construction présentant la masse volumique la plus faible est le tuffeau et celui présentant la plus élevée est la pierre calcaire dure ;
- le matériau de construction présentant la conductivité thermique la plus faible est le tuffeau et ceux présentant la plus élevée sont le grès et la pierre calcaire dure ;
- le matériau de construction présentant la capacité thermique massique la plus faible est le pisé et celui présentant la plus élevée est la pierre calcaire dure ;
- le matériau de construction présentant la capacité thermique volumique la plus faible est le tuffeau et celui présentant la plus élevée est la pierre calcaire dure ;
- le matériau de construction présentant la diffusivité thermique la plus faible (et le déphasage pour 20 cm le plus fort) est le tuffeau et celui présentant la plus élevée (et le déphasage pour 20 cm le plus faible) est le grès ;
- le matériau de construction présentant l'effusivité thermique la plus faible le tuffeau et celui présentant la plus élevée est la pierre calcaire dure ;
- en comparant le w_{80} et le w_f , on peut affirmer avec certitude que la pierre calcaire dure est peu hygroscopique (car son w_{80} et son w_f sont faibles).

Pour les autres matériaux de construction, le w_{80} est faible et le w_f est élevé. Comme précisé dans le paragraphe 2.1.3, cela ne signifie pas forcément que ces matériaux sont hygroscopiques. Il est donc nécessaire d'analyser plus en détail les courbes de sorption de ces matériaux. On constate ainsi que ces derniers sont tous hygroscopiques, sauf le grès, qui ne le devient qu'à des humidités relatives très élevées (la courbe de sorption dépasse les 30 kg/m^3 à partir d'une humidité relative supérieure à 99,9%).

- le matériau de construction présentant la résistance à la diffusion de vapeur (et l'épaisseur de lame d'air équivalente pour 20 cm) la plus faible est le tuffeau et celui présentant la plus élevée est le béton ;
- le matériau de construction présentant la capillarité la plus faible est le béton et celui présentant la plus élevée est le pisé.

On peut aussi constater que :

- bien que le tuffeau et la pierre calcaire dure soient tous les deux des pierres calcaires, leurs propriétés physiques, thermiques et hygriques sont très éloignées ;
- le grès et la pierre calcaire dure présentent des conductivités thermiques bien plus élevées que les autres matériaux de construction ;
- le béton présente des propriétés hygrothermiques particulières puisqu'il est hygroscopique, mais très peu capillaire et très résistant à la diffusion de vapeur ;
- le grès, la pierre calcaire dure et le béton se distinguent de par leurs capacités thermiques volumiques et leurs effusivités thermiques élevées. Ils présentent donc une forte inertie par absorption. À l'inverse, le tuffeau se distingue de par sa diffusivité thermique faible et présente donc une forte inertie par transmission.

2.3.5. Comparaison entre les propriétés des matériaux isolants et des matériaux de construction

En comparant les tableaux 2 et 8, on peut également en déduire les observations suivantes :

- pour 20 cm de paroi, l'inertie par transmission des matériaux isolants est comparable à celles des matériaux de construction. Par contre, ces derniers sont parfois mis en œuvre en des épaisseurs bien plus élevées, notamment pour les pierres. L'inertie par transmission des matériaux isolants mis en œuvre est donc plus faible que celle de certains matériaux de construction mis en œuvre ;
- l'effusivité des matériaux de construction est beaucoup plus élevée que celle des matériaux isolants. Les matériaux de construction présentent donc une inertie par absorption beaucoup plus élevée que les matériaux isolants.
- Les matériaux anciens (hors tuffeau et pierre calcaire dure) ont des hygroscopicités et des capillarités équivalentes à celles des matériaux isolants biosourcés (hors liège) ;
- Les matériaux anciens (hors grès, pierre calcaire dure et grès) ont des résistances à la diffusion de vapeur plus fortes que les matériaux isolants biosourcés et conventionnels de type laine.

2.4. Problématique

La question à laquelle cette synthèse bibliographique vise à apporter des réponses est : quels sont les avantages et inconvénients de l'utilisation de matériaux isolants biosourcés pour la rénovation thermique du bâti ancien ?

Pour répondre à cette question, nous écarterons d'emblée les avantages et inconvénients non spécifiques à la rénovation du bâti ancien, c'est-à-dire qui se posent également pour la construction neuve ou la rénovation des bâtiments non anciens. Nous n'aborderons donc pas dans cette synthèse :

- l'impact environnemental : énergie grise et ACV ;
- l'impact sanitaire : émissions chimiques ;
- l'impact sur le confort : confort hygrothermique ;
- l'impact sur la sécurité : résistance au feu ;
- les propriétés thermiques : conductivité thermique ;
- les propriétés mécaniques : résistance à la compression et tassement ;
- les propriétés acoustiques : affaiblissement acoustique.

Au final, les avantages et inconvénients de l'utilisation de matériaux isolants biosourcés pour la rénovation thermique du bâti ancien sont liées à deux spécificités énoncées au paragraphe 2.3.3 , à savoir sa sensibilité à l'humidité et son bon confort d'été.

NB : Cette synthèse n'abordera pas le remplacement du remplissage d'un pan de bois ancien, car cela s'apparente à une construction neuve. Elle s'intéresse, de plus, uniquement à la rénovation thermique des murs anciens, et non des planchers anciens.

3. Le bâti ancien, les matériaux isolants et l'humidité

Dans un premier temps, la question posée est de savoir si l'isolation thermique peut provoquer un excès d'humidité et si certains murs anciens et / ou matériaux isolants sont plus sensibles à l'isolation que d'autres.

Dans un deuxième temps, nous supposerons que l'excès d'humidité est bien présent et nous étudierons ces effets sur les matériaux isolants, à savoir la dégradation des propriétés des matériaux isolants et le risque de développement de moisissures en leur sein.

3.1. Les pathologies du bâtiment liées à un excès d'humidité

3.1.1. Généralités

[Berger, 2012] regroupe les pathologies du bâtiment liées à un excès d'humidité en 4 catégories :

- Les altérations dues à l'action propre de l'humidité :
 - Modification des propriétés mécaniques ;
 - Modification des propriétés thermiques ;
 - Variations dimensionnelles ;
- Les altérations dont l'humidité est le vecteur :
 - Le gel des matériaux ;
 - La cristallisation des sels ;
- Les altérations se développant en milieu humide :
 - Les dégradations biologiques ;
 - La corrosion des métaux ;
- La dégradation des ambiances intérieures :
 - La dégradation du confort hygrothermique ;
 - La dégradation de la qualité de l'air.

La plupart de ces pathologies peuvent concerner aussi bien les matériaux isolants que les matériaux constitutifs des murs.

3.1.2. Les pathologies dues à la rénovation thermique

La rénovation thermique, de par sa capacité à modifier l'équilibre hygrothermique des murs anciens, peut provoquer des pathologies. Ces pathologies ne sont pas systématiques et un certain nombre de conditions doivent être réunies pour qu'elles surviennent (orientation des façades, conditions climatiques, type de matériaux isolants, type de murs anciens, présence ou absence de ventilation à l'intérieur du logement, production de vapeur à l'intérieur du logement, etc.).

On trouve assez peu de retours d'expériences sur les pathologies dues à la rénovation thermique, appuyés par un diagnostic réalisé par des experts. Dans le cadre de son étude sur la rénovation thermique du pan de bois picard [Réhabiliter pan de bois picard, 2014], le CoDEM Picardie, centre de transfert de technologie spécialisé dans la Construction Durable et les Eco-Matériaux créé fin 2007 sous l'impulsion du Conseil Régional de Picardie, a cependant diagnostiqué quelques pathologies dues à la mise en place de polystyrène à l'intérieur et d'enduit au ciment à l'extérieur, recensés dans le tableau 9.



Peinture épaisse, mur enduit de ciment et isolation par l'intérieur avec pare-vapeur ont eu raison de la sablière.



1) Un mur en pan de bois, victime d'un mauvais usage de matériaux contemporains (Polystyrène et enduit ciment)



Un petit défaut de gouttière et un mur recouvert d'un enduit au ciment, ont provoqué un pourrissement des bois de structure qui ne pouvaient plus sécher.

Tableau 9 : Pathologies rencontrées dans le bâti picard en pan de bois / torchis et diagnostics (source : [Réhabiliter pan de bois picard, 2014])

3.2. La rénovation thermique du bâti ancien et l'excès d'humidité

3.2.1. Communications grand public généralistes

La rénovation thermique du bâti ancien fait l'objet de nombreuses communications grand public généralistes, qui mettent parfois en avant des pratiques contradictoires en termes de compatibilité hygrothermique.

Fiches ATHEBA

Les [fiches ATHEBA, 2011] conseillent de proscrire les matériaux isolants très résistants à la diffusion de vapeur ou les pare-vapeur en isolation par l'intérieur, car ils favorisent l'accumulation d'humidité dans les murs anciens, comme le montre l'illustration 7.

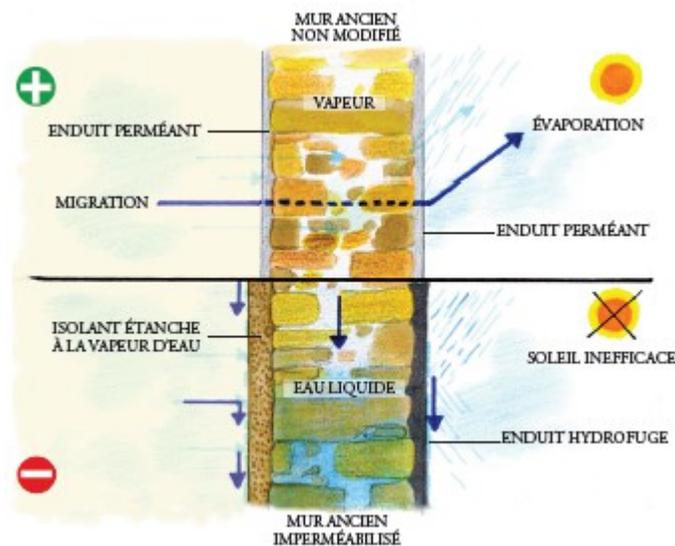


Illustration 7 : Fonctionnement hygrothermique d'un mur ancien rénové ou non (source : [fiches ATHEBA, 2011])

Formations et conférences de Samuel Courgey

Les formations et conférences de Samuel Courgey [Courgey, 2010] (co-auteur de l'ouvrage L'isolation thermique écologique [Oliva, 2010] avec Jean-Pierre Oliva) conseillent de recourir :

- à des parements extérieurs très peu résistants à la diffusion de vapeur et capillaires ;
- à des parements intérieurs modérément résistants à la diffusion de vapeur, grâce à des frein-vapeurs ou des frein-vapeurs hygro-variables ;
- à des matériaux isolants permettant d'assurer la continuité capillaire avec le mur ancien, notamment en isolation par l'intérieur ;
- à des épaisseurs d'isolation par l'intérieur comprises entre 8 à 12 cm.

Guide ABC

Le guide Amélioration thermique des bâtiments collectifs construits de 1870 à 1974 [guide ABC, 2011], qui conseille :

- de s'assurer de la protection extérieure de la paroi contre l'humidité et les pluies battantes ;
- de mettre en place soit un parement peu résistant à la diffusion de vapeur avec une perméabilité croissante vers l'extérieur, soit de proposer un parement très résistant à la diffusion de vapeur avec pare-vapeur du côté intérieur en respectant la règle dite du « 5 pour 1 »¹⁴, soit d'utiliser des matériaux auto-réglables (frein-vapeur hygro-variables, matériaux capillaires).

Analyse critique

On peut noter plusieurs points communs entre ces communications. Elles préconisent systématiquement :

- de traiter les problèmes d'humidité déjà présents ;
- de mettre en place une ventilation permettant d'évacuer l'humidité générée à l'intérieur du bâtiment ;
- de garantir une excellente étanchéité à l'air des parements intérieurs.

Cependant, les fiches ATHEBA et Samuel Courgey s'opposent au guide ABC sur un point :

- ces premiers considèrent que la présence d'humidité est inévitable dans le bâti ancien rénové, que ce soit naturellement (pluie battante, remontées capillaires) ou accidentellement (infiltrations d'eau de pluie, défauts de mise en œuvre des matériaux isolants).
- Le guide ABC, quant à lui, considère dans un premier temps qu'il est nécessaire de limiter la présence d'humidité par le recours à des parements extérieurs peu capillaires. Il envisage aussi l'utilisation de parements intérieurs résistants à la diffusion de vapeur selon les cas.

