

LOT 5

SENSIBILITE A LA CROISSANCE FONGIQUE DES ISOLANTS BIOSOURCES MIS EN ŒUVRE PAR L'INTERIEUR



Revue de littérature



EXPERTISES

Coordination : Arcanne

Décembre 2025

REMERCIEMENTS

Ce rapport constitue le Rapport D5.2 prévu à la convention ADEME n°2204D0021. Livrables rédigé par Arcanne

Soutiens du projet et Comité de Pilotage :

ADEME : Jonathan LOUIS - DGEC, ANAH – CLER - AREC Occitanie, Envirobat Occitanie - Région Normandie, Région Bourgogne-Franche-Comté, Région Centre-Val de Loire – Dorémi

Participation au Comité technique :

ADEME - CSTB, CEREMA – AQC – Karibati - EDF R&D, Uwe BRANKAMP

CITATION DE CE RAPPORT

SCOP Enertech : Nicolas ANDREAU, Thierry RIESER, Julien SPILEMONT, Mickaël GUERNEVEL, Yoann BAUDOUIN, Roman Nicolas, Damien JANNOT, Jean-Paul ZIMMERMANN, Victor CAMBON, Stéphane MOTEAU, Thérèse DEVIGON, Edwina PEDLEY, Muriel DUPRET, Effinergie : Sébastien LEFEUVRE, Laura BRUNO, Khedidja MAMOU, RECto : Grégory HERFRAY, Verso : Marion SIE, Arcanne : Samuel COURGEY, François GROSDEMOUGE, Etienne SAMIN. A Hélène Lenormand. 2025. SENSIBILITE A LA CROISSANCE FONGIQUE DES ISOLANTS BIOSOURCES MIS EN ŒUVRE PAR L'INTERIEUR. 215 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Tous les livrables du projet seront disponibles sur <https://www.effinergie.org/>

Des fiches opérations de certaines maisons suivies dans le cadre de Perf in Mind et Perf in Mind 2 sont également disponibles sur l'Observatoire BBC d'Effinergie :

[https://www.observatoirebbc.org/perfinmind.](https://www.observatoirebbc.org/perfinmind)

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Cette publication, réalisée à l'initiative de son/ses auteur(s), a reçu un soutien financier de l'ADEME, mais n'engage pas l'ADEME. Son contenu (ou les données qu'elle contient) n'engage que la seule responsabilité de son/ses auteur(s) et ne représente pas la position de l'ADEME.

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2204D0021

Étude réalisée par SCOP Enertech, Muriel DUPRET, Effinergie, RECto, Verso, Arcanne, Khedidja MAMOU pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Jonathan LOUIS
Appel à projet de recherche : Vers des bâtiments responsables
Coordination technique - ADEME : Jonathan LOUIS

Direction/Service : DVTD/SB

Table des matières

Introduction	7
1. Matériel et constitution de corpus	7
A. Étude de délimitation consolidée par des entretiens	7
B. Protocole de recherche et identification des études	9
1. Les ressources scientifiques : une information très structurée	9
2. Sélection de la terminologie recherchée	10
C. Typologies de ressources	12
2. La dynamique R&D autour des matériaux biosourcés.....	13
A. Groupe de recherche MBS : Exemple de recherches en cours.....	16
B. CEREMA : des projets de recherche sur les matériaux biosourcés.....	17
1. ACLIBIO : étude du vieillissement des MBS	17
2. EmiBio : étude des émissions de COV par les MBS	18
3. Normes européennes (hEN) et documents d'évaluation européens (EAD)	20
4. Approche méthodologique et plan.....	23
Partie 1. Études de la prolifération des micro-organismes sur les matériaux de construction	25
1. Généralités sur les micro-organismes rencontrés dans le bâti	27
A. Présentation et impact sanitaire	27
B. Classification et présentation des micro-organismes.....	29
1. <i>Bacteria</i> - Les bactéries	29
2. <i>Fungi</i> – Les champignons.....	30
3. Typologie des apparitions les plus fréquentes.....	31
C. Reproduction, cycles de vie et développement : aperçu des dynamiques élémentaires	33
2. Reproduction et dissémination	33
1. Biofilms	35
D. Décoloré, moisi ou pourri ? Différents dégâts d'origine fongique	36
1. Les champignons lignivores (ou de pourriture)	38
2. Les champignons lignicoles.....	42
3. Les facteurs déterminants de la croissance microbienne sur les matériaux de construction : focus sur la croissance fongique.....	44
A. Paramètres hygrothermiques	46
1. Eau et activité de l'eau.....	46
2. Exigences de température pour les champignons	57
B. Prévalence et comparaison des micro-organismes liés à certaines caractéristiques des matériaux	60

1. Nature chimique et pH des substrats	60
2. Types de matériaux et souches fongiques	64
C. Dynamiques spatiales et temps d'exposition.....	73
4. Caractérisation de la prolifération fongique sur les matériaux de construction	81
A. Méthodes de prélèvement.....	83
1. Types de prélèvements.....	83
2. Prélèvements <i>in-situ</i>	84
B. Les analyses en laboratoire : synthèse des méthodes et protocoles.....	85
Partie 2. Comportement des isolants biosourcés (IBS).....	87
1. Mécanismes de transfert de la vapeur et de l'eau, et de fixation dans les milieux poreux	88
A. Stockage d'humidité. Hygroscopicité et isotherme de sorption.....	88
B. Transfert d'humidité	91
1. Résistance à la diffusion de vapeur.....	92
2. Capillarité	93
3. Tampon hydrique	94
C. Séchage	96
1. Principes	96
2. Phénomènes limitant	98
D. Les mécanismes de transport de chaleur et d'humidité.....	98
2. Les isolants biosourcés (IBS).....	100
A. Composition chimique.....	101
B. Comportement à l'humidité des fibres	103
C. Effets de la protection à l'eau de pluie.....	104
3. Comparaisons de propriétés physiques et hygrothermiques des matériaux isolants	106
A. Bases de données de matériaux de référence	106
B. Analyse des isolants et matériaux capillaires et/ou hygroscopiques	112
4. Caractérisation hygrothermique d'IBS : exemples de l'enjeu de la redistribution et du séchage des phases hygroscopique et capillaire sur plusieurs études et isolants.....	115
A. Redistribution hygroscopique	115
1. Dans une paroi fermée à partir d'un élément en bois stocké dans des conditions de quasi saturation	115
2. Dans un ensemble de murs d'essai avec différents isolants disposés en ITI	129
B. Redistribution capillaire après simulation d'une fuite eau liquide	135
Partie 3. Évaluation du risque fongique des IBS en ITI	137
1. Le risque fongique sur des MBS : simulation et modèles de prédition.....	137
A. Les différents modèles de prédition du risque fongique	138

B.	Limites et analyses critiques	142
1.	Les modèles.....	143
2.	Les substrats.....	145
3.	Les méthodes de prélèvements.....	145
2.	Etudes <i>in situ</i>	146
A.	RIBuild 2015- 2019 : analyse et évaluation de matériaux d'isolation thermique par l'intérieur.....	147
1.	Descriptifs des cas étudiés	148
2.	Synthèse des principaux résultats	149
3.	Apports de l'étude RIBuild	151
B.	Comparaison de différents systèmes ITI sur un même bâtiment	153
1.	Deux systèmes d'isolation : similitudes et différences.....	154
2.	Résultats des mesures d'humidité.....	155
3.	Approche combinée (laboratoire et <i>in situ</i>) du risque en ITI avec IBS	158
A.	Descriptif de l'étude	158
B.	Aperçu des méthodes et résultats.....	163
4.	Approche orientée IBS	173
A.	Classes d'emploi et durabilité d'isolants biosourcés.....	173
B.	La méthode « Tobon »	176
5.	Etudes en conditions d'exploitation critiques en Europe.....	177
A.	Évaluation des isolants à la croissance fongique	177
1.	Méthodologie et conditions climatiques de l'étude de simulation.....	180
2.	Étude de simulation	181
3.	Résultats	183
4.	Exemple pour le « pire des scénarii » possibles	183
B.	Résultats et synthèses pour plusieurs systèmes constructifs et trois zones géographiques.....	189
1.	Pour les conditions d'essai n° 1	190
2.	Pour les conditions de test n° 2	191
3.	Pour les conditions de test n° 3	192
4.	Points clés à retenir de cette étude	195
Conclusion.....	198	
1.	Étendue du corpus.....	198
2.	Évaluation de la prolifération fongique et de la résistance des IBS face à celle-ci ...	198
3.	IBS : quelle sinistralité recensée ?	202
4.	Pourri ? Moisi ? Dégradé ?	202
5.	Caractérisations et modélisations	205
C.	La modélisation.....	205

D. Caractérisations hygrothermiques : les limites fortes des protocoles employés pour les isolants biosourcés.....	207
E. Simulation et prédition du risque fongique.....	208
1. Aperçu global sur les modèles.....	208
2. Analyses critiques	209
F. Posture réflexive : la philosophie du Fungi.....	210
G. Capitalisation des connaissances : perspectives et ouvertures	211
Bibliographie	213

Introduction

L'étude de l'état des connaissances relatives à la croissance fongique dans le cadre d'une isolation intérieure (ITI) impliquant des isolants biosourcés (IBS) nécessite la prise en compte de registres distincts d'expression de ces connaissances : littérature scientifique, documentation professionnelle et spécialisée, littérature grise, mais aussi entretien avec des acteurs de terrain et des praticiens.

Et à l'intérieur de chacun de ces registres, nous avons pu constater des cloisonnements qui, bien que souvent justifiés, contraignent l'élaboration des connaissances et leurs diffusions. Par exemple, et comme nous le verrons tout au long de cette étude, les contaminations fongiques relèvent à la fois des études biologiques, sanitaires et de chimie des matériaux. Les désordres constatés peuvent être expliqués par les mécanismes étudiés en laboratoire, mais découlent aussi parfois du décalage entre les cadres normatifs ou prescriptifs et les pratiques mises en œuvre ou les conditions spécifiques d'implémentation.

Ainsi pour tenter d'appréhender ce phénomène dans sa complexité, il est important de rassembler un large faisceau de paramètres de formes et de nature distinctes. C'est pourquoi nous avons rassemblé et croisé trois catégories de ressources : la documentation scientifique, la documentation et les relevés de pratique, et les dispositifs normatifs selon des modalités propres à chacune.

Il est important de noter que le travail de constitution de corpus et d'entretiens présenté dans ce rapport a été réalisé sur la période 2021-2022, avec une reprise début 2023, puis rédiger dans sa forme actuelle mi-2024. D'importants travaux ont abouti durant cette période, donnant lieu à publications plus académiques que certains comptes rendus de recherche exploités ici. D'autre part, d'importantes évolutions ont été intégrées aux normes en vigueur. Loin de remettre nos travaux en cause, nous considérons que ces éléments les ont confortés.