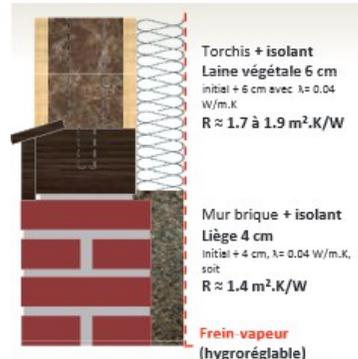
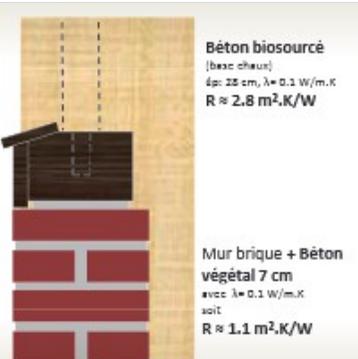
3.2.2. Communications grand public appliquées

A côté des communications grand public généralistes, on en retrouve des plus appliquées, qui proposent des études de cas. Ces communications appliquées se basent sur des retours d'expériences (ou des simulations hygrothermiques dynamiques sans qu'elles soient cependant mentionnées) et préconisent des matériaux isolants permettant de limiter l'excès d'humidité dans le bâti ancien.

14 La résistance à la diffusion de vapeur du parement intérieur doit être 5 fois supérieure à celle du parement extérieur. Elle incite donc à mettre en place des pare-vapeur du côté intérieur. Cette règle apparaît notamment dans la norme anglaise BS 5250, à la page 15 : http://www.commercialconnections.co.uk/Content/building_standards/BS5250%20-%20Code%20of%20Practise%20for%20condensation%20in%20buildings.pdf

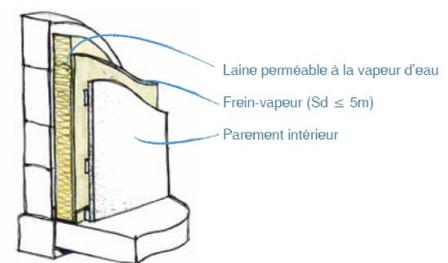
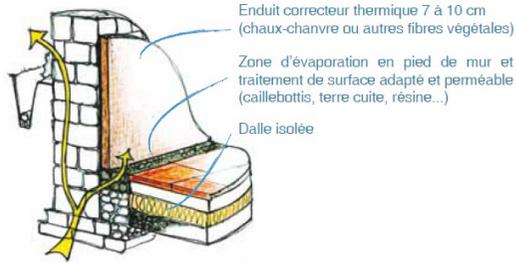
Réhabiliter le bâti picard en pan de bois

Ce guide, [Réhabiliter pan de bois picard, 2014], a été réalisé par le CoDEM Picardie (cf. p.14).

Spécificités du bâtiment	Type de mur ancien	Type de technique	Type de matériau isolant	Autres matériaux isolants préconisés	Illustrations
Murs en bon état, sans pathologies liées à l'humidité, avec enduit extérieur et finition peu résistants à la diffusion de vapeur	22 cm de brique en partie basse	Correction thermique / Isolation thermique par l'intérieur	4 cm de liège	<ul style="list-style-type: none"> 8 cm de mousse de pierre 12 cm de liège 5 cm d'enduit chaux-chaivre 	 <p>Torchis + isolant Laine végétale 6 cm initial + 6 cm avec $\lambda = 0,04$ W/m.K $R \approx 1,7$ à $1,9$ m².K/W</p> <p>Mur brique + isolant Liège 4 cm initial + 4 cm, $\lambda = 0,04$ W/m.K, soit $R \approx 1,4$ m².K/W</p> <p>Frein-vapeur (hygroréglable)</p>
	17 cm de torchis en partie haute Enduit de finition à l'intérieur Enduit de finition à l'extérieur		6 cm de laine végétale Frein-vapeur hygro-variable	<ul style="list-style-type: none"> 10 cm de mousse de pierre 14 cm de fibre de bois 7 cm d'enduit chaux-chaivre 	
Murs dégradés	22 cm de brique en partie basse	Correction thermique / Isolation thermique par l'intérieur	7 cm de béton végétal	<ul style="list-style-type: none"> 6 cm de mousse de pierre 	 <p>Béton biosourcé (base chaux) épais: 28 cm, $\lambda = 0,1$ W/m.K $R \approx 2,8$ m².K/W</p> <p>Mur brique + Béton végétal 7 cm avec $\lambda = 0,1$ W/m.K soit $R \approx 1,1$ m².K/W</p>
	17 cm de torchis en partie haute Enduit de finition à l'intérieur Enduit de finition à l'extérieur		28 cm de béton végétal	<ul style="list-style-type: none"> 6 cm de panneau de fibre de bois support de l'enduit extérieur et 11 cm d'isolant insufflé 	

Un bâti en tuffeau pour aujourd'hui et demain

Ce guide, [Tuffeau PNR, 2013], a été réalisé par le Parc Naturel Régional Loire Anjou Touraine et un groupe de travail composé, entre autres, du CETE de l'Ouest.

Spécificités du bâtiment	Type de mur ancien	Type de technique	Type de matériau isolant	Autres matériaux isolants préconisés	Illustrations
<i>Mur sec, sans remontées capillaires (mur étage)</i>	<i>Mur en tuffeau</i>	<i>Correction thermique / Isolation thermique par l'intérieur</i>	<i>Laine perméable à la vapeur d'eau Frein-vapeur Parement intérieur</i>	<ul style="list-style-type: none"> <i>Laine végétale dense (>50 kg/m³), frein-vapeur hygro-variable et parement respirant</i> 	 <p>Illustration 10 : Solution d'isolation pour un mur sans remontées capillaires (source : [Tuffeau PNR, 2013])</p>
<i>Mur avec remontées capillaires (mur soubassement)</i>			<i>7 à 10 cm d'enduit chaux-chanvre Zone d'évaporation en pied de mur intérieur</i>	<ul style="list-style-type: none"> <i>Brique de chanvre ou béton chaux-chanvre, enduit de chaux ou de terre</i> 	 <p>Illustration 11 : Solution d'isolation pour un mur avec remontées capillaires (source : [Tuffeau PNR, 2013])</p>

Analyse critique

Les matériaux isolants biosourcés et les nouveaux matériaux isolants sont mis en avant dans ces communications : ils sont capables de limiter l'excès d'humidité dans le bâti ancien en rénovation. Cependant, le fait qu'aucun matériau isolant conventionnel n'ait été cité n'est pas une raison suffisante pour affirmer qu'ils provoquent des pathologies liées à l'humidité.

3.2.3. Travaux scientifiques

L'influence de l'isolation sur le comportement hygrothermique du bâti ancien a été étudié dans plusieurs travaux scientifiques. Ces travaux sont principalement basés sur des simulations hygrothermiques dynamiques réalisées à l'aide du [logiciel WUFI, 1995] et permettent de comparer plusieurs matériaux isolants entre eux, aussi bien les biosourcés que les conventionnels.

Une autre approche envisageable sont les travaux basés sur un retour d'expérience instrumenté, basé sur des études de cas avant et après rénovation énergétique, or aucune référence diffusable n'a pu être trouvée. On peut cependant noter l'existence du projet de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) «Humibatex – Comment prédire les désordres causés par l'humidité? Quelles solutions techniques pour rénover le bâti existant», qui regroupe le Cerema (Est, Ouest et Centre-Est), des laboratoires de recherche et des industriels et qui a débuté en 2012 et est toujours en cours. Ce projet pourra peut-être apporter la preuve que dans certains cas, certains matériaux isolants sont inadaptés à la rénovation du bâti ancien et pourquoi.

Les cahiers HYGROBA : étude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes

Les [cahiers HYGROBA, 2013] ont pour objectif d'étudier la réhabilitation hygrothermique de quatre types de murs anciens (pan de bois et torchis, pisé, brique ancienne, pierre calcaire dure) par huit types de solutions d'isolation, détaillés dans le tableau 10.

Les simulations hygrothermiques dynamiques ont été réalisées avec le [logiciel WUFI, 1995].

La particularité de l'étude réside dans les deux premiers critères d'évaluation du risque hygrothermique :

- le critère « quantité d'eau » caractérise la teneur en eau dans les matériaux anciens ;
- le critère « capacité de séchage » caractérise la teneur en eau dans les matériaux anciens en présence d'infiltrations d'humidité, pouvant être dues aux remontées capillaires, à des infiltrations d'eau de pluie ou à de la condensation interne. En isolation par l'intérieur, de la condensation interne peut par exemple apparaître lorsque la membrane gérant l'apport de vapeur présente des défauts d'étanchéité, liés soit à une mauvaise mise en œuvre (absence de recouvrement des lés, absence de continuité de la membrane entre le mur et le plancher, etc.), soit à des travaux intervenant après la mise en œuvre de la membrane (raccordement électrique, percement après l'accrochage d'un tableau, etc.).

Selon qu'il considère qu'il y a un risque d'infiltrations d'humidité ou non, le maître d'ouvrage peut donc se référer à l'un ou l'autre des critères pour décider quel isolant il va choisir. L'illustration 12 présente les résultats pour les murs en pan de bois et torchis. La couleur verte pour les deux premiers critères correspond à un risque hygrothermique faible tandis que la couleur rouge correspond à un risque hygrothermique élevé.

Type de technique	Dénomination de la solution d'isolation		Côté extérieur	Côté intérieur
Isolation par l'extérieur	EE	<ul style="list-style-type: none"> « étanche à l'humidité » côté extérieur « étanche à l'humidité » côté intérieur 	<ul style="list-style-type: none"> enduit organique 12 cm de polystyrène expansé 	<ul style="list-style-type: none"> plaque de plâtre papier peint vinyle
	EP	<ul style="list-style-type: none"> « étanche à l'humidité » côté extérieur « perméable à l'humidité » côté intérieur 		<ul style="list-style-type: none"> enduit à la chaux
	PE	<ul style="list-style-type: none"> « perméable à l'humidité » côté extérieur « étanche à l'humidité » côté intérieur 	<ul style="list-style-type: none"> enduit à la chaux 12 cm de fibre de bois 	<ul style="list-style-type: none"> plaque de plâtre papier peint vinyle
	PP	<ul style="list-style-type: none"> « perméable à l'humidité » côté extérieur « perméable à l'humidité » côté intérieur 		<ul style="list-style-type: none"> enduit à la chaux
Isolation par l'intérieur	EE	<ul style="list-style-type: none"> « étanche à l'humidité » côté extérieur « étanche à l'humidité » côté intérieur 	<ul style="list-style-type: none"> enduit au ciment 	<ul style="list-style-type: none"> 12 cm de laine minérale pare-vapeur plaque de plâtre papier peint vinyle
	EP	<ul style="list-style-type: none"> « étanche à l'humidité » côté extérieur « perméable à l'humidité » côté intérieur 		<ul style="list-style-type: none"> 12 cm de ouate de cellulose frein-vapeur hygro-variable plaque de plâtre
	PE	<ul style="list-style-type: none"> « perméable à l'humidité » côté extérieur « étanche à l'humidité » côté intérieur 	<ul style="list-style-type: none"> enduit à la chaux 	<ul style="list-style-type: none"> 12 cm de laine minérale pare-vapeur plaque de plâtre papier peint vinyle
	PP	<ul style="list-style-type: none"> « perméable à l'humidité » côté extérieur « perméable à l'humidité » côté intérieur 		<ul style="list-style-type: none"> 12 cm de ouate de cellulose frein-vapeur hygro-variable plaque de plâtre

Tableau 10 : Dénomination et matériaux utilisés pour chaque solution d'isolation (source : d'après [cahiers HYGROBA, 2013])

Murs en pan de bois et torchis		Quantité d'eau	Capacité de séchage	Condensation	Inertie thermique	Résistance thermique
Base	Base	Vert	Vert	Vert	● ● ○	Rouge
Isolation par l'extérieur	E-E	Vert	Rouge	Vert	● ● ○	Vert
	E-P	Vert	Rouge	Vert	● ● ○	Vert
	P-E	Vert	Vert	Vert	● ● ○	Vert
	P-P	Vert	Vert	Vert	● ● ○	Vert
Isolation par l'intérieur	E-E	Vert	Rouge	Vert	○ ○ ○	Vert
	E-P	Jaune	Jaune	Jaune	○ ○ ○	Vert
	P-E	Vert	Jaune	Vert	○ ○ ○	Vert
	P-P	Vert	Jaune	Vert	○ ○ ○	Vert

Illustration 12 : Tableau de synthèse présentant les résultats pour les murs en pan de bois et torchis (source : d'après [cahiers HYGROBA, 2013])

Les résultats montrent en particulier que :

- en isolation par l'extérieur :
 - lorsqu'il n'y a pas d'infiltrations d'humidité et quel que soit le type de mur ancien étudié, toutes les solutions d'isolation étudiées donnent de bons résultats
 - lorsqu'il y a des infiltrations d'humidité et quel que soit le type de mur ancien étudié, la solution d'isolation EE (enduit organique, polystyrène du côté extérieur / plaque de plâtre, papier peint vinyle du côté intérieur) présente un risque hygrothermique élevé tandis que la solution d'isolation PP (enduit à la chaux, fibre de bois du côté extérieur / enduit à la chaux du côté intérieur) présente un risque faible.
- en isolation par l'intérieur :
 - lorsqu'il n'y a pas d'infiltrations d'humidité, les résultats dépendent fortement du type de mur ancien étudié. Pour le pan de bois par exemple, la solution PE (enduit à la chaux du côté extérieur / laine minérale, pare-vapeur, plaque de plâtre, papier peint vinyle du côté intérieur) présente un risque hygrothermique modéré tandis que les autres solutions d'isolation n'en présentent pas. Pour la pierre calcaire dure, la solution EE (enduit au ciment du côté extérieur / laine minérale, pare-vapeur, plaque de plâtre, papier peint vinyle du côté intérieur) présente un risque élevé tandis qu'il est modéré pour les autres solutions d'isolation.
 - lorsqu'il y a des infiltrations d'humidité, aucune solution d'isolation ne présente un risque hygrothermique faible. Pour la pierre calcaire dure, elles présentent même toutes un risque élevé.

De manière générale, :

- les solutions d'isolation privilégiant les enduits à la chaux et les isolants biosourcés sont celles qui présentent le risque hygrothermique le plus faible, sauf pour la pierre calcaire dure, où toutes les solutions présentent des risques élevés lorsqu'il y a des infiltrations d'humidité.
- les résultats sont très variables en fonction du type de murs anciens étudié et lorsqu'il y a des infiltrations d'humidité, il n'y a pas forcément de préférence pour les isolants biosourcés.

Guide de l'éco-rénovation du Parc Naturel Régional des Vosges du Nord

Le Parc Naturel Régional des Vosges du Nord a réalisé en 2014 une étude sur l'éco-rénovation de deux typologies très présentes sur son territoire, à savoir la maison-bloc en pierre et la maison-cour à pan de bois [PNR Vosges du Nord, 2014].

L'épaisseur, ainsi que le type d'isolant à privilégier a été déterminé à l'aide du [logiciel WUFI, 1995]. Les types d'isolants étudiés sont :

- la mousse de pierre (assimilée au béton cellulaire ou au panneau de silicate de calcium);
- les isolants perméables à l'air (laine minérale; laine de bois; ouate de cellulose; laine de mouton) mis en œuvre avec différentes membranes gérant l'apport de vapeur (pare-vapeur d'un Sd de 50 m, posé parfaitement; idem posé imparfaitement; frein-vapeur d'un Sd de 4 m; frein-vapeur hygro-variable). Les propriétés hygrothermiques de ces isolants sont prises égales à celle de la laine de lin.
- le polystyrène expansé.

Les isolants perméables à l'air sont différenciés par les valeurs-seuils pour lesquelles il y a un risque hygrothermique. Ces valeurs-seuils sont données en teneur en eau en pourcentage de masse sèche, c'est-à-dire la teneur en eau par rapport à la masse volumique ρ du matériau. L'illustration 13 montre que la valeur-seuil pour la laine minérale est de 13 % tandis qu'elle est de 30 % pour la laine de mouton.

Critères - valeurs seuils	
Matériau	% de la masse sèche
Bois	20% de la masse sèche
Multipor	23% de la masse sèche
Laine minérale	13% de la masse sèche
Laine de bois	18% de la masse sèche
Cellulose	15% de la masse sèche
Laine de mouton	30% de la masse sèche

Illustration 13 : Valeurs-seuils en teneur en eau en pourcentage de la masse sèche pour différents isolants perméables à l'air (source : [PNR Vosges du Nord, 2014])

Remarque : Cette étude présente une limite importante : elle considère que les isolants perméables à l'air se comportent tous de la même façon par rapport à l'humidité. Or, ce n'est pas vrai, car certains d'entre eux (laine de bois, ouate de cellulose, laine de mouton, laine de lin) sont plus capillaires et plus hygroscopiques que d'autres (laine minérale). De ce fait, les valeurs-seuils en teneur en eau des isolants perméables à l'air, capillaires et hygroscopiques seront atteintes pour des humidités relatives beaucoup plus faibles que pour la laine minérale, ce qui n'apparaît pas dans l'étude. En effet, pour une humidité relative de 80 %, la teneur en eau en pourcentage de la masse sèche est de :

- 3 % pour la laine minérale ($\rho = 21 \text{ kg.m}^{-3}$ et $w_{80} = 0,7 \text{ kg.m}^{-3}$) ;
- 16 % pour la ouate de cellulose ($\rho = 50 \text{ kg.m}^{-3}$ et $w_{80} = 7,9 \text{ kg.m}^{-3}$) pour la ouate de cellulose.

En utilisant la laine de lin comme représentant des isolants perméables à l'air, les courbes de teneur en eau en pourcentage de masse sèche dépassent souvent les 13 %, ce qui élimine de fait la laine de verre. En réalité, les courbes de teneur en eau en pourcentage de masse sèche pour la laine de verre dépasse probablement rarement cette valeur-seuil et la laine de verre peut donc être utilisée dans certains cas où elle a pourtant été éliminée dans cette étude.

Cette limite montre bien que la complexité des phénomènes à l'origine des transferts d'humidité dans les parois.

Pan de bois et torchis

L'influence de l'isolant choisi sur les remontées capillaires n'a pas été étudiée dans ce cas.

Les premiers résultats, obtenus pour une épaisseur d'isolants de 10 cm, ont montré que :

- pour les poutres en bois encastés dans le mur :

- le risque de détérioration est important en isolation par l'intérieur, quel que soit l'isolant choisi. La mousse de pierre présente cependant le risque le plus faible, suivi des isolants perméable à l'air et enfin du polystyrène ;
- pour les isolants :
 - la laine de mouton et la laine de bois sont les isolants perméables à l'air les plus pérennes, puisque leurs teneurs en eau en pourcentage de masse sèche ne dépassent jamais les 30 % et les 18 % pendant seulement quelques semaines par an.
 - un frein-vapeur hygro-variable donne de meilleurs résultats qu'un frein-vapeur ou un pare-vapeur.
 - la mousse de pierre est également à privilégier, puisque sa teneur en eau en pourcentage de masse sèche n'atteint jamais les 23 %.
- pour le torchis :
 - quel que soit l'isolant choisi, la teneur en eau dans le torchis ne semble pas augmenter de manière significative.

Les résultats finaux conseillent :

- de ne pas dépasser les 10 cm d'isolation, quel que soit l'isolant choisi ;
- de privilégier la mousse de pierre, la laine de mouton ou la laine de bois ;
- qu'au vu des risques induits par l'isolation par l'intérieur, il pourrait être intéressant de remplacer le torchis par de la mousse de pierre. L'isolation par l'intérieur, limitée à une épaisseur de 10 cm, ne présente alors plus aucun risque (notamment au niveau des poutres) et ce, quel que soit l'isolant.

Grès

L'influence de l'isolant choisi sur l'humidité dans les poutres en bois encastrées dans le mur n'a pas été étudiée dans ce cas.

Les premiers résultats, obtenus pour une épaisseur d'isolants de 10 cm, ont montré que :

- pour les isolants :
 - aucune des valeurs-seuil n'est dépassée pour les isolants perméables à l'air lorsque l'on s'intéresse à l'ensemble de l'isolant ;
 - lorsque l'on s'intéresse à la couche limite entre l'isolant et le grès, les valeurs – seuils dans l'isolant sont dépassées pour tous les isolants perméables à l'air, sauf la laine de mouton.
 - un frein-vapeur hygro-variable donne de meilleurs résultats qu'un frein-vapeur ou un pare-vapeur.
- pour le grès :
 - quel que soit l'isolant choisi, la teneur en eau dans le torchis ne semble pas augmenter de manière significative.
- en cas de remontées capillaires, le polystyrène donne de plus mauvais résultats que la mousse de pierre.

Les résultats finaux conseillent :

- de ne pas dépasser les 15 cm d'isolation pour la laine de mouton, 12 cm pour la mousse de pierre, 8 cm pour la laine de bois et 6 cm pour la ouate de cellulose.

Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines

Le [guide ISOLIN, 2010] s'intéresse à l'isolation par l'intérieur des murs existants en briques pleines. Le guide est assorti d'un outil développé sous Excel, permettant d'étudier différentes solutions d'isolation.

Plusieurs paramètres ont été étudiés à l'aide du [logiciel WUFI, 1995] :

- quatre type de briques : de très absorbante à très peu absorbante ;

- cinq matériaux isolants : la laine minérale, le polystyrène extrudé, la ouate de cellulose, le silicate de calcium et le chaux-chanvre ;
- cinq niveaux du coefficient de transmission thermique U ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), qui correspondent à des épaisseurs de matériaux isolants différents : 0,15, 0,25, 0,45, 0,65 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Un U de 0,15 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ correspond par exemple à 24 cm de laine minérale ou 18 cm de polystyrène extrudé. D'autre part, les U de 0,15 et 0,25 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ne respectent pas la réglementation belge en matière de rénovation.
- Différentes membranes gérant l'apport de vapeur en fonction de l'isolant : sans membrane, frein-vapeur d'un S_d de 2 m et pare-vapeur d'un S_d de 100 m pour la laine minérale. Pour la ouate de cellulose, s'ajoutent également deux frein-vapeur hygro-variables, l'un d'un S_d moyen de 2 m et l'autre de 10 m. Toutes ces membranes sont supposées avoir été mises en œuvre parfaitement.
- Quatre type de revêtement extérieur, à savoir aucun revêtement, un enduit à la chaux, un hydrofuge de surface ou une peinture étanche à l'eau et à la vapeur d'eau.
- Deux types de climat intérieur, normal et humide ;
- Deux orientations, nord (le plus critique en ce qui concerne les transferts de chaleur) et sud-ouest (le plus critique en ce qui concerne les transferts d'humidité, la pluie étant majoritairement orientée sud-ouest pour le climat extérieur choisi) ;

L'étude de l'ensemble de ces paramètres correspond à environ 7000 simulations. Les résultats présentés dans le guide ne concernent qu'une partie de ces simulations, à savoir une orientation nord, un climat intérieur humide, une brique moyennement absorbante, un U de 0,35 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, pas de revêtement extérieur, un frein-vapeur d'un S_d de 2 m pour la laine minérale et un frein-vapeur hygro-variable d'un S_d moyen de 2 m pour la ouate de cellulose.

Les résultats les plus importants sont les suivants :

- pour la ouate de cellulose et la laine minérale, une membrane gérant l'apport de vapeur est nécessaire, surtout pour un climat intérieur humide ;
- un frein-vapeur hygro-variable est préférable à un frein-vapeur ;
- le polystyrène extrudé est validé dans de nombreuses simulations, du fait de sa faible perméabilité à la vapeur ;
- le silicate de calcium est validé dans de nombreuses simulations, du fait de sa grande capillarité ;
- le chaux-chanvre ne semble convenir que pour des parois faiblement exposées aux intempéries, en veillant à ce qu'il ne soit pas exposé à un climat intérieur trop humide ;
- plus l'isolant ou la membrane sont fermés à la vapeur, plus il est nécessaire de protéger le mur des intempéries.

Evaluation des risques de pathologies liées à l'humidité au niveau des poutres encastrées dans un mur isolé par l'intérieur

Cette étude, réalisée dans le cadre du programme Règle de l'Art Grenelle de l'Environnement (RAGE) en 2013 a pour objectif d'étudier les risques de pathologies liées à l'humidité au niveau des poutres encastrées dans un mur isolé par l'intérieur [Pathologies poutres ITI, 2013]. Quatre configurations ont été étudiées :

- un mur en brique apparente, isolé par 16 cm de laine minérale revêtue de papier kraft, plaque de plâtre comme revêtement intérieur et poutre en chêne encastrée ;
- un mur en brique apparente, isolé par 16 cm de polystyrène expansé, plaque de plâtre comme revêtement intérieur et poutre en chêne encastrée ;
- un mur en brique apparente, isolé par 16 cm de laine minérale revêtue de papier kraft, plaque de plâtre comme revêtement intérieur et poutre en acier encastrée ;
- un mur en pierre calcaire tendre, isolé par 16 cm de laine minérale revêtue de papier kraft, plaque de plâtre comme revêtement intérieur et poutre en chêne encastrée.

Les simulations ont été réalisées à l'aide du [logiciel WUFI, 1995] et considèrent qu'il n'y a pas d'infiltrations d'eau dans le mur, excepté celles dues à la pluie et que l'étanchéité à l'air a été bien réalisée.

Les résultats ont montré que :

- en partie courante, à partir du moment où la capillarité de la brique et de la pierre calcaire tendre était inférieure à une certaine valeur (respectivement $0,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2}$ et $0,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2}$), il n'y avait aucun risque de pathologie à craindre ;
- au niveau des poutres, et pour des capillarités inférieures à $0,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2}$ pour la brique et la pierre calcaire tendre, il n'y a pas non plus de risque de pathologie à craindre.

Analyse critique

Les travaux scientifiques présentent une importante diversité de résultats. La compatibilité entre un matériau ancien et un matériau isolant dépend de nombreux paramètres, qui peuvent se résumer en un seul : la présence d'un excès d'humidité dans le mur.

La présence d'un excès d'humidité dans le mur dépend en effet de :

- la qualité de la mise en œuvre (cf. [cahiers HYGROBA, 2013]) ;
- la présence de remontées capillaires (cf. [PNR Vosges du Nord, 2014]) ;
- la possibilité de séchage du mur vers l'intérieur ou vers l'extérieur (cf. [cahiers HYGROBA, 2013], [guide ISOLIN, 2010])
- la protection du mur contre la pluie (cf. [guide ISOLIN, 2010], [Pathologies poutres ITI, 2013]).