1. Matériel et constitution de corpus

A. Étude de délimitation consolidée par des entretiens

L'approche documentaire de la littérature scientifique que nous présentons ici est du type « scoping review », dit aussi étude de portée ou de délimitation. La motivation de ce choix méthodologique repose sur un faisceau de besoins dont :

- La clarification de concepts clés issus de domaines de recherches distincts mais méritant d'être mieux appréhendé par l'ensemble de la communauté des intervenants ;
- L'identification des connaissances disponibles ou lacunaires après croisement des connaissances acquises dans les divers champs disciplinaires impliqués ;
- Un examen des méthodes et des pratiques en laboratoire et *in situ*, et les possibilités de comparaison en vue de mener des métanalyses.

Nous avons consolidé notre démarche documentaire en menant de nombreux entretiens avec des spécialistes reconnus et intégrés à diverses structures de recherche et d'études, en France et en Europe.

Liste alphabétique des personnes rencontrées ou interrogées en entretien (une ou plusieurs fois)

FRANCE	BELGIQUE
BORDERON Julien CEREMA Grand-Est	Evrard Arnaud Université de Louvain
CHABRIAC Pierre-Antoine Université de Bretagne	
CLAUDE Sophie LMDC Toulouse	SUÈDE
COLINART Thibaut Université de Bretagne	JOHANSONN Pernilla RISE Research Institutes of Sweden
FABRI Antonin ENTPE Lyon	
GARNIER Aurélie CSTB	PAYS-BAS
GOURLAY Etienne CEREMA Grand-Est	DE LIGNE Liselotte KU LEUWEN
HEBERLE Élodie CEREMA Grand-Est	VEREECKEN Evy Bioscience Engineering GENT
LABOREL Aurélie LMDC Toulouse	
LAMOULIE Etienne FCBA	ALLEMAGNE
McGREGOR Fionn Université de PAU	BRACKMANN Amelie IsoGreen
SCHILLING Marion Doctorante à l'Université de Lorraine	ZIRKELBACH Daniel Fraunhofer-Gesellschaft WKI
SILAR Philippe Université de Paris Diderot	
SOUDANI Lucile CSTB	RÉPUBLIQUE TCHÈQUE
	STANĚK Kamil Czech Technical University in Prague

Dans le cadre de ce rapport, des délais et des moyens qui lui ont été attribués, il n'était malheureusement pas envisageable de mener à bien une revue de littérature sous la forme d'une métá-analyse s'appuyant sur l'ensemble de la documentation et faisant la synthèse des résultats. Il aurait en effet été nécessaire de disposer :

- D'une excellente vue de l'ensemble et de spécialistes du périmètre concerné, qui recoupe a minima ici plusieurs branches de la biologie et de la physique des matériaux et une réelle volumétrie de publication ;

- D'une capacité à comparer les données issues de ces différents domaines scientifiques, mais aussi d'expertises professionnelles et de terrain alors que l'absence d'outils communs est justement l'un des enjeux des recherches pour ce type de sujet ;
- De ressources statistiques, textométriques et informatiques pour moissonner les données dispersées, les recoupements et la pondération des informations.

B. Protocole de recherche et identification des études

1. Les ressources scientifiques : une information très structurée

La délimitation et la caractérisation du « paysage scientométrique » permettent de construire une représentation visuelle d'un ensemble de données décrivant les principaux acteurs et publications, mais aussi les relations entre les éléments composant ce paysage et les zones d'ombre.

La recherche de documents scientifiques étant un point clé de la production scientifique, de nombreux outils sont disponibles pour accompagner ces démarches.

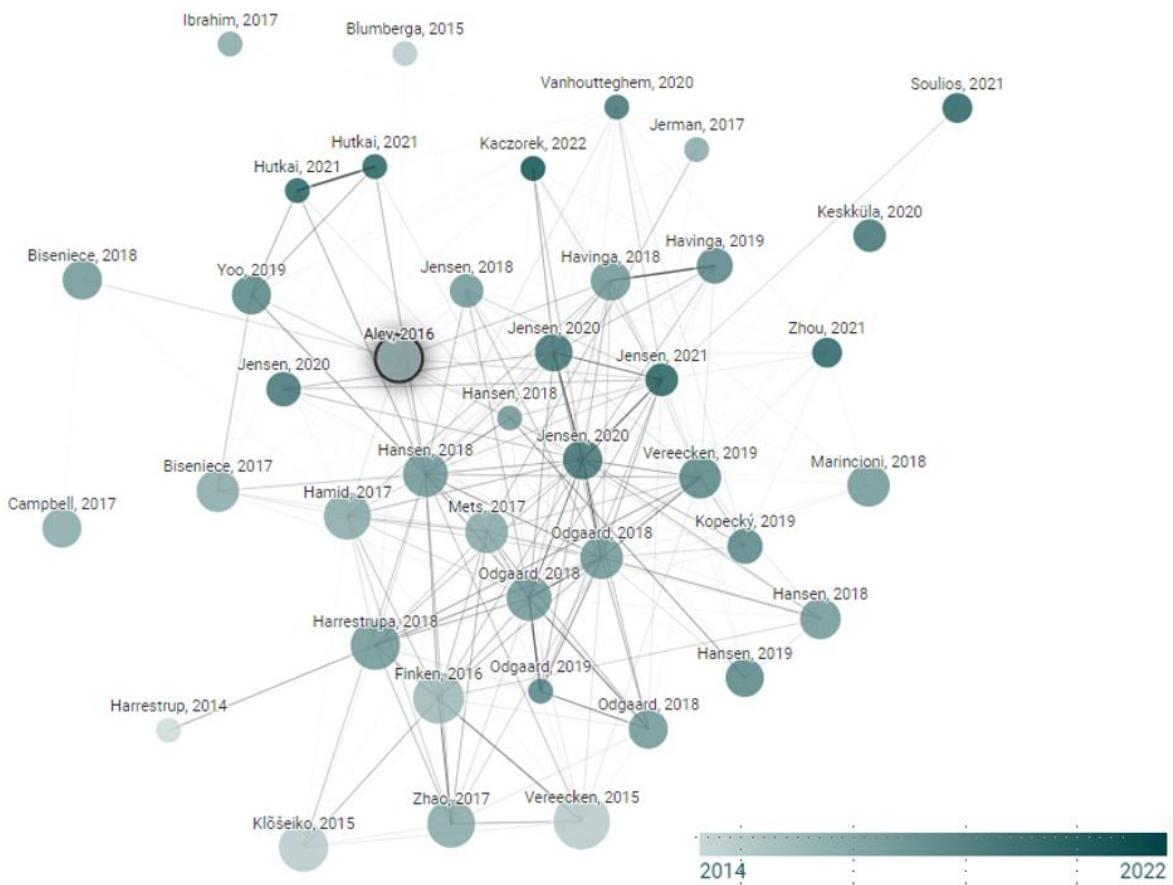
- Plusieurs moteurs de recherche sur le web sont orientés exclusivement sur les publications académiques, tels que Google Scholar, Dimension, ou Semantic Scholar qui complète les résultats par des fonctions appuyées sur IA ;
- Plusieurs systèmes d'évaluation de la qualité ou de la réputation des institutions, chercheurs, revues et articles sont disponibles (nombre de citations, h-Index, Impact factor, Altmetrics, etc.).

La structuration des informations dans les publications scientifiques est strictement normée, afin de faciliter les recherches documentaires. Ainsi tous les documents contiennent un titre, un résumé, et des mots-clés, qu'il est possible d'interroger spécifiquement lors d'une requête dans une base documentaire ou un moteur de recherche avancé.

Il est possible de composer des cartographies reliant plusieurs systèmes d'information. Par exemple, VOSviewer¹ est un logiciel représentant des réseaux bibliométriques composés de revues, chercheurs, publications individuelles, reliés par des éléments communs (co-auteur), des liaisons par citation, par l'emploi de lexiques communs.

<https://www.vosviewer.com/>

Présentation de résultat d'une recherche avec les mots-clés « mould growth » avec l'outil VOSviewer



« Avoiding mould growth in an interiorly insulated log wall » (Titre de l'article : « Éviter la croissance de moisissures dans un mur en rondins isolé à l'intérieur »)

La carte générée permet de visualiser des sphères correspondant à un article et à un auteur et plus ou moins selon leur année de publication. Le nombre de citations d'un article est proportionnel au diamètre de la sphère. L'outil permet également de comprendre les polarités qui se créent au sein du paysage littéraire, car les occurrences de citations entre scientifiques sont rendues visibles grâce aux liens créant le réseau. La recherche peut continuer de manière plus détaillée si l'on sélectionne un article, si l'on se déplace dans cette carte interactive, ou bien encore si l'on déploie davantage de mots-clés à l'intérieur de cet espace de recherche. Cette approche permet de repérer rapidement les articles et ouvrages les plus cités (et du moins, référencés sur Internet), et de se faire une idée des limites du champ à explorer ou bien d'en découvrir un autre.

2. Sélection de la terminologie recherchée

À l'issue d'une phase exploratoire préliminaire, nous avons pu définir une liste de termes utilisés de façons combinées lors de nos recherches documentaires. Les domaines explorés recouvriraient :

- Efficacité énergétique - Rénovation thermique - isolation thermique par l'intérieur ;
- Modélisation hygrothermique – transfert couplé de masse et de chaleur – prédition du risque hydrique/hygrique ;
- Matériaux biosourcés, matériaux naturels, dégradation, risque fongique, moisissures,

champignons ;

- Puis, plus spécifiquement : selon les matériaux et les matières premières recherchées (ouate de cellulose, béton végétal, paille, fibre de bois, chanvre, etc.).