Dans le cas général, il semblerait qu'en présence d'humidité dans le mur, les matériaux isolants biosourcés soient à privilégier par rapport aux matériaux isolants conventionnels, car ils permettent une meilleure évacuation de cette humidité. Par contre, en l'absence d'humidité dans le mur, les matériaux isolants conventionnels ne présentent pas plus de risques que les matériaux isolants biosourcés.

Des contre-exemples viennent cependant souligner que chaque projet de rénovation d'un mur ancien est unique et doit être étudié au cas par cas : le chaux-chanvre n'est par exemple pas recommandé en milieu trop humide (cf. [guide ISOLIN, 2010]) et en cas de mise en œuvre imparfaite, l'isolation d'un mur en pierre dure calcaire donne d'aussi mauvais résultats pour la laine minérale que pour la ouate de cellulose (cf. [cahiers HYGROBA, 2013]).

3.3. Les effets de l'excès d'humidité sur les matériaux isolants

3.3.1. La dégradation des propriétés des matériaux isolants

L'augmentation de la conductivité thermique et le tassement sont les deux dégradations auxquelles on peut penser lorsqu'il y a un excès d'humidité. Ces deux dégradations sont liées, notamment dans le cas des laines isolantes : la laine isolante se tasse du fait de sa masse, augmentée par l'humidité ; l'humidité fait augmenter la conductivité thermique mais le tassement également, puisqu'il réduit le volume d'air contenu dans la laine isolante, qui lui confère une partie de son pouvoir isolant.

Le tassement est très peu étudié. Nous étudierons donc plus spécifiquement l'augmentation de la conductivité thermique, qui peut tout à fait être temporaire.

Dans un second temps, nous étudierons le vieillissement des matériaux isolants, à savoir la dégradation permanente de leurs propriétés, notamment la conductivité thermique.

Lien entre humidité et conductivité thermique

L'humidité fait augmenter la conductivité thermique de tout matériau. Les pores d'un matériau isolant poreux sont remplis d'air et c'est ce qui lui procure son pouvoir isolant. En effet, la conductivité thermique de l'air est de $0,026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Au fur et à mesure que l'eau remplace l'air dans les pores du matériau, le pouvoir isolant baisse, car la conductivité thermique de l'eau n'est que de $0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

La base de données des matériaux du [logiciel WUFI, 1995] donne le coefficient b permettant de calculer l'augmentation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau du matériau. Ce coefficient est relié à la conductivité thermique à 0 % d'humidité relative λ_0 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), à la teneur en eau w ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) et à la masse volumique ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) par la formule suivante :

$$\lambda(w) = \lambda_0 + \frac{\lambda_0 \cdot b}{\rho} \cdot w$$

Nous avons donc calculé la conductivité thermique correspondant à des humidités relatives de 80 % et de 100 % et la différence avec la conductivité thermique à 0 % d'humidité relative, qui est la conductivité thermique indiquée dans les tableaux du chapitre 2.

Remarque : Le coefficient b du panneau de silicate de calcium est le plus élevé du tableau 11, suivi du coefficient b du béton de chanvre. Cependant, le coefficient b du panneau de silicate de calcium nous paraît excessif, puisqu'il est quasiment 500 fois plus élevé que celui du béton de chanvre : il est donc écarté de l'analyse qui suit.

Dans le tableau 11, on constate que :

- l'humidité n'a pas d'influence sur la conductivité thermique des matériaux isolants conventionnels et le liège, sauf en ce qui concerne la laine de verre. Son coefficient b est certes le plus faible de tous les isolants, mais à peine plus faible que celui des laines isolantes biosourcées. La laine de verre étant, de plus, hygroscopique pour une humidité relative de 100 %, sa conductivité thermique en sera affectée : dans ces conditions, elle est multipliée par 2,6 et la laine de verre ne peut plus être considérée comme un isolant ($\lambda < 0,065 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).
- pour les laines isolantes biosourcées et la mousse de pierre, on observe une augmentation de la conductivité thermique de 5 à 10 % au passage d'une humidité relative de 0 à 80 %, ce qui correspond au maximum à une augmentation de $0,004 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.
- le mélange chaux-chanvre est le matériau isolant dont la conductivité augmente le plus au passage d'une humidité relative de 0 à 80 %. Elle passe de $0,110$ à $0,135 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, ce qui correspond à une augmentation de 23 %.
- pour une humidité relative de 100 %, les conductivités thermiques des laines isolantes biosourcées et de la mousse de pierre sont multipliées par 1,2 pour le panneau souple en fibre de bois à 7,6 pour la cellulose en vrac. Plus aucun de ces matériaux ne peut être considéré comme un isolant ($\lambda < 0,065 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).
- pour une humidité relative de 100 %, la conductivité thermique du mélange chaux-chanvre est multiplié par 4,1.

Les résultats montrent donc que dans la situation extrême d'une humidité relative de 100 %, consécutive à une mauvaise mise en œuvre ou à une solution d'isolation inadaptée (pas de prise en compte de la présence de remontées capillaires, pas de possibilité de séchage du mur vers l'intérieur ou vers l'extérieur, pas de protection du mur contre la pluie), les matériaux isolants biosourcés et la laine de verre voient leurs conductivités thermiques considérablement dégradées, contrairement aux autres matériaux isolants conventionnels. Cependant, cette situation est souvent temporaire et le séchage du matériau, si celui-ci est capillaire, peut ramener sa conductivité thermique à des valeurs plus acceptables, notamment lorsque l'humidité relative ne dépasse pas les 80 %.

	Coefficient b (-)	Hygroscopicité		Conductivité thermique λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)			Augmentation de la conductivité thermique au passage d'une humidité relative	
		Teneur en eau de référence w80 (kg.m ⁻³)	Teneur en eau finale pour une humidité relative de 100 % wf (kg.m ⁻³)	Pour une humidité relative de 0 %	Pour une humidité relative de 80 %	Pour une humidité relative de 100 %	De 0 à 80 %	De 0 à 100 %
Panneau de laine de roche	/	0,02	0,5	0,035	0,035	0,035	0%	0%
Panneau de laine de verre	0,4	0,7	329	0,035	0,035	0,127	1%	263%
Panneau de verre cellulaire	/	2	12	0,040	0,040	0,040	0%	0%
Panneau de polystyrène expansé	/	8	45	0,035	0,035	0,035	0%	0%
Panneau de polystyrène extrudé	/	8	45	0,032	0,032	0,032	0%	0%
Panneau de polyuréthane	/	1,12	28	0,023	0,023	0,023	0%	0%
Panneau de silicate de calcium	1656	20	793	0,070	8,657	340,531	12267%	486373%
Panneau de mousse de pierre	1,2	8,1	197	0,040	0,043	0,122	8%	206%
Cellulose en vrac	0,5	7,9	614	0,041	0,045	0,356	10%	768 %
Matelas souple de cellulose	0,5	7,9	614	0,040	0,043	0,286	8%	614%
Matelas souple de fibre de bois	0,5	7	180	0,038	0,040	0,084	5%	120%
Panneau rigide de fibre de bois	0,5	17,3	526	0,040	0,042	0,106	5%	164%
Panneau de liège	/	7,5	45	0,040	0,040	0,040	0%	0%
Panneau semi-rigide de fibres de chanvre	0,5	5	348	0,040	0,040	0,272	8%	580%
Mélange chaux-chanvre	3,34	30	546	0,110	0,135	0,566	23%	414%

Tableau 11 : Influence de l'humidité relative sur la conductivité thermique de matériaux isolants en général (source : [logiciel WUFI, 1995])

Cas des matériaux isolants biosourcés

Ce lien entre l'humidité et la conductivité thermique conduit à un paradoxe important pour les matériaux isolants biosourcés hygroscopiques et capillaires. Ces deux propriétés confèrent théoriquement à ces matériaux des propriétés de régulation hygrothermique très intéressantes, décrites notamment par [Lawrence, 2013] mais peu étudiée pour des matériaux isolants biosourcés autres que le béton de chanvre (cf. conclusion de l'étude réalisée par Construction & Bioressources concernant l'état des lieux des connaissances actuelles sur le fonctionnement hygrothermique des matériaux biosourcés [Etat des lieux C&B, 2013]). Ainsi, ces matériaux peuvent :

- réguler l'humidité à l'intérieur d'un logement, en absorbant le surplus d'humidité ou en relarguant de l'humidité si l'intérieur du logement est trop sec ;
- répartir un éventuel problème de condensation dans tout le matériau plutôt que de la concentrer à un endroit, ce qui limite le développement de moisissures ;
- agir comme un « matériau à changement de phase naturel »¹⁵ :
 - limiter les surchauffes en été le jour : une forte hausse de température entraîne la vaporisation de l'eau liquide contenue dans les pores du matériau. La vaporisation étant une réaction endothermique, elle prélève de l'énergie à l'intérieur du logement ce qui amortit la hausse de température. Le matériau a donc un effet de « paroi froide ».
 - limiter le recours au chauffage en hiver : une forte diminution de température entraîne la condensation de l'eau liquide contenue dans les pores du matériau. La condensation étant une réaction exothermique, elle relargue de l'énergie à l'intérieur du logement ce qui amortit la diminution de température. Le matériau a donc un effet de « paroi chaude ».

Mais d'autre part, l'hygroscopicité induit une augmentation temporaire de la conductivité thermique, qui risque même de devenir permanente au fil des cycles d'humidification / séchage, comme dans le tableau 11.

Cas des matériaux isolants conventionnels

De la même manière, certains matériaux isolants conventionnels tels que la laine de verre, peuvent s'imbiber d'eau, comme en témoignent de nombreux particuliers sur les forums internet spécialisés. Nous pouvons avancer deux explications à ce phénomène :

- certaines laines de verre sont hygroscopiques pour des humidités relatives proches de 100 % (cf. tableau 2) et seraient capillaires.

En ce qui concerne la capillarité, des essais simplifiés d'absorption d'eau ont été réalisés par Jean-François Martin dans le cadre de son projet de fin d'études à l'INSA de Strasbourg¹⁶. Quatre isolants ont été testés : le polystyrène expansé, le polystyrène graphité, la laine de roche et la laine de verre. Les résultats montrent que la prise d'eau est de 0,6 g.cm⁻² pour la laine de verre contre quasiment 0 g.cm⁻² pour les autres isolants. Cela prouve donc que la laine de verre est plus capillaire que les autres isolants conventionnels.

Cette capillarité pose problème puisqu'en pénétrant dans les fibres même de la laine de verre, l'humidité augmente la conductivité thermique de cette dernière. [Tittarelli, 2013] a montré que des laines de verres mises en œuvre il y a 25 ans dans des double-murs en Italie avaient perdu en moyenne 12 % de leur conductivité thermique, soit entre 0,004 et 0,006 W.m⁻¹.K⁻¹. L'auteur explique cette perte par la dégradation due à l'humidité du liant et du traitement destiné à rendre la laine de verre hydrophobe.

- Une laine de verre (ou tout autre laine isolante) humide peut n'être humide qu'en surface, c'est-à-dire que l'humidité n'a pas pénétrée dans les fibres. Dans ce cas de figure, on peut se demander si la conductivité thermique augmente réellement. Cette situation, conséquence d'une mauvaise mise en œuvre de la membrane gérant l'apport de vapeur, est cependant à éviter à tout prix. Elle peut engendrer l'apparition de moisissures.

15 http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/46591/cfm2011_504.pdf

16 <http://eprints2.insa-strasbourg.fr/498/>

Les essais de vieillissement accélérés

La dégradation permanente des propriétés des matériaux isolants due à l'excès d'humidité est étudiée par le biais d'essais de vieillissement accélérés. Ces essais consistent à imposer aux matériaux des cycles d'humidification / séchage et de comparer leurs propriétés avant et après vieillissement.

Des essais de ce type ont été réalisés dans le cadre du projet de recherche MaBioNat [MaBioNat, 2016] sur du béton de chanvre par le Cerema Est (article intitulé Vieillissement de bétons de chanvre) et ont consisté à imposer à différents types de bétons de chanvre une température de 30 °C et une humidité relative comprise entre 40 et 90 % pendant 4 jours puis entre 40 et 95 % pendant 5 jours. La comparaison des bétons de chanvre vieillis et non vieillis montre qu'aucune variation de la conductivité thermique n'a été détectée. Les mêmes conclusions ont été obtenues par l'Ifstar, le Cerema Est et l'Institut Pascal concernant plus largement les isolants contenant des granulats végétaux (article intitulé Durabilité d'isolants contenant des granulats végétaux).

Aucune autre étude disponible en ligne n'a été trouvée à ce sujet. La plupart des matériaux isolants, qu'ils soient biosourcés ou conventionnels, se contentent d'indiquer une bonne durabilité, ce qui sous-entend la stabilité de leurs propriétés au cours du temps sans pour autant faire référence à une quelconque norme.

La brochure commerciale de l'isolant Isoduo d'ISOVER¹⁷ indique cependant qu'«à ce jour il n'existe pas de norme nationale ou européenne de vieillissement artificiel relative aux produits d'isolation par l'intérieur. ISOVER a donc mis au point à son Centre de Recherche de Rantigny un protocole sévère de vieillissement (Essais Florida et Africain) qu'ISOVER applique systématiquement lors de la conception et du développement de ses produits. Ces essais attestent de la durabilité des propriétés de la laine Isoduo dans le temps». Les détails de ce protocole n'ont cependant pas pu être trouvés sur internet.

3.3.2. Le risque de développement de moisissures

Un véritable frein à la prescription des matériaux biosourcés dans la construction

Parmi les freins à la prescription des matériaux biosourcés dans la construction, l'Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement [FCBA, 2012] a systématiquement retenu l'absence d'évaluation de la résistance du produit face au risque fongique et insecte en vraies conditions d'emploi, et ce pour les sept familles de matériaux biosourcés étudiés (ouate de cellulose, granulats et fibres végétales, bétons végétaux de remplissage, en doublages intérieur et extérieur, mortiers végétaux pour enduits isolants intérieurs et extérieurs). Pour pallier cette absence, le FCBA et le CSTB ont rédigé un protocole [FCBA, 2015], présenté à la page 48.

Les conditions du développement de moisissures

D'après le site www.energieplus-lesite.be, réalisé par la Cellule de recherche Architecture et Climat de l'Université catholique de Louvain (UCL, Belgique), pour que des moisissures se développent dans un matériau isolant, plusieurs conditions doivent être réunies :

- une quantité d'oxygène suffisante ;
- une température comprise entre 5 et 25 °C ;
- un fond nourrissant approprié ;
- une humidité suffisante.

Les deux premières conditions sont facilement vérifiées dans le bâtiment.

Le fond nourrissant est constitué de matières organiques décomposables comme les sucres, les graisses et surtout la cellulose, dont les moisissures ont besoin pour leur développement, même en très faibles quantités. Les endroits où sont mis en œuvre des matériaux contenant ces matières organiques (ouate de cellulose par exemple, mais aussi papiers peints et colle cellulosique avec lesquels ils sont posés) ou alors là où s'accumulent la poussière et les salissures sont donc des endroits favorables au développement des moisissures. Une étude de l'INSERM datant de 1999, reprise dans un rapport de l'Agence Française de

17 https://www.isover.fr/sites/isover.fr/files/assets/documents/communiqu_e_de_presse_-_isoduo.pdf

Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail (AFFSET) sur les laines minérales¹⁸, précise d'ailleurs que «la fibre de verre elle-même ne favorisait pas la croissance de moisissures ou de bactéries. Cependant, des moisissures ou des bactéries peuvent proliférer dans tout matériau souillé ou demeurant mouillé pendant de longues périodes.»

Enfin, lorsque la mise en œuvre des matériaux n'est pas faite dans les règles de l'art (absence de membrane gérant l'apport de vapeur lors de la mise en œuvre de laines isolantes ou discontinuité des joints entre les panneaux isolants rigides par exemple) et lorsque l'air intérieur est chargé en humidité, les conditions d'humidité sont réunies pour que les moisissures se développent.

Le [logiciel WUFI, 1995] donne une représentation schématique (illustration 14) des conditions en température et en humidité relative favorables au développement de moisissures, et ce, pour des matériaux dit «biodégradables» ou «non biodégradables». Ainsi, quelle que soit la température, le développement de moisissure est favorisé par une humidité relative supérieure à 75 % pour les matériaux «non biodégradables» tandis qu'elle doit être supérieure à 80 % pour les matériaux «biodégradables». On constate également que plus la température est faible, plus le risque de développement de moisissures est faible.

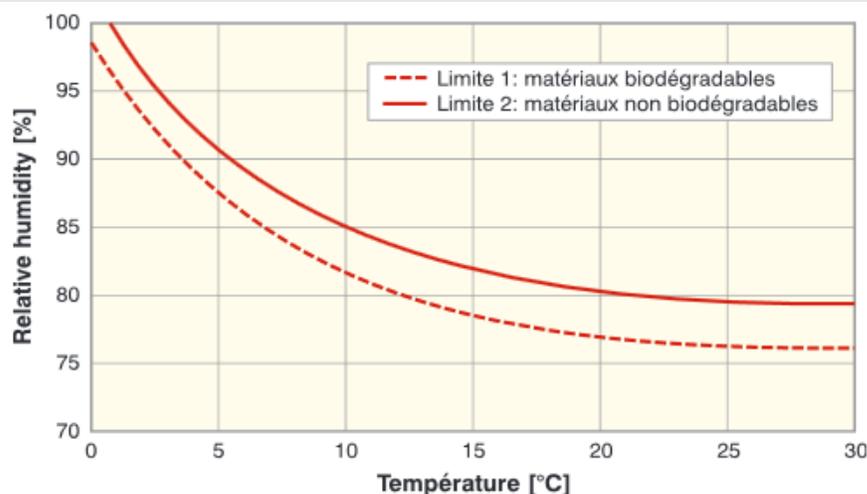


Illustration 14 : Conditions en température et en humidité relative favorables au développement de moisissures (source : [guide ISOLIN, 2010] d'après [logiciel WUFI, 1995])

Dans le cadre du projet MaBioNat [MaBioNat, 2016], une étude réalisée par l'Iffstar, le Cerema Est et l'Institut Pascal de Clermont-Ferrand (article intitulé Durabilité d'isolants contenant des granulats végétaux) a également montré que le développement de moisissures à la surface d'un béton de chanvre était en partie lié à la diminution du pH du fait de la carbonatation naturelle du liant.

L'évaluation du risque de développement de moisissures pour les matériaux isolants biosourcés

Dans le cadre de l'obtention d'un avis technique, l'évaluation de la résistance au développement de moisissures pour les matériaux isolants biosourcés s'appuie sur la norme d'essais «NF EN ISO 846 : Evaluation de l'action des micro-organismes» et est définie par le CSTB dans le «Guide technique spécialisé pour la constitution d'un dossier de demande d'Avis Technique : Isolants à base de fibres végétales ou animales – Produits isolants destinés à l'isolation thermique par l'intérieur – Cahier 3713» [Guide CSTB, 2012].

Le protocole est le suivant :

- les éprouvettes sont placées dans une ambiance humide (température 25 °C et humidité relative supérieure à 95 %) à l'obscurité pendant 28 jours. Deux méthodes permettent d'interpréter les résultats :

18 <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2004et0012Ra-2.pdf>

-
- la première consiste à exposer l'éprouvette à des moisissures : si le matériau contient une substance nutritive, les moisissures se développent.
 - la seconde consiste à encrasser les éprouvettes, c'est-à-dire à fournir au matériau une substance nutritive, même si elle n'en contient pas au préalable. Si aucune croissance fongique n'a lieu, le matériau est considéré comme fongistatique, c'est-à-dire insensible au développement de moisissures.

Pour que le matériau isolant biosourcé soit conforme, il faut qu'aucun développement de moisissures n'ait été détecté (« classe 0 »).

Il est à noter qu'une telle évaluation n'existe pas pour les autres matériaux isolants.

Cas des matériaux isolants biosourcés traités

D'après le premier paragraphe, l'une des conditions nécessaire (mais non suffisante) pour le développement de moisissures est la présence d'un fond nourrissant approprié. C'est pour cela que dans la plupart des cas, les matériaux biosourcés sont traités contre ces dernières. Le risque de développement de moisissures pour ces matériaux, lorsqu'un avis technique et/ou des règles de mises en œuvre existent, est estimée équivalente à celle des solutions traditionnelles, i.e. non biosourcées, et se voit attribuer une « classe 0 ».

D'autre part, la nature de ce traitement pose question : il convient en effet de s'assurer que le traitement destiné à rendre le matériau insensible au développement de moisissures ne rend pas le matériau insensible à l'humidité, en annihilant son hygroscopicité et sa capillarité, qui lui confèrent des propriétés de régulation hygrothermique très intéressantes (voir paragraphe 3.3.1).

Cas des isolants biosourcés non traités

L'obtention d'un avis technique n'est pas aisé pour les matériaux biosourcés non traités, du fait d'un protocole d'évaluation du risque de développement de moisissures trop contraignant. De plus, le traitement peut apparaître comme incompatible avec certaines valeurs mises en avant par les fabricants.

C'est pourquoi, à la suite de l'étude « Identification des freins normatifs et réglementaires à la prescription des matériaux biosourcés dans la construction » [FCBA, 2012], une seconde étude [FCBA, 2015] a été réalisée par le FCBA et le CSTB à la demande de la DHUP et avec le soutien de C&B, l'ASIV et l'ECIMA. Cette étude, terminée en mai 2015, vise à :

- déterminer des « classes d'emploi » spécifiques aux isolants biosourcés ;
- harmoniser et fiabiliser les méthodes d'évaluation de la résistance des isolants biosourcés vis-à-vis des moisissures selon ces nouvelles classes d'emploi.

Elle a porté sur plus de 120 configurations de murs et de toitures et a permis de tester des isolants biosourcés tel que la fibre de bois, le chanvre, le lin, la paille ou le coton. Ces matériaux doivent actuellement être traités pour limiter le risque de développement de moisissures.

Par des simulations hygrothermiques dynamiques réalisées à l'aide du [logiciel WUFI, 1995], des conditions réelles de températures et d'humidités relatives ont été définies dans les isolants biosourcés mis en œuvre et ont conduit à la mise en place de deux classes d'emploi :

- la classe d'emploi « sèche » pour les matériaux mis en œuvre dont l'humidité relative est :
 - $\leq 85 \%$;
 - $> 85 \%$ pendant moins de 48h ;
 - $> 85 \%$ pendant moins de 4 semaines avec $T^\circ < 12 \text{ }^\circ\text{C}$;
- la classe d'emploi « humide » pour les matériaux mis en œuvre dont l'humidité relative est :
 - $> 85 \%$ plus de 48h ;
 - $> 85 \%$ plus de 4 semaines avec $T^\circ < 12 \text{ }^\circ\text{C}$.

Le fabricant qui revendique la classe d'emploi « sèche » pour son isolant biosourcé doit donc réaliser un essai de résistance au développement de moisissures à 85 %, seuil qui permet dans de nombreux cas de démontrer la fiabilité des matériaux isolants biosourcés non traités.

Remarque : Les simulations de cette étude ont été réalisées dans des conditions de mise en œuvre parfaite. En cas de mauvaise mise en œuvre des isolants biosourcés non traités (absence ou discontinuité de la membrane gérant l'apport de vapeur) ou d'humidité accidentelle (remontées capillaires, infiltrations d'eau de pluie), la classe d'emploi n'est plus valable.

Cas des matériaux isolants conventionnels

Les matériaux isolants conventionnels, de par leur structure minérale, sont considérés comme insensibles au développement des moisissures. Knauf¹⁹ précise par exemple sur son site que «La laine de verre [...] ne favorise pas la formation de moisissure ni le pourrissement et ne constitue pas un milieu de culture pour les champignons et les bactéries».

Cependant, les forums internet de sites de bricolage présentent de nombreux témoignages et photographies de pathologies liées aux matériaux isolants conventionnels :

- développement de moisissures dans la laine de verre ;
- développement de moisissures entre le panneau de polystyrène et le mur ;
- développement de moisissures sur le papier kraft recouvrant la laine de verre.

Nous allons tenter d'apporter des éléments de réponse dans ce qui suit. Ces éléments de réponse ne constituent cependant que des hypothèses.

Développement de moisissures dans la laine de verre

Les moisissures ne se développent pas directement dans la laine de verre et ne s'en nourrissent pas (comme cela pourrait être le cas avec des matériaux isolants biosourcés non traités). Elles se développent à partir des poussières qui se sont accumulées à la surface de ses fibres et à condition que l'humidité soit suffisante.

Cette dernière condition est la preuve d'une mauvaise mise en œuvre de la laine de verre. En effet, lorsque l'on met en œuvre une laine isolante quelle qu'elle soit, une membrane gérant l'apport de vapeur²⁰ doit être posée du côté du volume chauffé de manière parfaitement continue. Ainsi, lorsqu'on isole un mur, la membrane doit se situer entre la plaque de plâtre et la laine isolante ; lorsque l'on isole le plancher du grenier, la membrane doit se situer entre le plancher et la laine isolante.

Une membrane gérant l'apport de vapeur discontinue peut amener des poussières et de l'air humide chaud (provenant du volume chauffé) à l'intérieur de la cavité contenant la laine isolante. L'air humide chaud se refroidit à mesure qu'il pénètre dans la cavité et l'eau qu'il contient condense, ce qui permet aux moisissures présentes dans les poussières de se développer.

Il est à noter que ce phénomène se produit aussi bien pour les laines isolantes conventionnelles que pour les laines isolantes biosourcées et relève d'un problème de mise en œuvre.

Il est probable que les moisissures exercent une action sur les propriétés physiques, thermiques et hygriques des laines isolantes. On peut imaginer, sans que nous puissions en apporter la preuve, que ces moisissures sont à l'origine d'un tassement et de l'augmentation de la conductivité thermique des laines atteintes.