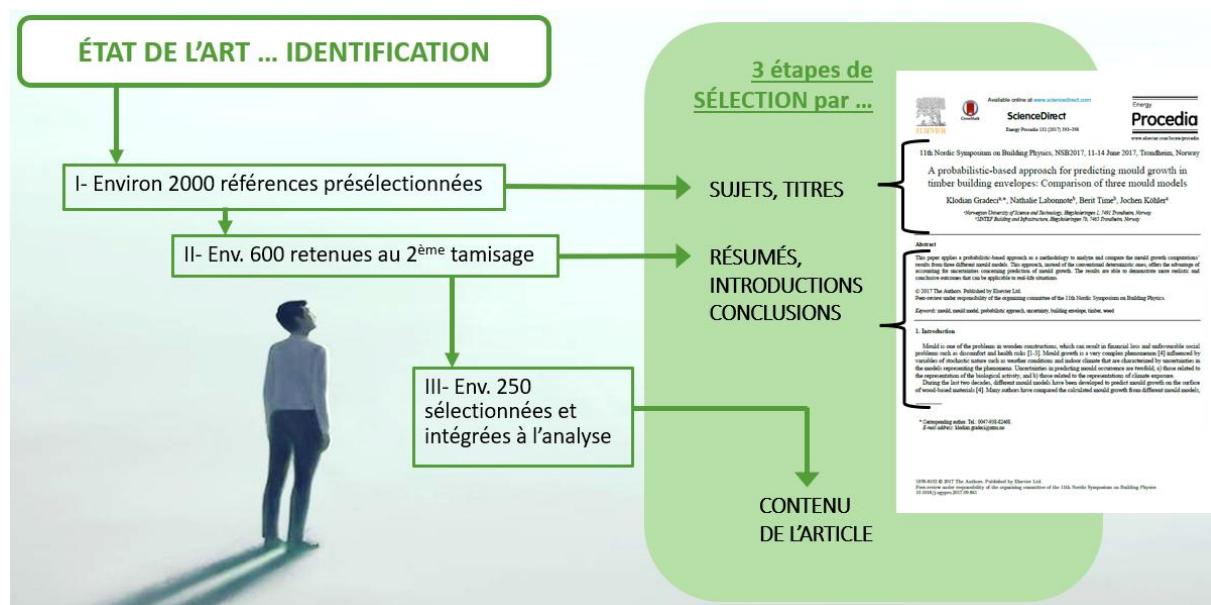
La recherche impliquait bien évidemment de trouver les mots-clés équivalents en langue anglaise qui peuvent être affinés par la traduction, mais aussi par l'examen des pratiques et des tendances lexicales.

Les recherches ont été menées via les moteurs et métamoteurs scientifiques, mais aussi reportées directement sur les principales plateformes de publication et de diffusion afin de jouer sur les différentes pondérations algorithmiques et présentées à divers moteurs généralistes pour élargir le périmètre des résultats notamment vers les ressources en marge du champ académique ou universitaire.

En l'absence de ressources techniques et scientifiques spécialisées dans le traitement statistique de l'information documentaire, une sélection a été opérée en plusieurs phases :

1. Par défaut ont été exclues les études qui ne permettaient pas de croiser l'un des champs mentionnés ci-dessus. Celles qui recoupaient le plus de domaines étaient privilégiées.
(2 000 références à cette étape).
2. Une présélection a ensuite été effectuée lors de la phase exploratoire sur la base des « titres » et des « résumés »
(600 références à cette étape).
3. La lecture des « introductions » et des « conclusions » a permis de finaliser la sélection et de poursuivre en effectuant une lecture approfondie et des prises de notes pour le corpus final
(environ 250 références intégrées à l'analyse).

Illustration de la sélection en 3 étapes



Etienne Samin

Les références et les documents ont été compilés dans l'outil de gestion bibliographique Zotero. Outil open source de gestion bibliographique, Zotero a été utilisé pour organiser le corpus et le commenter, mais l'analyse a été opérée manuellement, au cas par cas, au fil des lectures.

Vue des références collectées et structurées (colonne de gauche) dans Zotéro

The screenshot shows the Zotero application window. On the left, there's a tree view of a library containing various research papers and books. On the right, a detailed view of a specific reference is shown, including fields like Title, Creator, Date, and a full bibliographic entry. The interface includes tabs for Info, Notes, Marqueurs, Connexe, Preview, and PubPeer.

Titre	Créateur	Date
Study the development of mould on prompt natural cementbased he...	Bessette et al.	2015-06-22
Study of Hygrothermal Processes in External Walls with Internal Insulat...	Bisencie et al.	2018/03/01
Feedback on a Multiscale Investigation on the Acoustical Properties of...	Blinet et al.	2020-12
Written guidelines for decision making concerning the possible use of...	Bok et Johans...	janvier 1, 2020
Microbial growth behind tiles in bathrooms	Blumberga et...	2020-06-30
On-site assessment of hygrothermal performance of historic wall befo...	Borderon et al.	2016-10
On-site assessment of hygrothermal performance of historic wall befo...	Borderon et al.	2016-10
Mould Growth Models and Risk Assessment for Emerging Timber Env...	Brambilla et ...	June 18, 2021
Mould growth in energy efficient buildings: Causes, health implication...	Brambilla et ...	octobre 1, 2020
Influence of Dissolved-Aluminum Concentration on Sulfur-Oxidizing B...	Buvignier et al.	mai 24, 2019
Fungal susceptibility of bio-based building materials : Using X-ray mic...	Caes	89
From the Dynamic Simulations Assessment of the Hygrothermal Behav...	Calzolari et al.	2020
The moisture performance of straw bale construction in a temperate ...	Carfrae et al.	2011
Development of a cost effective probe for the long term monitoring ...	Carfrae et al.	janvier 1, 2011
Modeling to predict positive pressurization required to control mold ...	Chen et al.	August 1, 2016
Etude du vieillissement de boules de papierette utilisée pour la fabric...	Courtous	
Contaminations fongiques en milieux intérieur, Diagnostic : effets sur l...	CSHPP	septembre 2006
Meteorological conditions, climate change, new emerging factors, an...	D'Amato et al.	2015-01-01
Impacts of a clay plaster on indoor air quality assessed using chemical...	Darling et al.	11/2012
Energy Efficiency and Comfort of Historic Buildings:	de Bouw et al.	
Fungal susceptibility of bio-based building materials	De Ligne	2021
Bio-based building materials : how to unravel the role of material cha...	De Ligne et al.	2020
Analysis of spatio-temporal fungal growth dynamics under different e...	De Ligne et al.	12/2019
Evaluation of the risk of decay of wooden beams embedded in intern...	De Mets et Til...	2020
Durabilité d'isolants à base de granulats végétaux	Deckers et al.	02/12/2021
Aging of hemp shiv used for concrete	Delamony et al.	2018-10-18
Durability of hemp concretes exposed to accelerated environmental a...	Delamony et al.	2018-12-15
Durability of hemp concretes exposed to accelerated environmental a...	Delamony et al.	août 20, 2020
The sustainability of biomass-derived materials: thermodynamical a...	Duchêne	2022
Evaluation des risques liés à l'humidité dans le cas d'une isolation ther...	Dugué et al.	2010

Etienne SAMIN. septembre 2022

Les résultats de l'état de l'art ont pu être discutés et confirmés lors d'entretiens et d'échanges par écrit avec les spécialistes identifiés. Des outils d'exploration des structures et des réseaux de recherche et d'innovation ont également confirmé cette sélection, tel que :

- Le service ScanR² proposé par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche français ;
- Netscity³, service en version bêta de l'université de Toulouse.

C. Typologies de ressources

Les principales ressources documentaires moissonnées sont :

- Web Of Science (Clarivate) ;
- Scopus (Elsevier) ;
- Science Direct (Elsevier) ;
- Europe PMC ;
- Semantic Scholar ;
- JSTOR ;
- SAGE Journals ;
- Scientific Research ;
- Researchgate ;
- Centrale des thèses produites : <http://www.theses.fr/> ; <https://tel.archives-ouvertes.fr/>
- Autres pages Web :
 - o universités étrangères ;
 - o ministères et organismes y afférents : ADEME (France), FNR (Allemagne), etc. ;
 - o associations de chercheurs (Société des Thermiciens Français, etc.) ;
 - o congrès et conférences internationales (RILEM, etc.) ;

² <https://scanr.enseignementsup-recherche.gouv.fr/>

³ <https://www.irit.fr/netscity/prod/public/intro/>

- projets internationaux ou impliquant différents pays : (RIBuild, FNR Projekt, etc.) ;
- organismes scientifiques internationaux (WTA, etc.).

Les documents collectés sont :

- Pour la partie scientifique académique : des articles, des actes de colloques, conférences et séminaires, des livres et chapitres de livres (monographie et ouvrages collectifs) ;
- Des textes de loi, normes, textes réglementaires ;
- Des ressources scientifiques, techniques et de la littérature grise, dont des cahiers techniques, des rapports..., produits par le CSTB (Humibatex), AQC (SYCODES, statistiques, etc.), CEREMA (HYGROBAT), les programmes PACTE et RAGE (SIMHUBAT), etc.

2. La dynamique R&D autour des matériaux biosourcés

Nous abordons ici les tendances relevées à la fois dans la production scientifique et les recherches en cours pour lesquelles nous n'avons pas encore pu nous procurer les résultats intermédiaires.

Cet aperçu n'est pas exhaustif. Nous nous sommes concentrés sur les projets que nous avons pu recenser en lien avec notre sujet. D'autres sont en cours au sein d'autres centres de recherches et pôles de compétences et de diffusion de l'innovation, comme :

- Le **CODEM** (FRD-CODEM depuis 2023)⁴ est un centre de transfert de compétences, de technologies et de connaissances sur la construction durable, la formulation et la caractérisation d'éco-matériaux issus de matières recyclées ou de biomasses, dans les Hauts de France. Des matériaux y sont testés et développés en collaboration avec les laboratoires et organismes de recherche publics et privés régionaux et nationaux. Le CODEM organise également leur introduction sur le marché (depuis la mise en réseau des acteurs, jusqu'à la réalisation des tests in situ).
- **Karibati**⁵, coopérative de salariés, se propose de constituer **un lieu d'échange organisé autour des matériaux biosourcés (MBS)** pour la construction.

Afin d'évaluer la dynamique de recherche et développement sur les MBS pour la construction, Karibati a diffusé jusqu'en 2022⁶ une enquête réalisée auprès des divers laboratoires, centres techniques, universités, etc. Vingt d'entre eux ont répondu. Les résultats de cette étude sont les suivants⁷ :

Dynamique de recherche : pour 75 % des laboratoires interrogés, l'activité de recherche autour des matériaux biosourcés est en croissance linéaire ou exponentielle (Figure 1).

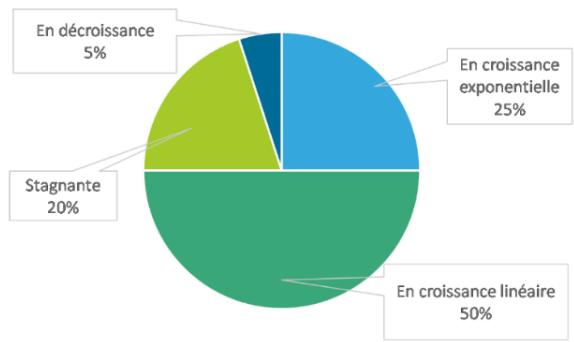
⁴ Source : <http://batlab.fr/>

⁵ Site Internet : <https://www.karibati.fr/>

⁶ Source : <http://www.karibati.fr/dynamique-rd-biosource/>.

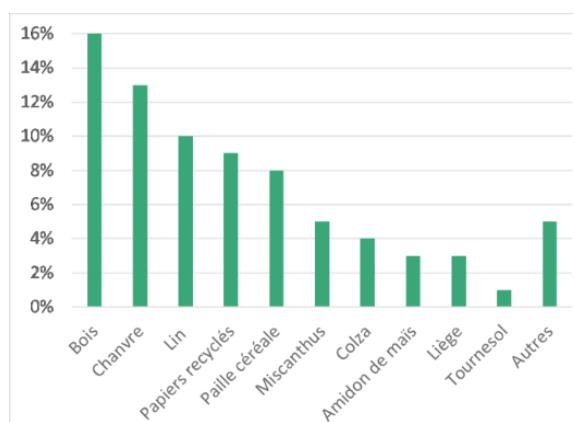
⁷ Éléments extraits du site Internet de Karibati.

Figure 1. Dynamique de recherche



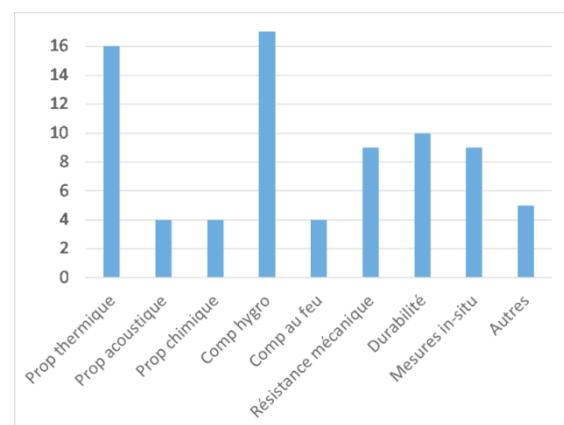
Bioressources étudiées : le bois (dont dérivés) et le chanvre arrivent en tête des études avec une proportion de 16 et 13 %. Les études sur le lin, les papiers recyclés et la paille de céréales représentent 8 et 10 %. (Autres : torchis, autres plantes locales, etc.) (Figure 2).

Figure 2. Bioressources étudiées



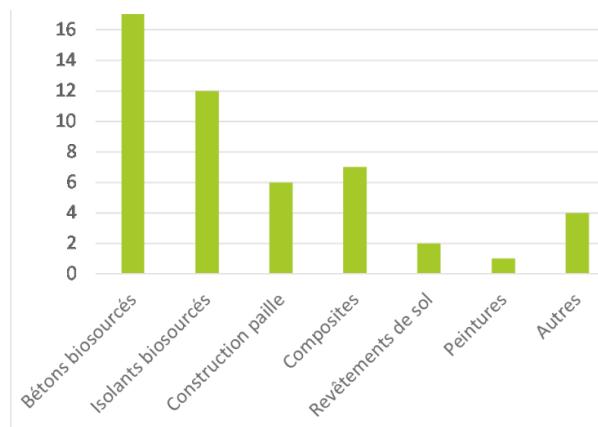
Caractéristiques étudiées : comportement hygrothermique et propriétés thermiques des matériaux concentrent la majorité des projets de recherche (isolants et bétons biosourcés). Autres : résistance aux micro-organismes, ACV, impacts sanitaires, compétitivité, relation produits/procédés, etc.) (Figure 3)

Figure 3. Caractéristiques étudiées



Produits étudiés : la majorité des recherches concernent les isolants biosourcés et les bétons biosourcés (Figure 4).

Figure 4. Produits étudiés



La conclusion de cette étude souligne que la dynamique de recherche et développement sur les matériaux de construction biosourcés est réelle et se concentre principalement sur les isolants et les bétons biosourcés et sur les propriétés thermiques et hygrothermiques de ces matériaux.

Du côté de la recherche fondamentale, la dynamique n'est pas moindre, puisque de nombreux laboratoires, équipes et centres de recherche sont impliqués dans des travaux en lien avec les matériaux et techniques de construction, dont les publications reflètent l'importance croissante des thématiques environnementales. À titre d'illustration plus que d'exhaustivité, nous pouvons évoquer :

- Le **CERMAV**, unité de recherche du CNRS (UPR 5301) basée à Grenoble, membre de l'Institut Carnot Polynat⁸, étudie l'Écoconception de matériaux biosourcés et existe depuis une cinquantaine d'années. Ses problématiques de recherche sont historiquement centrées sur les produits végétaux d'importance économique (la cellulose, la lignine et l'amidon). Elles se sont diversifiées et couvrent désormais différents domaines des glycosciences et les utilisations de la biomasse.
- Le **CERTES** (Centre d'Études et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes) de l'université Paris-Est Créteil et notamment deux de ses thématiques de recherche : QAI-STA (Qualité de l'Air Intérieur-Sources et Transfert des Aérocontaminants⁹) qui étudie la caractérisation des sources et des transferts impliqués dans la contamination de l'air intérieur ; OPTIMISTHE (Optimisation des propriétés thermiques des matériaux et inspection des structures par thermographie¹⁰) qui tout en travaillant sur le développement de matériaux innovants et sur des méthodes de diagnostic in-situ, s'intéresse largement aux matériaux biosourcés.
- Le **LMDC** (Laboratoire matériaux et durabilité des constructions¹¹) de l'INSA Toulouse et de l'université Toulouse 3 Paul-Sabatier qui positionne ses travaux dans une dynamique de « développement durable et une gestion écoresponsable du patrimoine immobilier, infrastructures de génie civil et habitat ». La présentation de

⁸ Source : <https://polynat.eu/fr/nos-centres-de-recherche/> ; et <https://cermav.cnrs.fr/le-laboratoire/>

⁹ <https://www.certes-upec.fr/qai-sta/>

¹⁰ <https://www.certes-upec.fr/optimisthe/>

¹¹ <https://www.lab-lmdc.fr/recherche/>

l'ensemble des publications du LMDC (thèse et articles) au sein d'une collection HAL¹² facilite l'identification et l'accès à des ressources documentaires en libre accès.

A. Groupe de recherche MBS : Exemple de recherches en cours

Créé en janvier 2020, le Groupe de recherche Matériaux de Construction BioSourcés (GdR MBS¹³) est principalement rattaché à l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (INSIS), institut de recherche fondamentale du CNRS. Les problématiques abordées par le GdR s'articulent autour de trois axes de recherche sur les MBS :

- Transformation, caractérisation et mise en œuvre des MBS par le développement des connaissances spécifiques à ces matériaux, mais aussi à celles relevant de la compatibilité avec les matériaux conventionnels ;
- Propriétés multiphysiques des MBS et notamment les questions de transferts hydrauliques et thermiques et de porosité des surfaces et des matériaux ;
- Durabilité, afin de promouvoir le développement des MBS auprès des différentes catégories d'utilisateurs, des producteurs aux assureurs.

Les travaux réalisés via ces problématiques de recherche constitueront à l'avenir une importante banque de données pour :

- identifier les relations entre les propriétés intrinsèques des bioressources et les propriétés d'usage des matériaux de construction produits ;
- aider tous les acteurs reliés aux agroressources et bioressources ainsi qu'à la construction à évaluer les intérêts sociaux et économiques du développement des biosourcés dans la construction et à les valoriser dans d'autres domaines (notamment en termes d'emplois, sanitaires et de confort).

En plus de ces objectifs scientifiques, des actions de diffusion sont réalisées :

- organisation de colloques ;
- mise en place d'écoles thématiques et de modules d'enseignements (ingénierie des matériaux et génie civil), création d'une plate-forme interactive et le développement.

Enfin, plusieurs thèses sont centralisées autour du GDR sur les biosourcés, dont 27 ont été soutenues, 25 sont en cours en 2022, soit au moment de la rédaction de ce rapport¹⁴, dont de nombreux travaux prenant en compte les questions énergétiques et plusieurs traitants spécifiquement des isolants biosourcés qui sont intégrés au présent état de l'art.

¹² <https://www.lab-lmdc.fr/production-scientifique/>

¹³ Site internet : <https://gdr-mbs.univ-gustave-eiffel.fr/accueil/>

¹⁴ Thèses en cours sur les biosourcés : <https://gdr-mbs.univ-gustave-eiffel.fr/theses-et-projets/theses-en-cours/>

B. CEREMA : des projets de recherche sur les matériaux biosourcés

Le Cerema¹⁵, en tant qu'expert sur les problématiques d'environnement, d'infrastructure, de climat et d'énergie, intervient régulièrement sur le sujet des matériaux biosourcés. Les équipes du Cerema sont impliquées dans plusieurs projets de recherche sur les propriétés et l'utilisation des matériaux biosourcés, notamment **EcoTerra**¹⁶, destiné à évaluer les performances acoustiques du composite terre-chanvre, qui présente notamment de bonnes performances isolantes et un faible impact carbone, de manière à favoriser leur utilisation dans la construction.

1. ACLIBIO¹⁷ : étude du vieillissement des MBS

Afin de répondre aux différents enjeux techniques, socio-économiques et environnementaux du secteur du bâtiment, l'objectif du projet ACLIBIO est d'évaluer l'évolution dans le temps des performances de plusieurs types d'isolants biosourcés, en prenant notamment en compte les prévisions de réchauffement climatique pendant les prochaines décennies. En effet, si les mécanismes de vieillissement des isolants biosourcés sont actuellement peu étudiés, on peut s'interroger sur une potentielle accélération ou aggravation de leur vieillissement lorsqu'ils seront soumis à des climats plus chauds et plus humides, et exposés à des événements climatiques exceptionnels.

Ce projet fait partie des 11 lauréats de l'appel à projets recherche « vers des bâtiments responsables » lancé par l'ADEME¹⁸. Financé en 2020 pour une durée de 36 mois, il est coordonné par le CEREMA et implique : le CSTB, l'Université Gustave Eiffel, Pouget Consultants, le Pôle de compétitivité Fibres-Energivie¹⁹ et Karibati.

La méthodologie utilisée est pluridisciplinaire :

- une étude socio-économique sur l'utilisation d'isolants biosourcés ;
- l'analyse des scénarios de réchauffement climatique pour sélectionner un environnement prévisible en 2050 ;
- une caractérisation globale des performances des matériaux, de leurs propriétés microscopiques à leurs propriétés fonctionnelles, à l'état initial et après vieillissement des matériaux dans différentes conditions ;
- la modélisation du comportement hygrothermique en prenant en compte les résultats.