Développement de moisissures sur le papier kraft recouvrant la laine de verre

Les laines de verres sont souvent recouvertes d'un papier kraft faisant office de pare-vapeur.

Dans certains cas, le papier kraft n'est pas posé du côté du volume chauffé. Ce cas de mauvaise mise en œuvre se retrouve surtout sur le plancher du grenier, où le papier kraft se situe alors entre la laine isolante et le grenier, et non entre la laine isolante et le plancher du grenier. L'air humide chaud (provenant du volume chauffé) pénètre alors facilement dans la cavité (par les interstices du plancher du grenier) contenant la laine isolante mais est stoppée par le papier kraft et ne peut être évacuée dans le grenier. L'air humide chaud se refroidit à mesure qu'il pénètre dans la cavité et l'eau qu'il contient condense, ce qui permet aux moisissures présentes dans les poussières mais aussi à la surface du papier kraft (composé de cellulose) de se développer.

¹⁹ <http://www.knaufinsulation.fr/isolation-base-de-laine-de-verre-questions-frequemment-posees>

²⁰ Un pare-vapeur, un frein-vapeur ou un frein-vapeur hygro-variable sont des membranes gérant l'apport de vapeur. Le papier kraft est un pare-vapeur.

Dans le cas où le papier kraft est posé du bon côté, c'est-à-dire du côté du volume chauffé, des moisissures peuvent également survenir mais pour une autre raison. Un pare-vapeur, contrairement à un frein-vapeur, ne se laisse pas traverser par la vapeur, ni dans un sens, ni dans l'autre. Si de l'humidité s'accumule dans la cavité contenant la laine isolante (due à des remontées capillaires, à une infiltration d'eau de pluie, à une fuite accidentelle ou à une mise en œuvre discontinue du pare-vapeur), elle ne sera pas capable de sécher

3.3.3. L'importance d'une bonne mise en œuvre

Au-delà de la compatibilité des matériaux isolants avec les matériaux anciens, abordée au paragraphe 3.2, une bonne mise en œuvre est indispensable pour éviter tout excès d'humidité. En effet, une mauvaise mise en œuvre peut affecter aussi bien les matériaux isolants conventionnels que les matériaux isolants biosourcés, mais ces derniers se montrent plus sensibles à la fois à la dégradation de leurs propriétés, et notamment de leurs conductivités thermiques, et au développement de moisissures.

Pour éviter ces pathologies, il convient donc de respecter avant tout les documents techniques (avis techniques, normes de mise en œuvre, documents techniques unifiés voire cahiers des prescriptions techniques, règles professionnelles de construction, etc.) associés à la mise en œuvre d'un matériau isolant. Le CSTB a notamment rédigé un «Cahier des Prescriptions Techniques communes de mise en œuvre des procédés d'isolation thermique de murs à l'aide de produits manufacturés à base de fibres végétales ou animales» [CPT CSTB, 2012].

L'Agence Qualité Construction [AQC, 2015] a récemment réalisé un retour d'expérience sur la mise en œuvre des matériaux biosourcés. Les désordres constatés sont globalement de deux types :

- les défauts de mise en œuvre spécifiques aux matériaux biosourcés : contact avec le sol, absence de protection en phase chantier (au cours du stockage et de la mise en œuvre), mise en œuvre de matériaux humides, séchage insuffisant des supports.
- les défauts de mise en œuvre non spécifiques aux matériaux biosourcés : présence de défauts d'étanchéité à l'air, ponts thermiques générés par des panneaux non jointifs.

Dans tous les cas, il est souligné que « les points de vigilance évoqués ne résident pas dans les matériaux eux-mêmes [...]. Tout matériau, mal mis en œuvre, est une source potentielle de désordre, voire de sinistre, pas seulement les matériaux biosourcés. ».

4. Le bâti ancien, les matériaux isolants et le confort d'été

Le confort d'été peut être abordé sous différents angles :

- les températures intérieures ;
- l'inertie par transmission, c'est-à-dire le déphasage et l'amortissement (l'inertie par absorption n'est que rarement étudiée) ;
- le confort hygrothermique, qui s'intéresse, en plus des températures, aux humidités relatives intérieures.

4.1. La température intérieure

Dans [Ville de Bayonne, 2010], le bureau d'études NEOTIM a étudié la rénovation thermique d'un bâtiment ancien de 5 étages en plein centre-ville de Bayonne, disposant de deux façades sur rue, l'une en pan de bois enduit, l'autre en pierre enduite. Cette étude a été réalisée avec le logiciel de simulation thermique dynamique Pléiades+COMFIE et a comparé différentes solutions d'isolation :

- scénario I : 10 cm d'isolation par l'intérieur en laine de verre et BA13 partout (pas de pare ni frein-vapeur mentionné) ;
- scénario II : 10 cm de laine de bois sur le pan de bois et 3 cm d'enduit chaux-chanvre sur la pierre ;
- scénario III : 10 cm de liège sur le pan de bois et 3 cm d'enduit chaux-chanvre sur la pierre.

L'étude a porté à la fois sur les consommations de chauffage et le confort d'été. Les simulations ont montré que la laine de verre (scénario I) donnait les plus mauvais résultats en termes de confort d'été par rapport aux deux autres solutions d'isolation, et ce, sur les 5 étages et pour toutes les variantes étudiées (ventilation simple-flux avec différents types de fenêtres).

Taux d'inconfort estival ²¹ pour le 5e étage (%)	Scénario I (laine de verre)	Scénario II et III
Variante 1	52	24
Variante 2	81	46
Variante 3	48	12

Tableau 12 : Taux d'inconfort estival pour le 5e étage selon différents scénarios (source : [Ville de Bayonne, 2010])

De manière plus générale, un groupe de travail s'est rassemblé en 2013 à l'initiative du centre de ressources Envirobat Méditerranée afin de répondre à la question suivante : les isolants biosourcés participent-ils à l'amélioration du confort hygrothermique d'été en construction neuve ou en réhabilitation de maisons individuelles ? [Envirobat Méditerranée, 2013]. La synthèse issue de ce groupe de travail affirme qu'à « épaisseur égale, l'utilisation d'isolants biosourcés pour la construction ou la rénovation de bâtiments apporte un meilleur confort d'été » par rapport à des isolants conventionnels.

Enfin, dans l'article [Suivi des performances acoustiques et hygrothermiques de la Maison du tourisme de Troyes](#) de la synthèse du projet MaBioNat [MaBioNat, 2016], le Cerema Est souligne que le béton de chanvre (utilisé ici en remplacement du remplissage dans une structure en pan de bois ancienne) favorise l'amortissement des variations de température extérieure au sein du bâtiment, du fait de l'apparition de phénomènes internes de changements de phase (vaporisation et condensation).

21 Pourcentage d'heure en occupation supérieur à 27 °C en période estivale.

4.2. L'inertie par transmission : déphasage et amortissement

En parallèle du guide [Tuffeau PNR, 2013], la DREAL Pays de la Loire a commandé au CETE de l'Ouest une étude sur la réhabilitation énergétique des bâtiments en tuffeau [Réhabilitation tuffeau, 2014].

Six bâtiments anciens en tuffeau, deux non rénovés, deux isolés par de la laine de bois, de chanvre ou de lin par l'intérieur et deux corrigés thermiquement par des enduits ou du béton de chaux-chanvre ont été étudiés in-situ. L'étude a montré que :

- pour les bâtiments non rénovés, l'amortissement est de 9 % et le déphasage de 1,75 h. Les températures intérieures moyennes sont comprises entre 22,3 et 24,6 °C.
- pour les bâtiments rénovés (sans qu'il soit possible de faire la distinction entre ceux isolés et ceux corrigés thermiquement), l'amortissement est de 14,2 % et le déphasage de 6 h et les températures intérieures moyennes sont comprises entre 19,9 et 22,3 °C. Ce dernier point est contraire aux attentes, puisque [Stéphan, 2012] a notamment montré par simulation que l'isolation, par l'intérieur ou par l'extérieur, d'un bâtiment ancien en moellon de pierre de 50 cm avec de la laine minérale diminuait dans tous les cas le confort d'été.

Au final, on voit que les bâtiments anciens rénovés bénéficient d'une meilleure inertie par transmission et d'un meilleur confort thermique que les bâtiments anciens non rénovés. Ce constat est contre-intuitif : la théorie indique que l'isolation par l'intérieur réduit le confort d'été (voir par exemple [Oliva, 2010]) car elle diminue l'inertie par absorption. Or [Réhabilitation tuffeau, 2014] l'explique par la très faible étanchéité à l'air des bâtiments anciens non rénovés. En effet, la rénovation thermique permet d'améliorer l'étanchéité à l'air et donc de réduire la pénétration de l'air extérieur chaud à l'intérieur du bâtiment, ce qui améliore d'autant le confort d'été.

L'inconvénient de cette étude est que les matériaux isolants étudiés sont tous biosourcés, ce qui ne permet pas de tirer des conclusions fiables sur leurs performances énergétiques par rapport à d'autres matériaux isolants. Cependant, il est probable que des résultats similaires auraient été trouvés avec des matériaux isolants conventionnels, l'amélioration de l'étanchéité à l'air constituant un facteur plus influent pour améliorer le confort d'été.

On peut également comparer le déphasage induit par les différents matériaux isolants donnés dans le tableau 2. Il montre que pour 20 cm de matériau, le déphasage est équivalent pour la laine de roche et le verre cellulaire que pour la ouate de cellulose ou le panneau semi-rigide de fibres de chanvre.

Il reste également à étudier le lien entre l'inertie (par transmission et par absorption) et les phénomènes de changement de phase au sein des matériaux biosourcés hygroscopiques, qui permettent également d'atténuer la vitesse et l'amplitude de l'onde de chaleur en été et d'absorber un trop-plein de chaleur à l'intérieur.

4.3. Le confort hygrothermique

4.3.1. Définition

Le confort hygrothermique concerne à la fois la température et l'humidité relative. Tout comme une température d'air trop faible ou trop élevée peut avoir un impact sur la santé, un air trop sec ou trop humide peut entraîner le développement de bactéries, virus, champignons et mites ou d'infections respiratoires, comme le montre l'illustration 15.

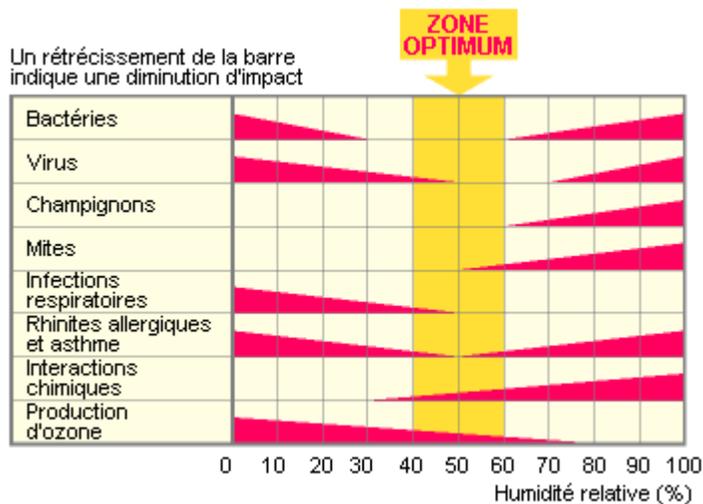


Illustration 15 : Zone d'humidité relative optimale du point de vue hygiénique (source : energieplus-lesite.be)

On peut définir quatre zones de confort hygrothermique :

- la zone 1 est à éviter car l'air est trop sec ;
- les zones 2 et 3 sont à éviter car l'air est trop humide ;
- la zone 4 correspond à la zone de confort hygrothermique.

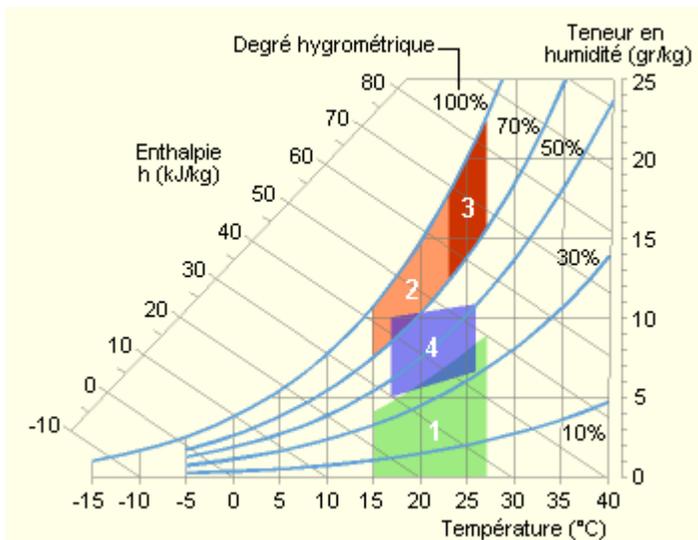


Illustration 16 : Les quatre zones de confort hygrothermique (source : energieplus-lesite.be)

On peut donc également classer un inconfort selon qu'il soit d'origine thermique (en dehors de la zone 4 par la gauche et la droite), d'origine hygrique (en dehors de la zone 4 par le haut ou le bas) ou hygrothermique.