Il vise à :

- contribuer au développement d'un protocole de vieillissement adapté aux matériaux biosourcés ;

¹⁵ <https://www.cerema.fr/fr/mots-cles/materiaux-biosources>

¹⁶ Source : <https://www.cerema.fr/fr/actualites/ecoterra-projet-recherche-performances-betons-terre-chanvre>.

¹⁷ Source : <http://www.fibres-energivie.eu/fr/projet/aclibio>.

¹⁸ <https://presse.ademe.fr/2020/05/les-11-laureats-de-lappel-a-projets-recherche-vers-des-batiments-responsables.html>

¹⁹ Ce pôle de compétitivité est né en 2015, de la fusion des Pôles Alsace-Energivie et Fibres. Il est le seul pôle de compétitivité dédié aux matériaux pour le bâtiment.

- déterminer l'évolution des propriétés hygrothermiques de plusieurs typologies d'isolant ;
- évaluer leur impact sur le confort d'été et le confort d'hiver des bâtiments à l'horizon 2050.

Le Cerema est plus particulièrement impliqué sur ce dernier volet *via* la réalisation d'un large panel de simulations hygrothermiques.

La synthèse des résultats obtenus permettra de fournir des préconisations sur l'utilisation d'isolants biosourcés dans la construction que ce soit au niveau de leur formulation, de leur mise en œuvre ou de leur environnement d'usage. Le projet s'inscrit donc dans l'axe 2 de l'appel à projets de recherche « Vers des bâtiments responsables », correspondant à l'adaptation à long terme du bâtiment. Ainsi le projet apportera des réponses sur les capacités des isolants biosourcés à s'adapter au réchauffement climatique et sur leur durée de vie dans cet environnement.

2. EmiBio²⁰ : étude des émissions de COV par les MBS

Les IBS, matériaux naturels carbonés, sont sensibles aux variations hygrométriques et peuvent, selon des conditions de température et d'humidité particulières reliées aux systèmes constructifs et aux équipements auxiliaires, représenter un substrat favorable au développement de moisissures.

Si les connaissances des MBS sont bien établies concernant les paramètres d'intérêt classiques pour la construction, elles restent lacunaires pour ce qui est de l'**influence des matériaux biosourcés sur la qualité de l'air intérieur**, notamment en raison des **additifs possibles** (liants, biocides, retardateurs de flamme, etc.) et d'éventuels développements de **micro-organismes liés de potentielles variations hygrométriques excessives**. Les IBS pouvant contenir différents additifs pour maintenir leur stabilité et leur durée de vie, ils peuvent aussi émettre ou stocker des composés organiques volatils (COV) en raison de leur capacité à échanger avec leur environnement. Les moisissures sont également susceptibles d'émettre des polluants spécifiques (dont des toxines) sous forme de COV microbiens (COVm) qui sont capables, selon les systèmes constructifs, de migrer dans l'air intérieur.

Le projet EmiBio²¹ (Émissions des matériaux Biosourcés) est une recherche sur les polluants liés aux matériaux biosourcés dans les isolants en intérieur, afin d'évaluer leur impact sur la qualité de l'air. Elle est pilotée par le CEREMA et réunie différents partenaires scientifiques : l'Institut Mines-Télécom de Lille-Douai, l'Institut Mines-Télécom Atlantique, l'Université d'Artois, ainsi que l'Université de Picardie Jules Verne.

Initié à l'automne 2018 avec un cofinancement de l'Ademe et de la Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages (DHUP), il vise à constituer un socle de connaissance pour combler le manque relevé sur les IBS, surtout sur celui qui est le plus employé à l'heure actuelle en France (avec la ouate de cellulose) : de bois²². L'objectif est d'évaluer leurs émissions de COV, qu'il s'agisse de ceux issus des additifs contenus dans les matériaux

²⁰ <https://www.cerema.fr/fr/actualites/emibio-projet-recherche-emissions-materiaux-biosources>

²¹ Source : <https://www.cerema.fr/fr/actualites/emibio-projet-recherche-emissions-materiaux-biosources>. Consulté le 22/07/2022.

²² Source : <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/la-qai-a-l-epreuve-du-biosource.42154>. Consulté le 24/07/2022.

biosourcés, de réactions chimiques secondaires, mais surtout ceux liés au développement potentiel de COVm et de vérifier si ces polluants peuvent être retrouvés ensuite dans l'air intérieur en quantité négligeable ou non

Le projet suit ainsi en parallèle des mesures pour réaliser une étude comparative, les mesures étant effectuées sur site et en laboratoire sur des parois reconstituées à l'identique et dans des conditions contrôlées. :

- *in situ* des émissions de COV et COVm et des transferts hygrothermiques de deux bâtiments dont les murs périphériques ont été isolés par l'intérieur avec de la fibre de bois et/ou la ouate de cellulose :
 - Le premier site testé, la mairie de Moncheaux (Nord), a une structure en briques qui a été rénovée intégralement en 2014 avec la création d'une extension. Les murs existants ont été isolés en laine de bois avec ossature bois rapportée. L'équipe projet a étudié plus spécifiquement la salle des mariages ;
 - Le groupe scolaire Boris Vian (Carvin, Pas de Calais)), livré en 2012 et qui a été isolé lors de sa construction avec des isolants biosourcés, notamment la ouate de cellulose.
- En laboratoire, pour effectuer le **suivi des transferts hygrothermiques et des émissions des parois multicouches** recréées et placées en cellule expérimentale. Cette tâche vise à tester des parois identiques aux parois testées *in situ* mais dans des conditions hygrothermiques maîtrisées.

Les conclusions de l'étude sont les suivantes :

Les prélèvements microbiens réalisés ne mettent pas en évidence de risques indus de développement. Sur matériaux, les mesures montrent que la ouate de cellulose ne favorise pas le développement fongique, et que dans des conditions normales d'usage, la laine de bois non plus. Ce n'est qu'en cas d'humidité élevée (supérieure à 80 %) que l'on peut constater l'apparition de moisissures sur fibres de bois, tant sur matériau qu'en paroi reconstituée. Cependant, les conditions dégradées utilisées en laboratoire n'ont pas été rencontrées sur site. La structure du mur isolé en fibres de bois, respectant les règles de l'art et intégrant une membrane gérant l'humidité, ne se prête pas ici à l'apparition de condensation. Les mesures dans l'air ambiant ne font apparaître aucune source interne microbienne aux bâtiments testés.

Les analyses des COV présents montrent que les isolants étiquetés biosourcés ne sont pas plus émissifs que d'autres matériaux déjà présents dans la construction (notamment les éléments en bois brut ou reconstitué, comme les panneaux d'OSB), et que les composés émis ne peuvent pas être rapprochés d'une manière concluante de composés d'origine microbienne. Le rôle de l'humidité dans les émissions est mis en relief, ainsi, sur site, que celui de la température. L'absence d'espèce chimique spécifique du développement microbien ne permet pas d'envisager une signature microbiologique typique d'un matériau repérable dans les COV, ni à l'échelle des matériaux ni à celle des parois. Les aléas liés à l'usage des locaux (mobilier, produits ménagers émissifs, sources extérieures...) empêcheraient fort probablement une telle signature, si elle existait, d'être mesurée sur site, où les émissions des parois ne constituent pas l'influence prépondérante sur l'air intérieur et ne sont pas nécessairement représentatives de leurs constituants en raison des phénomènes d'adsorption/désorption de COV. (Caudron *et al.* 2022, 10)

Figure 5. Reproduction du complexe d'isolation du bâtiment associatif qui sera analysé en cellule expérimentale



Source image : <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/la-qai-a-l-epreuve-du-biosource.42154>

Cette étude très complète pourra être étendue par des expérimentations sur d'autres sites et en utilisant d'autres matériaux comme le béton de chanvre ou la paille dont l'emploi est en forte croissance.

3. Normes européennes (hEN) et documents d'évaluation européens (EAD)

Selon le règlement de l'UE sur les produits de construction, ceux-ci doivent être éprouvés comme étant adaptés à l'usage. Les spécifications techniques européennes pour l'évaluation des produits de construction sont des normes européennes harmonisées (hEN) et des évaluations techniques européennes (ETA) basées sur des documents d'évaluation européens (EAD). L'évaluation terminée est documentée par un marquage CE, qui est basé sur une déclaration de performance (DoP). Les lignes directrices européennes en matière d'agrément technique (ETAG), qui étaient utilisées comme documents d'évaluation avant l'entrée en vigueur du règlement de l'UE sur les produits de construction en 2013, peuvent continuer à être utilisées.

Les exigences relatives aux matériaux de construction (et donc également aux matériaux isolants) en ce qui concerne la résistance à la croissance des moisissures découlent des exigences fondamentales pour les constructions de bâtiments qui sont formulées à l'annexe I du règlement européen sur les produits de construction (RPC) publié en 2013. Les propriétés des matériaux de construction doivent garantir que les constructions de bâtiments peuvent répondre à ces exigences.

En ce qui concerne la croissance des moisissures, les exigences essentielles suivantes pour les constructions de bâtiments semblent pertinentes en ce qui concerne l'hygiène, la santé et la protection de l'environnement :

Au cours de son cycle de vie, une structure ne doit pas être une contrainte pour l'hygiène ou la santé. L'émission de substances dangereuses, de composés organiques volatils ou de particules dangereuses ne doit pas avoir un impact excessif sur la qualité de l'environnement.

Les normes harmonisées EN 13162 à EN 13171 s'appliquent aux isolants thermiques fabriqués en usine. Ces normes ne contiennent aucune exigence en ce qui concerne la résistance à la croissance des moisissures pour les matériaux d'isolation.

Les ETA sont généralement basées sur des documents d'évaluation européens (EAD), qui sont créés et délivrés par l'Organisation européenne pour les approbations techniques (EOTA). Les EAD pertinents pour les matériaux d'isolation sont énumérés dans le tableau 1. Les ETA peuvent également être délivrées pour des groupes de produits spécifiques sur la base de lignes directrices, mais uniquement si ces lignes directrices ont été créées et publiées avant l'entrée en vigueur du RPDC le 1^{er} juillet 2013. Les exigences relatives aux matériaux isolants en ce qui concerne la résistance à la croissance des moisissures s'appliquent principalement aux produits avec une ETA et sont basées sur les EAD suivants :

Tableau 1. Documents européens d'évaluation des matériaux d'isolation thermique

EAD	Titre	Journal officiel de l'Union européenne (JOUE)
040005-00-1201	Produits d'isolation thermique et/ou acoustique fabriqués en usine en fibres végétales ou animales	2016/C 054/14
040138-00-1201	Produits d'isolation thermique et/ou acoustique en vrac formés <i>in situ</i> en fibres végétales	2016/C 172/03
040456-00-1201	Matériaux isolants thermiques et/ou acoustiques en vrac formés <i>in situ</i> en fibres animales	2017/C 343/06

L'information concernant la durée de vie prévue/estimée (ALS) est de plus en plus nécessaire pour les produits de construction. Une durée de vie de 50 ans peut être supposée pour les matériaux d'isolation thermique faisant partie de l'enveloppe (thermique) du bâtiment. Cette hypothèse repose principalement sur l'Eurocode 0 (EN 1990) ; voir tableau 2.

Tableau 2. (CE 0) EN 1990 – Durée de vie utile indicative

Conception de la catégorie de la vie professionnelle	Durée de vie utile de conception indicative (années)	Exemples
1	10	Structures temporaires (1)
2	10 à 25	Pièces structurelles remplaçables, par exemple poutres de portique, roulements
3	15 à 30	Structures agricoles et similaires

4	50	Structures de bâtiment et autres structures communes
5	100	Structures monumentales, ponts et autres ouvrages de génie civil
(1) Les structures ou parties de structures qui peuvent être démantelées en vue de leur réutilisation ne devraient pas être considérées comme temporaires.		

Réflexion autour des évolutions normatives et réglementaires

Certains isolants, notamment ceux en fibres de bois sont hors cadre normatif en Allemagne, principalement parce qu'ils ne sont pas traités avec des biocides.

Néanmoins les isolants à base de fibres de bois peuvent être mis en œuvre selon les règles de dimensionnement et de construction en vigueur, du fait de l'absence de retour d'expérience négatif sur des très nombreuses années.

Si ces mêmes règles constructives sont applicables aux autres isolants biosourcés (mentionnés par le projet FNR [Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe] comme « ressources renouvelables » (Tywoniak, Staněk, et Richter 2019b)), ces derniers doivent passer des essais de résistance aux moisissures afin d'obtenir la classe 0 (Norme EN 846). La différence de traitement entre ces isolants biosourcés et ceux à base de fibres de bois est historique : ces derniers ont été produits initialement sans traitement biocide et ont été mis en œuvre en accord à la fois avec les savoirs et savoir-faire des matériaux bois et dérivés du bois, mais aussi avec les retours d'expérience qui ont concomitamment permis de faire évoluer les règles de construction.

Typiquement, comme il existe un savoir-faire et un recul sur les systèmes constructifs établis et que ces solutions sont robustes, les essais ne sont pas nécessaires sur les isolants considérés.

Aujourd'hui, c'est l'évolution des réglementations européennes qui impacte la réglementation allemande, en ce sens qu'elle demande aux fabricants d'effectuer de plus en plus d'essais afin de pouvoir apposer un marquage CE.

Cet exemple, qui nous invite à réaliser qu'il est possible de valider la pertinence de matériaux à partir des seuls retours d'expérience peut également nous faire réaliser qu'il est important de comprendre l'intérêt de déporter la charge des préconisations des seuls isolants. Les propriétés seules d'un matériau ne peuvent assumer la robustesse de l'ensemble d'un système constructif. Elles ne doivent donc pas être testées comme si le système était par défaut « inopérant » et engendrerait une situation de risque de sinistre, que ce matériau devrait précisément à la fois mitiger ou absorber.

4. Approche méthodologique et plan

La constitution d'un corpus documentaire initial de plus de 2 000 références relatives aux problématiques des contaminations fongiques dans les contextes constructifs montre que le sujet qui nous intéresse n'est en aucun cas un territoire vierge et ignoré de la science et des spécialistes. Ce qui est conforté par le bref tableau des équipes et projets dont les travaux sont spécifiquement orientés vers ce domaine, auxquels il faudrait ajouter ceux qui traiteraient indirectement de problématiques connexes, etc. Enfin, les expressions normatives et prescriptives, qui par nature ne peuvent que découler de connaissances et de pratiques préétablies, sont nombreuses et ont même pu faire l'objet de mise à jour récente, attestant de la percolation des connaissances nouvelles en direction des pratiques.

Cependant, bien des questions demeurent concernant la compréhension des phénomènes de contamination fongiques des isolants biosourcés (IBS) comme dispositif intérieur au bâtiment. Nous faisons l'hypothèse que les difficultés rencontrées dans l'établissement d'une intelligence satisfaisante de ces enjeux sont de deux natures.

La première relèverait de la pluralité des producteurs de cette connaissance et la trop forte viscosité de la circulation des acquis les plus récents des approches théoriques vers les plus pratiques et réciproquement. Ainsi des recherches fondamentales ont pu permettre la compréhension d'un phénomène sans qu'une solution ait pu ou puisse être proposée sur site. Et inversement, les situations dysfonctionnelles rencontrées ont pu être résolues par une adaptation des pratiques affaiblissant la pertinence de recherches fondamentales sur un point de blocage pourtant, un temps, majeur.

La deuxième tiendrait de la compréhension et de la juste prise en compte des décalages de paradigmes et de perspectives entre les différents types d'intervenants. Evidemment de nombreuses passerelles sont mises en place pour réduire ce décalage, Cependant, une parfaite analyse de certains phénomènes impliquera par nature des protocoles expérimentaux aux limites de ce qui est possible, comme par exemple des taux d'humidité proche de 100 % pendant de longues périodes, ou des réactions lors d'alternance pour observer les séchages, alors que les praticiens tenteront au maximum de s'éloigner de ces extrêmes et de créer des conditions stables.

Face à ce double constat, il nous a paru pertinent de dresser un état des lieux de ces connaissances acquises et en discussion, ainsi que de leur diffusion tout au long de la chaîne de production de savoirs et de leur mise en œuvre.

Partie 1 : En commençant par la dimension biologique et physico-chimiques nous avons souhaité proposer un socle commun de connaissances. Ainsi l'étude des typologies, puis des conditions de reproduction et de développement des micro-organismes en recentrant progressivement notre état de l'art vers les problématiques liées à la construction et aux IBS en isolation par l'intérieur. Si nous avons privilégié les approches faisant consensus, nous n'avons cependant pas masqué les éléments plus marginaux ni les problématiques liées aux conditions même de production de ces connaissances.

Partie 2 : Faisant fondation de ces études fondamentales, nous avons cherché à explorer l'ensemble des caractéristiques et des spécificités, propres ou non, des isolants biosourcés et à les confronter aux connaissances relatives au développement des micro-organismes présentées précédemment dans notre document. Nous proposons ici un tableau aussi complet que possible des comportements hygrométriques en fonction des particularités physico-chimiques des IBS.

Partie 3 : Enfin, l'étude des risques fongiques dans les contextes de mise en œuvre des IBS en ITI comporte ses spécificités propres que nous synthétiserons dans la perspective non de clore la question, mais au contraire de mettre en avant des démarches, méthodes et projets en détaillant des recherches menées in-situ et en laboratoire, espérant ainsi faire de la contrainte liée aux biosourcés une source de qualité pour les pratiques et les expérimentations.

La chaîne de production et de diffusion des savoirs dans les domaines de la physique et de la biochimie appliquées au secteur de la construction est l'une des plus longues mises en œuvre. L'approche par les matériaux biosourcés augmente l'hétérogénéité des acteurs et en faisant appel à des « savoirs traditionnels » ou des « savoirs pratiques », accroît sa complexité. Ce qui apparaît parfois comme un défaut ou une difficulté supplémentaire s'avère en fait comme souvent une richesse et une force pour l'ensemble du secteur en imposant la relativisation des savoirs, des méthodes et des pratiques dans l'intérêt de tous.

Partie 1. Études de la prolifération des micro-organismes sur les matériaux de construction

Dans la perspective de dresser d'un état des lieux des connaissances relatives à la contamination fongique dans les isolants biosourcés (IBS) en isolation par l'intérieur (ITI), nous présenterons en détail les typologies de micro-organismes concernés ainsi qu'une classification et une description des micro-organismes impliqués dans les problématiques de l'isolation et de la construction. Cette taxonomie reprise des sciences biologiques inclura la synthèse des connaissances sur les modalités de reproduction, de dissémination et de développement, et le rapprochement avec les cas les plus fréquemment observables en contexte constructif.

Nous exposerons ensuite les facteurs de croissance de ces micro-organismes : humidité, température, substrat et temporel, tels qu'ils sont considérés dans les approches expérimentales. Nous constaterons alors la possibilité d'un décalage entre les modèles expérimentaux les plus poussés et les cas applicatifs constatés.

Enfin, nous proposerons une présentation détaillée des protocoles expérimentaux en matière de collectes et de prélèvements en laboratoire et *in situ*, afin de disposer d'une vision synthétique et néanmoins complète des problématiques et des enjeux liés aux micro-organismes dans leurs approches fondamentales issues des sciences biologiques et physico-chimiques.

Il nous a paru nécessaire de compiler dans cette première partie une somme de connaissances assez large, en incluant des cas limites ou marginaux, afin de maîtriser les implications de ces derniers dans les procédés normatifs et prescriptifs tels que nous les discuterons en dernière partie et en conclusion.

L'accumulation d'eau dans les matériaux impacte certaines de leurs propriétés physiques. Des niveaux excessifs d'eau peuvent conduire - dans certains cas - au développement de micro-organismes (comme des bactéries, des moisissures, microalgues, etc.). Les facteurs favorisant leur développement varient selon (ANSES 2016 ; Stefanowski, Curling, et Ormondroyd 2017 ; Tobon Monroy 2020) :

- Certaines conditions environnementales auxquelles ils sont exposés : température, humidité, milieu confiné (les courants d'air les dessécheraient) ;
- Différentes caractéristiques :
 - Celles, physico-chimiques, du matériau substrat tout d'abord : rugosité de sa surface, type de porosité et hygroscopicité, mais aussi pH de surface, espèces ioniques et sels nutritifs, etc. ;
 - Mais aussi celles propres à l'espèce fongique, car les micro-organismes à l'origine des moisissures peuvent exhiber des réponses physiologiques variables aux paramètres environnementaux : elles colonisent principalement les matériaux lignocellulosiques, elles peuvent se développer dans des substrats de natures et de compositions différentes ;

- Différents autres paramètres : quantité d'oxygène présent, luminosité, temps d'exposition aux conditions susmentionnées.