[Réhabilitation tuffeau, 2014] a par exemple montré que dans les maisons en tuffeau étudiées, l'isolation par l'intérieur augmentait le confort hygrothermique mais que l'inconfort était très majoritairement d'origine hygrique : il y fait trop humide en été et trop sec en hiver.

4.3.2. La valeur de la capacité tampon hydrique ou Moisture Buffer Value (MBV)

Pour améliorer le confort hygrothermique, certains matériaux isolants biosourcés mettent en avant leur capacité à agir comme un tampon hydrique, absorbant l'humidité quand l'air intérieur est trop humide et la relarguant quand il est trop sec.

D'après ²², la «*Moisture Buffer Value (MBV)*» indique la quantité d'eau adsorbée ou désorbée lorsque le matériau est soumis à une variation de l'humidité relative extérieure et pour un temps donné. Sa valeur est exprimée en $\text{g.m}^{-2}.\%HR^{-1}$. La capacité tampon hydrique caractérise la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative de l'air avoisinant.».

Sa caractérisation expérimentale se fait par le biais d'un essai détaillé dans le projet Nordtest²³ de l'Université Technique du Danemark. L'illustration 17 montre qu'un matériau possédant une valeur de MBV supérieure à 2 $\text{g.m}^{-2}.\%HR^{-1}$ peut être considéré comme un excellent tampon hydrique, c'est-à-dire un excellent régulateur de l'humidité relative intérieure.

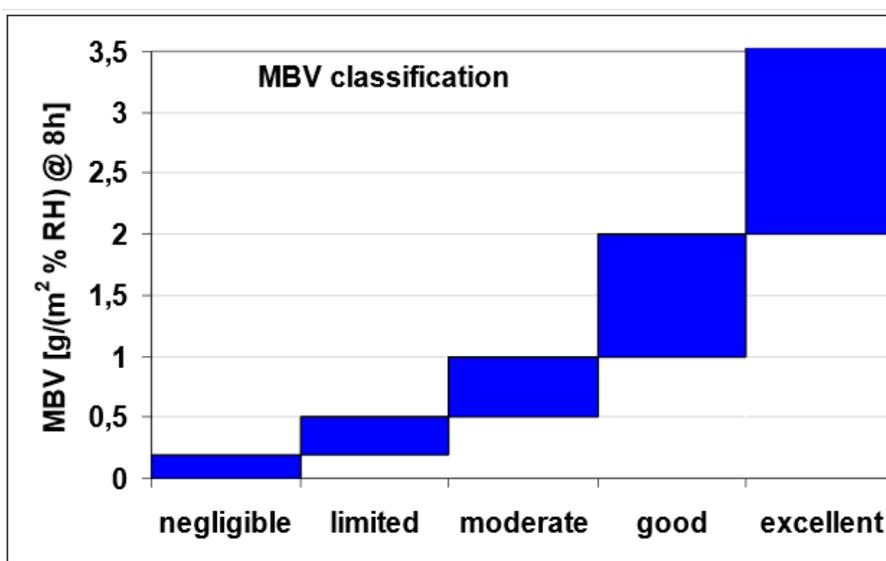


Illustration 17 : Classification du MBV (source : projet Nordtest)

Le MBV est très étudié pour les bétons végétaux (chanvre majoritairement, mais aussi bois, lavande, lin, palmier-dattier), qui possèdent tous une bonne voire excellente valeur de MBV. Quelques rares valeurs, présentées dans le tableau 13, ont été trouvées pour le panneau de fibre de bois, le plâtre, la brique de terre crue et le travertin.

Matériau	Valeur de MBV ($\text{g.m}^{-2}.\%HR^{-1}$)
Panneau de fibre de bois	2,7
Brique de terre crue	3
Plâtre	0,78
Travertin (pierre)	0,56

Tableau 13 : Valeurs de MBV pour le panneau de fibre de bois, la brique de terre crue et le travertin (source : <http://rugc15.sciencesconf.org/54493/document> et <http://www.theses.fr/2015LIMO0112>)

22 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00590819/document>

23 http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:75984/datastreams/file_2415500/content

Des essais menés par [Collet, 2013] ont cependant montré qu'un enduit chaux-sable appliqué sur du béton de chanvre diminuait la valeur de MBV du béton de chanvre de moitié, passant de bonne à modérée.

Il semblerait que la valeur de MBV du panneau de fibre de bois soit excellente. De la même manière, dans le cadre du projet MaBioNat [MaBioNat, 2016], le Cerema Centre-Est note dans son article Comportement hygrothermique de parois en matériaux biosourcés d'une habitation en conditions réelles de fonctionnement que la laine de bois dispose d'une bonne capacité à réguler l'hygrométrie, puisqu' «une forte atténuation des variations d'hygrométrie est constatée [au cœur d'une cloison composée de 18 cm de laine de bois prise en sandwich entre deux plaques de plâtre de 1 cm chacune] alors que les conditions au voisinage présentent une forte amplitude». Le même constat est fait dans l'article Comparaison des performances hygrothermiques réelles d'une maison en terre-paille et d'une maison en briques monomurs, concernant le terre-paille. On pourrait donc extrapoler en disant que la plupart des matériaux isolants biosourcés ont également une excellente valeur de MBV. On peut toutefois se demander si la présence de revêtements étanches à l'humidité, comme un enduit au ciment, une peinture acrylique, un papier peint vinyle ou un pare-vapeur ne risquent pas de mettre en péril la capacité de tampon hydrique des matériaux isolants biosourcés qu'ils recouvrent.

5. Synthèse générale

Dans cette synthèse bibliographique des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux isolants biosourcés, nous avons dans un premier temps identifié les deux spécificités du bâti ancien que les matériaux isolants biosourcés permettraient d'améliorer ou de conserver, à savoir sa sensibilité à l'humidité et son bon confort d'été (à noter qu'une troisième spécificité du bâti ancien, à savoir sa faible étanchéité à l'air, reste indissociable de ces deux dernières et participe de l'équilibre thermo-hygro-aéraulique du bâti ancien). Dans un deuxième temps, ces deux spécificités ont été étudiées à la lumière des études recensées sur le sujet.

L'humidité est connue pour être une cause très fréquente de pathologie dans le bâtiment, notamment en rénovation. La question de la compatibilité hygrothermique des matériaux isolants avec les matériaux anciens se pose donc.

Pour le bâti ancien, l'idée générale est que l'isolation des murs peut conduire à une accumulation d'humidité dans ce dernier, du fait d'une modification de son fonctionnement hygrothermique. Des principes de précaution sont ainsi mis en avant, préconisant de faciliter le passage de l'humidité au travers du mur ou au contraire de le limiter. Des solutions d'isolation plus détaillées mettent largement en avant les matériaux isolants biosourcés, dont la capillarité et la faible résistance à la diffusion de vapeur facilitent effectivement le passage de l'humidité au travers du mur. Cependant, les travaux scientifiques réalisés sur le sujet montrent que les modélisations sont en réalité plus nuancées : la présence d'un excès d'humidité dans le mur peut, en général, faire pencher la balance vers les matériaux isolants biosourcés, mais dans des conditions optimales (mise en œuvre parfaite, absence de remontées capillaires, possibilité de séchage vers l'intérieur ou vers l'extérieur, protection de la façade par rapport à la pluie), les matériaux isolants conventionnels donnent de tout aussi bons résultats. Cela montre que chaque projet de rénovation d'un mur ancien doit faire l'objet d'une étude spécifique, comprenant un diagnostic initial, permettant de déterminer dans quelles conditions se déroule la rénovation, et des propositions de solutions d'isolation adaptées.

Si les matériaux isolants biosourcés sont en général mieux adaptés à la rénovation des murs anciens en présence d'un excès d'humidité, la question des effets de cet excès d'humidité sur ces derniers se pose naturellement. Les deux effets les plus préoccupants sont l'augmentation de la conductivité thermique et le risque de développement de moisissures.

Les matériaux isolants biosourcés étant en général hygroscopiques (et capillaires), leurs conductivités thermiques augmentent en présence d'humidité. Cependant, tant que l'humidité relative reste raisonnable, c'est-à-dire qu'elle ne dépasse pas les 80 %, cette augmentation reste assez faible, de l'ordre de 5 à 10 % pour les isolants biosourcés et de 23 % pour le mélange chaux-chanvre. Lorsque l'humidité relative dépasse les 80 %, l'augmentation est beaucoup plus significative, mais de telles humidités relatives sont le signe d'une mauvaise mise en œuvre ou d'une solution d'isolation inadaptée. Pourtant, cette capacité à stocker l'humidité et à la répartir dans tout le matériau permet *a priori* de réguler l'ambiance intérieure en température et en humidité relative, ce dont ne sont pas capables les matériaux isolants conventionnels. De plus, il semblerait que contrairement à d'autres matériaux isolants conventionnels et dans des conditions très défavorables (pour des humidités relatives proches de 100 %) la laine de verre soit suffisamment hygroscopique pour voir sa conductivité thermique augmentée dans les mêmes proportions que les matériaux isolants biosourcés. La question qui, au final, se pose, est de savoir si l'augmentation de la conductivité thermique est temporaire ou peut devenir permanente. Les essais de vieillissement accélérés peuvent apporter des réponses à cette question mais ne sont malheureusement que très peu développés et/ou très peu diffusés pour les matériaux isolants.

Le risque de développement de moisissures est un autre problème couramment évoqué lorsque l'on parle de matériaux isolants biosourcés, à un tel point que cela constitue un véritable frein à la prescription de ces matériaux dans la construction. Pour qu'une moisissure se développe dans un matériau isolant, il est nécessaire qu'elle trouve des conditions en oxygène, en humidité, en température et en nourriture adéquates. De nombreux matériaux isolants biosourcés, notamment ceux sous avis technique, sont donc traités afin de ne plus constituer une nourriture adéquate pour les moisissures. On peut cependant se demander s'ils n'altèrent pas également l'hygroscopicité et la capillarité de ces matériaux, permettant comme on l'a vu de réguler l'ambiance intérieure en température et en humidité relative. C'est pourquoi la notion de « classe d'emploi » a récemment été développée, destinée à indiquer dans quelles configurations un isolant biosourcé non traité peut être utilisé sans risque de développement de moisissures. Toutefois, le matériau isolant n'est

pas le seul support favorable au développement des moisissures : un papier kraft (habituellement mis en œuvre avec les laines minérales), des poussières ou des salissures présentes à la surface du matériau isolant peuvent également l'être. Les matériaux isolants conventionnels sont donc également soumis à ce risque, et de manière courante. Pour les matériaux isolants aussi bien biosourcés que conventionnels, le premier critère garantissant l'absence de risque de développement de moisissures soit une bonne mise en œuvre, permettant de prévenir tout excès d'humidité. Ce n'est que lorsqu'un excès d'humidité est à craindre dans le mur ancien qu'un choix s'impose entre ces deux types de matériaux isolants.

Outre sa sensibilité à l'humidité, le bâti ancien se distingue également des autres types de bâtiment par son bon confort d'été, qu'il convient de préserver lors d'un projet de rénovation.

Si dans des cas extrêmes, les modélisations montrent que la laine de verre donne des taux d'inconfort deux fois plus élevés que les matériaux isolants biosourcés, la simple diminution de la perméabilité à l'air due à l'isolation permet d'augmenter significativement le confort d'été dans le bâti ancien. La question est donc de savoir quelle est l'influence réelle de la nature du matériau isolant sur l'augmentation du confort d'été dans le bâti ancien. Mais le confort d'été, notamment dans le bâti ancien, peut dépendre très fortement de l'humidité relative intérieure, parfois jugée inconfortable car trop élevée. Dans ce cas, les matériaux isolants biosourcés présenteraient un avantage de par leur capacité à agir comme un tampon hydrique. Cependant, cette capacité, appelée « *Moisture Buffer Value* » très étudiée pour le béton de chanvre nu, l'est très peu pour les autres matériaux isolants et pose la question de l'influence du revêtement sur les résultats.

6. Conclusion

D'un point de vue technique, cette synthèse a montré que dans les situations présentant un excès d'humidité, les matériaux isolants biosourcés traités étaient plus adaptés à la rénovation du bâti ancien que les matériaux isolants conventionnels, bien que des questions se posent quant à l'augmentation de leurs conductivités thermiques au contact de l'humidité et à l'impact des traitements sur la santé. L'utilisation de matériaux isolants conventionnels ou de matériaux isolants biosourcés non traités est cependant envisageable dans des situations ne présentant pas d'excès d'humidité, sans qu'il y ait de risque de développement de moisissures ou d'accumulation excessive d'humidité dans le mur dû à la mise en œuvre du matériau isolant. D'autre part, l'utilisation de membrane gérant l'apport de vapeur bien dimensionnée peut dans certains cas permettre l'utilisation de laines isolantes conventionnelles. Quel que soit le matériau isolant choisi, une bonne mise en œuvre, y compris des membranes gérant l'apport de vapeur, est indispensable au bon fonctionnement de mur isolé. En ce qui concerne le confort d'été, il est plus difficile de conclure puisque la diminution de la perméabilité à l'air grâce à l'isolation d'un mur ancien semble améliorer dans tous les cas le confort d'été.