Figure 6. Contaminations insolites



À droite : Infestation et progression d'une moisissure du genre **Aspergillus** (Source : https://www.merule-expert.com/file/si2131725/ASPERGILLUS_2-fi31902932x350.jpg)

À gauche : Attaque de mobilier, tissus, bois, tapis par une moisissure du genre **Aspergillus** (source : https://www.merule-expert.com/file/si2131725/ASPERGILLUS_1-fi31902934x350.jpg)

Les moisissures à l'intérieur des habitations touchent le monde entier. Les USA semblent le premier pays à avoir pris des initiatives après la mort, en 1994, de neuf bébés dans des maisons où des moisissures toxiques, des champignons microscopiques (micromycètes), étaient apparus à la suite d'une inondation²³. Et la prolifération fongique peut s'effectuer dans les logements sans que leurs occupants s'en rendent compte.

Le terme de « moisissures » désigne communément les taches qui apparaissent à un stade avancé de développement de micro-organismes sur les aliments ou dans l'habitat et ayant une texture laineuse, poudreuse ou cotonneuse (ANSES 2016, 33). Elles se développent sur différents éléments du bâti (cloisons, isolants, les faux plafonds, etc.), et peuvent toucher tous les matériaux.

Il est important de noter que cette pollution biologique peut tout aussi bien provenir des poussières induites par l'activité dans les bâtiments ou amenées de l'extérieur par le vent et les aérations, ou par l'homme (particules de salive, gouttelettes nasales, squames de peau). Les surfaces intérieures, lorsqu'elles sont trop humides, deviennent alors des sites majeurs de croissance microbienne une fois contaminés (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016).

Cette partie de l'état de l'art se concentrera donc sur l'évaluation de la prolifération microbienne et l'étude de conditions et de facteurs provoquant l'apparition et la prolifération de micro-organismes sur et au sein de matériaux de construction dans l'environnement intérieur de bâtiments. Cette section tente une synthèse d'une littérature très riche sur le sujet. Elle s'appuiera notamment sur plusieurs états de l'art constitués au sein d'études et de rapports (par exemple : (Bex *et al.* 2007 ; ANSES 2016)), un ouvrage conséquent (Jones et Brischke 2017b), de nombreux articles²⁴ et thèses doctorales. L'une d'entre elles est consacrée à l'élaboration de revêtements pour des matériaux de construction visant à lutter

²³ Source : <https://www.merule-expert.com/moisissures>. Consulté le 23.07.2022.

²⁴ Ne seront mentionnés ou étudiés ici qu'une sélection ciblée d'articles parmi les 123 que nous avons identifiés traitant de la prolifération microbienne dans le bâti.

contre la prolifération microbienne à l'intérieur des bâtiments (Thomas Verdier 2015), d'autres sont dédiées à l'étude du potentiel (ou susceptibilité) de développement de micro-organismes dans les matériaux biosourcés (Simons 2018 ; De Ligne 2021) ainsi qu'aux dynamiques de colonisation des matériaux de construction par les micromycètes (champignons microscopiques) (Paic Lacaze 2016), ainsi l'évaluation de leur prolifération dans la rénovation de bâtiments (Tobon Monroy 2020). Très souvent, l'impact sur la qualité de l'air intérieur est la problématique centrale ou à l'origine de ces recherches, ce qui souligne l'importance du lien entre QAI et développement microbien sur les matériaux. De nombreux articles de revues traitent des caractéristiques du développement fongique. Nous en citerons un nombre restreint, circonscrit à notre domaine d'étude.

La première section de cette rubrique se focalisera sur :

- Les phénomènes et conditions induisant le développement de micro-organismes sur les surfaces et au sein de matériaux de construction ;
- Les micro-organismes les plus représentés sur différents types de matériaux (dont quelques IBS²⁵) ;

Dans une deuxième section, nous présenterons un relevé de différents facteurs déterminants pour la croissance microbienne sur matériau.

Enfin, nous introduirons différentes méthodes de prélèvements et d'analyses utilisées.

1. Généralités sur les micro-organismes rencontrés dans le bâti

Les micro-organismes sont des organismes invisibles à l'œil nu présents de manière ubiquitaire y compris dans des environnements aux conditions physico-chimiques extrêmes²⁶ (Halbwachs et Simmel 2018). Ils sont impliqués dans de nombreux processus écologiques de leur habitat, qu'il s'agisse de processus physiques, chimiques ou encore biologiques (Simons 2018, 34).

A. Présentation et impact sanitaire

Les effets néfastes causés par les micro-organismes sur les matériaux de construction ont été largement rapportés depuis des années, mais ils sont encore examinés étant donné la complexité des multiples phénomènes en jeu et la difficulté de les étudier. Entre 20 % et 40 % des bâtiments du nord de l'Europe et de l'Amérique du Nord sont contaminés par la croissance de moisissures visibles dans l'environnement intérieur et plusieurs centaines d'espèces bactériennes et fongiques ont déjà été identifiées et une trentaine de genres sont retrouvés régulièrement en milieu intérieur (Bex *et al.* 2007).

Les moisissures sont capables de synthétiser des substances chimiques (mycotoxines, composés organiques volatils microbiens (COVm)) qui sont contenues dans les spores ou libérées directement dans l'air (ANSES 2016, 33). Il s'agit de l'une des principales causes de la dégradation de la qualité de l'air intérieur (QAI), et elle contribue notamment au développement du syndrome du bâtiment malsain (SBM). En induisant des réactions allergiques et des infections superficielles ou systémiques : maladies respiratoires et

²⁵ Étant donné la rareté des études spécifiques consacrées à la prolifération fongique sur les IBS,

²⁶ Certains champignons pouvant s'adapter par exemple à des biomes aussi contrastés que les régions arctiques et les forêts tropicales humides.

cutanées entre autres (Fung et Hughson 2003 ; Mendell *et al.* 2011), de nombreuses espèces fongiques et bactériennes peuvent produire un large éventail de contaminants qui sont soupçonnés d'être nocifs pour la santé humaine (Dillon *et al.* 1999 ; Santucci *et al.* 2007 ; Bellanger *et al.* 2009) :

- Des spores ;
- Des fragments fongiques ;
- Des mycotoxines ;
- Des endotoxines ;
- Des glucanes ;
- Et des COVm.

Une exposition fréquente à ces contaminants par inhalation peut ainsi conduire à de irritations, des intoxications, des infections superficielles ou systémiques, des allergies et d'autres problèmes respiratoires et cutanés (ASEF 2012 ; Brian Flannigan, Samson, et Miller 2017). D'autre part, l'impact économique et social qui en résulte peut être considérable (B. Gutarowska et Żakowska 2002 ; Mudarri et Fisk 2007).

Cependant, une relation de cause à effet directe entre l'infestation de moisissures dans les espaces intérieurs et ses effets spécifiques sur la santé est difficile à établir (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016 ; Al Hallak *et al.* 2023). Selon le rapport technique allemand DIN 4108-8 : 2010, par mesure de précaution, la croissance de moisissures dans les espaces intérieurs doit être évitée en raison d'éventuels effets toxiques et d'allergies et, si elle est présente, doit être éliminée immédiatement.

Tableau 3. Tailles et exemples de particules microbiennes intérieures avec la voie d'entrée correspondante dans le système respiratoire humain (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016)

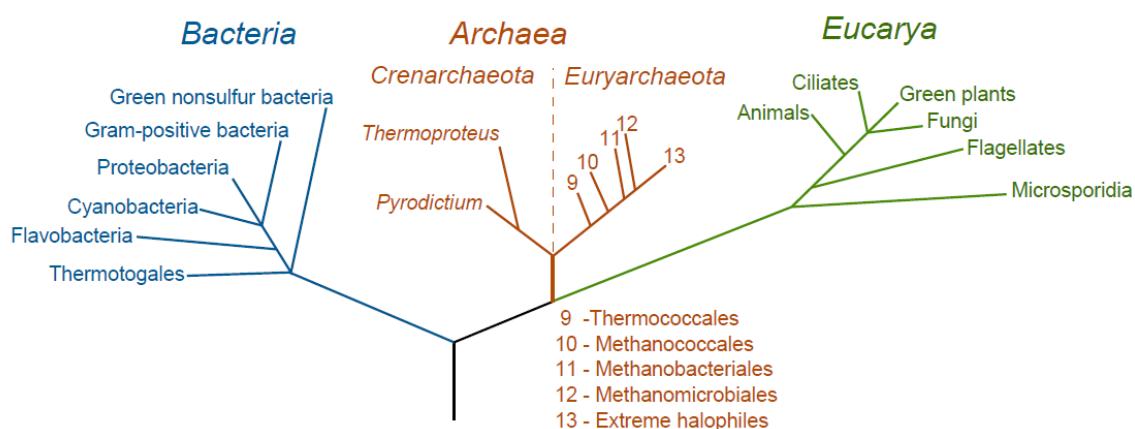
Size of particle	Example	Route of exposure
30-60 µm	Dust or fibres containing adsorbed microorganisms	Filtered by nasal cavity
10-20 µm	Pollen, hyphae fragments, inert particles with adsorbed microorganisms	Deposit on the major airways (primary and secondary bronchi)
0.5-5 µm	Size of most microorganisms, spores (majority of fungal spores present in indoor environment), etc.	Truly respirable particles that can penetrate the distal alveoli and respiratory bronchioles of the lungs.
<1.00 µm	Fungal fragments (Submicrometre-sized fragments), molecules (mVOCs*, mycotoxins, etc.)	

*mVOCs : composés organiques volatils microbien

B. Classification et présentation des micro-organismes

La taxonomie permet de décrire et classer les organismes vivants afin de les comparer les uns aux autres en les plaçant dans des niveaux taxonomiques hiérarchisés au sein desquels tous les organismes partagent des caractères spécifiques (Woese, Kandler, et Wheelis 1990). Les organismes vivants peuvent être classifiés en trois domaines : les *Archaea*, les *Bacteria* et les *Eucarya* (cf. Figure 7). Nous aborderons principalement dans les paragraphes suivants les deux taxons en rapport avec notre sujet : *Bacteria* et *Eucarya*.

Figure 7. Arbre phylogénétique universel (Thomas Verdier 2015)



L'amalgame est souvent fait entre moisissures et champignons. La division des *Fungi* du taxon des *Eucarya*, aussi appelés champignons, rassemble les micro-organismes les plus couramment identifiés lors de contaminations et dégradations de matériaux de construction en intérieur, et les plus représentés dans la littérature concernant l'origine de risques sanitaires et de pathologies du bâti (Anagnost 2011 ; Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016). Pour éviter toute confusion, gardons en tête que toutes les moisissures sont des champignons, mais pas l'inverse²⁷. Les champignons (*Fungi*) regroupent les organismes tels que les moisissures, les levures, etc. On désigne sous le nom de moisissures toute une série de champignons appartenant en réalité à des groupes taxonomiques très divers²⁸.