D'un point de vue scientifique, cette synthèse a montré qu'il existe encore de nombreuses incertitudes sur le comportement réel d'un bâtiment ancien rénové. Des propriétés hygrothermiques sont déterminées par des essais en laboratoire sur des matériaux isolants, leur compatibilité avec le bâti ancien et les effets sur le confort d'été sont étudiés à l'aide de modélisations, mais peu d'instrumentations de bâtiments anciens réels comparant les matériaux isolants biosourcés et les matériaux isolants conventionnels ont été réalisées. De telles études, accessibles au grand public, pourraient répondre à de multiples questions :

- quelle est l'influence d'une mauvaise mise en œuvre des matériaux isolants sur l'accumulation d'humidité dans le mur ancien, sur l'augmentation de la conductivité thermique et sur le développement de moisissures à long terme ?
- dans quelle mesure l'hygroscopicité et la capillarité des matériaux isolants biosourcés permettent-elles de réguler l'ambiance intérieure en température et en humidité relative ? Quelle est la « *Moisture Buffer Value* » des matériaux isolants mis en œuvre ?
- le confort d'été dans un bâtiment ancien rénové est-il plus important avec des matériaux isolants biosourcés qu'avec des matériaux isolants conventionnels ?

Même si ce type d'étude présente de nombreux paramètres difficiles à maîtriser (présence des occupants, aléas de chantier, difficultés au niveau de l'interprétation des données, etc.), elles peuvent apparaître comme plus convaincantes que des essais en laboratoire ou des modélisations, dont les conditions sont certes beaucoup mieux maîtrisées mais ne reflètent parfois pas la réalité.

Bibliographie

- [Analyse parc résidentiel, 2012] Analyse détaillée du parc résidentiel existant. Agence Qualité Construction (AQC) - Programme RAGE - Règles de l'art Grenelle de l'environnement - 2012. http://www.programmepacte.fr/sites/default/files/pdf/rapport-rage-parc-residentiel-existant-2012-09_0.pdf.
- [AQC, 2015] Mise en œuvre des matériaux biosourcés : les points de vigilance. Agence Qualité Construction (AQC) - Agence Qualité Construction (AQC) - 2015. http://www.alsace.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/6_AQC_DREAL_Biosources_DEF.pdf.
- [Arrêté Label biosourcé, 2012] Arrêté du 19 décembre 2012 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « bâtiment biosourcé ». DHUP - DHUP - 2012. <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2012/12/19/ETLL1239803A/jo>.
- [BATAN, 2011] Modélisation du comportement thermique du bâtiment ancien avant 1948. Centres d'Etudes Techniques de l'Équipement (CETE) de l'Est et de l'Ouest, Ecole Nationale de Travaux Publics de l'État (ENTPE), Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Strasbourg, Maisons Paysannes de France (MPF) - Ministère de l'Écologie - 2011. <http://www.est.cerema.fr/rapport-de-synthese-du-projet-batan-bati-ancien-a3100.html>.
- [Berger, 2012] L'humidité dans les bâtiments : pathologies et paramètres gouvernants. Berger J., Tasca-Guernouti S., Woloszyn M., Buhe C. - XXX^e Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry - 2012. https://www.polytech.univ-savoie.fr/fileadmin/polytech_autres_sites/sites/augc2012/actes/Contribution1156.pdf.
- [cahiers HYGROBA, 2013] HYGROBA : étude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes. Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement (CETE) de l'Est, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse, Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA) de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture (ENSA) de Toulouse, Maisons Paysannes de France (MPF) - Ministères du Logement et de l'Écologie - 2013. <http://www.est.cerema.fr/rapport-d-etude-hygroba-etude-de-la-rehabilitation-a3101.html>.
- [Colinart, 2013] Prise en compte des transferts de masse dans la détermination de la conductivité thermique de matériaux biosourcés. Colinart T., Pierre T., Glouannec P. - Congrès SFT 2013, Gérardmer - 2013. http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2013/articles/5826.pdf.
- [Collet, 2013] Performance hydrique de bétons de chanvre : effet de l'enduit sur leur capacité de régulateurs hydriques. Collet F., Pretot S., Lanos C. - 31^{èmes} Rencontres de l'AUGC - 2013. <http://augc2013.ens-cachan.fr/Data/Articles/Contribution1291.pdf>.
- [Courgey, 2010] Humidité et transferts de vapeur d'eau dans les parois. Courgey S. - Arcanne - 2010. <http://www.ifb42.com/file/ecoboisplus/interventioncourgey14juin2010.pdf>.
- [CPT CSTB, 2012] Cahier des Prescriptions Techniques communes de mise en œuvre des procédés d'isolation thermique de murs à l'aide de produits manufacturés à base de fibres végétales ou animales - Cahier 3728. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) - Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) - 2012. <http://www.ccfat.fr/groupe-specialise/download/isol-thermique-murs-par-l-intrieur-isolation-1639/>.
- [Envirobot Méditerranée, 2013] Synthèse : groupe de travail « Isolants bio-sourcés et confort d'été ». Envirobot Méditerranée - Envirobot Méditerranée - 2013. <http://www.enviroboite.net/isolants-bio-sources-et-confort-d-ete-synthese-du-groupe-de-travail-envirobat>.
- [EPISCOPE, 2015] Bâtiments résidentiels - Typologie du parc existant et solutions exemplaires pour la rénovation. Pouget Consultants - Projet européen EPISCOPE - 2015. http://episcope.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure/FR_TABULA_TypologyBrochure_Pouget.pdf.
- [Etat des lieux C&B, 2013] Etat des lieux des connaissances actuelles sur le Fonctionnement Hygrothermique des matériaux biosourcés. Construction & Bioressources (C&B) - Construction & Bioressources (C&B) - 2013. www.developpement-durable.gouv.fr/document152368.

- [FCBA, 2012] Identification des freins normatifs et réglementaires à la prescription des matériaux biosourcés dans la construction. Lamoulié J. - DHUP - 2012. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_Rapport_identification_freins_reglementaires_et_normatifs_-_septembre_2012.pdf.
- [FCBA, 2015] Durabilité des isolants biosourcés - Vers la création de classes d'emploi. Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA), Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) - DHUP - 2015. <http://www.egboisconstruction.com/images/2015/at4_pdf/1_Julien%20Lamoulie%20EGB2015.pdf>.
- [fiches ATHEBA, 2011] Fiches Amélioration thermique du bâti ancien. CETE de l'Est, Maisons Paysannes de France - Ministère de l'Ecologie - 2011. <http://www.est.cerema.fr/fiches-conseils-atheba-amelioration-thermique-des-a3098.html>.
- [Graulière, 2005] Typologie des bâtiments d'habitation existants en France - Synthèse des caractéristiques des bâtiments d'habitation existants permettant l'évaluation du potentiel d'amélioration énergétique. Graulière P. - Ministère de l'Ecologie - 2005. .
- [guide ABC, 2011] Amélioration thermique des Bâtiments Collectifs construits de 1850 à 1974. Pouget Consultants, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), TRANSSOLAR, Patrick de Jean et Jérôme Martin - edipa - 2011. .
- [Guide CSTB, 2012] Guide technique spécialisé pour la constitution d'un dossier de demande d'Avis Technique : Isolants à base de fibres végétales ou animales - Produits isolants destinés à l'isolation thermique par l'intérieur - Cahier 3713. CSTB - CSTB - 2012. <http://www.ccfat.fr/groupe-specialise/download/gts-isolants--base-de-fibres-vgtales-ou-1641/>.
- [guide ISOLIN, 2010] Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines - guide d'aide à la conception. Cellule de recherche Architecture et Climat de l'Université catholique de Louvain (UCL, Belgique) - Département Energie et Bâtiment Durable du Service Public de Wallonie - 2010. http://energie.wallonie.be/servlet/Repository/guide_isolin_oct2010_web.pdf?ID=16005.
- [Habitat ancien en Alsace, 2015] Habitat ancien en Alsace : amélioration énergétique et préservation du patrimoine. Cerema Est et Nord-Picardie, Atelier Oziol - De Micheli - Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) et Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC) d'Alsace - 2015. <http://www.alsace.developpement-durable.gouv.fr/pour-comprendre-et-renover-le-bati-ancien-en-a2010.html>.
- [IBIS, 2013] IBIS – Systèmes d'Isolation Bio-sourcés innovants pour la rénovation du bâti ancien. Parex Group, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE), Construction & Bioressources (C&B), École supérieure d'ingénieurs et de techniciens pour l'agriculture (Esitpa) - ADEME - 2013. <http://www.ademe.fr/ibis-isolants-bio-sources>.
- [Lawrence, 2013] Hygrothermal performance of bio-based insulation materials. Lawrence M., Walker P., Shea A., De Wilde P. - Construction Materials Volume 166 Issue CM4 - 2013. <http://opus.bath.ac.uk/34270/>.
- [logiciel WUFI, 1995] Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Künzle H.M. - Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart - 1995. <https://wufi.de/en/wp-content/uploads/sites/11/2014/12/K%C3%BCnzle-1995-Simultaneous-Heat-and-Moisture-Transport1.pdf>.
- [MaBioNat, 2016] Synthèse de l'opération de recherche stratégique et incitative MaBioNat - Matériaux biosourcés et naturels pour une construction durable. Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar), Cerema - Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar), Cerema - 2016. <http://mabionat.ifsttar.fr/accueil/>.
- [Oliva, 2010] L'isolation thermique écologique. Oliva J.-P., Courgey S. - terre vivante - 2010. .
- [Pathologies poutres ITI, 2013] Evaluation des risques de pathologies liées à l'humidité au niveau des poutres encastrées dans un mur isolé par l'intérieur. Institut Fraunhofer pour la physique du bâtiment (Fraunhofer IPB), Pouget Consultants - Programme RAGE - Règles de l'art Grenelle de l'environnement - 2013. <http://www.programmepacte.fr/evaluation-risques-pathologies-liees-lhumidite-poutres-encastrees-dans-un-mur-exterieur-avec-iti>.

-
- [PNR Vosges du Nord, 2014] *Guide de l'éco-rénovation. Parc Naturel Régional (PNR) des Vosges du Nord - Parc Naturel Régional (PNR) des Vosges du Nord - 2014.* <http://eco-renover.parc-vosges-nord.fr/encourager-l-eco-renovation/des-exemples-d-eco-renovation/renover-thermiquement-une-maison-en-pierre.html>.
- [Pré-BATAN, 2007] *Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie. Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement (CETE) de l'Est, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE), Maisons Paysannes de France (MPF) - Ministère de l'Écologie - 2007.* <http://www.est.cerema.fr/rapport-d-etude-connaissance-des-batiments-anciens-a3099.html>.
- [Réhabilitation tuffeau, 2014] *Réhabilitation énergétique des bâtiments en tuffeau. Cerema (Ouest) - Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) du Pays de la Loire - 2014.* http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_final_tuffeau-2.pdf.
- [Réhabiliter pan de bois picard, 2014] *Réhabiliter le bâti picard en pan de bois - guide méthodologique pour une réhabilitation énergétique respectueuse du bâti picard en pan de bois. Construction Durable et éco-matériaux (CoDEM) Picardie - Construction Durable et éco-matériaux (CoDEM) Picardie - 2014.* http://batlab.fr/images/PDF/Guide/GUIDE_REHAB_WEB.pdf.
- [Stéphan, 2012] *Évaluation de l'impact d'une isolation thermique sur le confort d'été et les besoins énergétiques d'un bâtiment ancien. Stéphan E., Cantin R., Michel P., Caucheteux A., Tasca-Guernouti S. - XXX^e Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry - 2012.* https://www.polytech.univ-savoie.fr/fileadmin/polytech_autres_sites/sites/augc2012/actes/Contribution1246.pdf.
- [Tittarelli, 2013] *Degradation of glass mineral wool insulation after 25 years in masonry cavity walls. Tittarelli F., Stazi F., Politi G., di Perna C., Munafò P. - International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences (IJCEBS) Volume 1, Issue 5 - 2013.* <http://www.isaet.org/images/extraimages/D114315.pdf>.
- [Tuffeau PNR, 2013] *Un bâti en tuffeau pour aujourd'hui et demain. Parc Naturel Régional (PNR) Loire Anjou Touraine - Parc Naturel Régional (PNR) Loire Anjou Touraine - 2013.* <http://www.parc-loire-anjou-touraine.fr/fr/bien-renover-son-habitat-en-tuffeau-des-conseils-pour-les-habitants>.
- [Ville de Bayonne, 2010] *Connaissance des performances et du comportement thermique de bâtiments types du centre ancien de Bayonne. NEOTIM - Ville de Bayonne - 2010.* http://www.arcad-ca.fr/documents/STD/A_20110624_Renovation_logement_ancien_utilisation_STD_22bourgneuf_BAYONNE-ADEME.pdf.