1. *Bacteria* - Les bactéries

Les bactéries sont des micro-organismes procaryotes, c'est-à-dire dépourvus de noyau, le plus souvent unicellulaires, se multipliant par reproduction asexuée aux dépens de substances nutritives et par division simple (scissiparité). Grâce à leur architecture complexe composée de structures et de fonctions diverses, les bactéries s'adaptent à des conditions très variées et dans une grande variété de milieux, parfois extrêmes, ce qui les rend abondantes dans tous les environnements ainsi que dans tous les organismes vivants. Cette

²⁷ La mérule (*Serpula lacrymans*), par exemple, n'est en aucun cas une moisissure. Les moisissures, des micromycètes, ont des modes de vie bien différents. On ne parle pas d'infection par les champignons, mais bien d'infestation. <https://www.merule-expert.com/publications>

²⁸ Source : <https://www.merule-expert.com/moisissures>.

forte adaptabilité leur confère en conséquence une infinité de types et de variétés (Thomas Verdier 2015). Deux éléments principaux les constituent (Thomas Verdier 2015) :

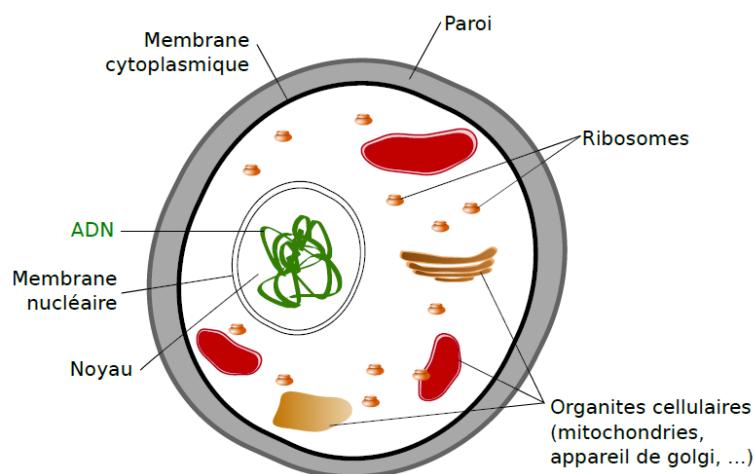
- La membrane cytoplasmique : elle gouverne les processus métaboliques essentiels (respiration, photosynthèse, etc.) ;
- La paroi externe : sorte de coque rigide, elle protège la bactérie contre les agressions extérieures (agents pathogènes, éléments chimiques, etc.)

2. Fungi – Les champignons

Du domaine des *Eucarya*, les Fungi (ou Fonges) également appelés Mycètes, regroupent les organismes appelés plus communément champignons. Il s'agit d'organismes uni- ou pluricellulaires eucaryotes, donc pourvus de véritables noyaux (Cf. Figure 8). Les Fungi, dont font partie les moisissures, qui n'appartiennent ni au domaine des plantes, ni à celui des animaux, constituent bien un règne à part (*Eumycota*) dans le monde vivant et ont des besoins spécifiques (Ritz 2005 ; Bex *et al.* 2007) :

- Aérobies, ils ont besoin d'oxygène pour se développer ;
- Contrairement aux végétaux (qui contiennent de la chlorophylle), les champignons en sont dépourvus et ne peuvent pas synthétiser leur matière organique à partir du CO₂ atmosphérique : ils doivent trouver leur source de carbone par le biais de matières organiques déjà synthétisées ;
- Hétérotrophes, ils doivent puiser dans le milieu ambiant l'eau et les substances organiques et minérales nécessaires à leur développement (comme la cellulose, dont est en partie constituée leur paroi). Pour cela ils dégradent la matière organique complexe grâce à l'excrétion d'enzymes et d'acides, puis ils en absorbent les composants digérés à travers la paroi perméable de leur appareil végétatif (hyphes et mycélium).

Figure 8. Schéma morphologique d'une cellule eucaryote (Thomas Verdier 2015, 21)



Parmi les champignons, on distingue (ANSES 2016) :

- les champignons microscopiques, ou micromycètes, qui sont rapidement rassemblés sous le terme de « moisissures » et qui ont été découverts grâce au microscope ;
- et les champignons avec fructifications visibles, ou macromycètes, sous forme de chapeau.

Sur la base d'analyses morphologiques, l'ensemble des champignons était réparti en cinq ordres (Méheust 2012, 19-20). Mais les moisissures qui prolifèrent sur les matériaux de construction et les surfaces à l'intérieur des édifices sont souvent de l'ordre des *Deutéromycètes*²⁹ ou *Fungi imperfecti*.

Ces deux catégories de fungi regroupent une multitude d'espèces qui nous intéressent particulièrement :

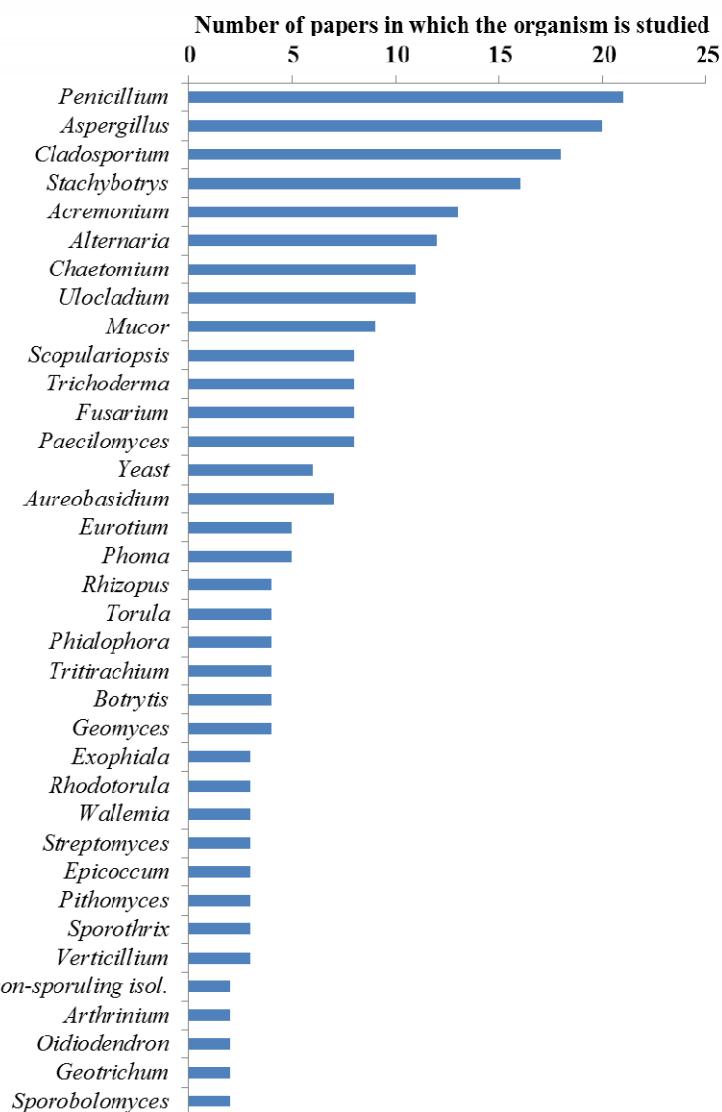
- Ceux qui causeront des dégâts plutôt esthétiques (mais pouvant entraîner des impacts sanitaires et pour certains, s'ils restent dans des conditions propices faciliter la décomposition) : les champignons lignicoles ;
- Ceux qui engendreront des attaques des fibres et des structures des matériaux pouvant amener à leur décomposition/destruction : les champignons lignivores.

3. Typologie des apparitions les plus fréquentes

La Figure 9 (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016) illustre une synthèse des genres de micro-organismes les plus fréquemment identifiés sur des matériaux de construction parmi 23 études. Les micro-organismes recensés ne concernent que des surfaces intérieures ou des matériaux au sein des systèmes constructifs (les mesures de l'air et de la poussière ont été retirées pour cette analyse). Les types de matériaux étudiés dans la littérature ne sont pas spécifiés ici, mais seront abordés plus loin.

²⁹ « [...] bien que cette taxonomie soit artificielle, les critères de classification des Deutéromycètes (basée sur le mode de production des spores asexuées ou conidies) sont toujours utilisés dans la pratique comme éléments d'identification des contaminants de l'environnement intérieur. La plupart des moisissures appartenant anciennement aux Deutéromycètes ont été classées à l'aide d'outils moléculaires dans les Ascomycota. Ce phylum regroupe plus de 65 000 espèces, soit 65 % de la diversité fongique décrite. » (Méheust 2012, 20).

Figure 9. Micro-organismes (genres) les plus fréquemment détectés et les plus étudiés dans 23 articles (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016)



Selon la Figure 9, les 5 genres les plus couramment détectés dans la sélection globale des 23 articles sont *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Stachybotrys* et *Acremonium*.

Les auteur.e.s de cette étude insistent sur les points suivants (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016) :

- Aucune information sur la fréquence de détection au sein des échantillons n'est donnée dans les études, bien que les occurrences de genres soient généralement plus élevées pour les micro-organismes les mieux classés (par exemple, *Penicillium* spp. et *Aspergillus* spp. sont détectés dans plus de 20 % des échantillons et jusqu'à 98 %, mais *Stachybotrys* spp., détecté dans 16 études, n'a pas été identifié dans plus de 20 % des échantillons) ;
- Différents types de micro-organismes peuvent être détectés sur le même matériau en fonction de la date d'échantillonnage (Lacaze *et al.* 2016) ;
- Les genres rarement détectés ne sont pas nécessairement absents des échantillons, mais n'ont peut-être tout simplement pas été recherchés dans les études : les

- fréquences de détection des différents genres sont donc liées à l'objectif de l'étude et dépendent de nombreux paramètres à garder à l'esprit : les méthodes d'échantillonnage et d'analyse, l'emplacement et le nombre d'échantillons, la saison d'échantillonnage (hiver/été), le type de matériaux, etc. ;
- Les genres les mieux classés (Figure 9) étaient les genres les plus détectés, mais aussi les plus recherchés ;

Reboux *et al.* ont constaté que la biodiversité sur les surfaces intérieures était 1,25 fois plus élevée que la biodiversité dans l'air intérieur. Tous ces micro-organismes sont capables de produire des contaminants dans des conditions favorables et les effets pathogènes sont déjà bien connus pour certaines espèces.

Avec ces premiers résultats les auteur.e.s mettent aussi en exergue que les comparaisons entre les études sur la colonisation fongique des matériaux de construction dans le bâti sont difficiles et doivent être interprétées avec prudence.

C. Reproduction, cycles de vie et développement : aperçu des dynamiques élémentaires

Les champignons s'adaptent à des conditions très variées (parfois hostiles) et dans une grande variété de milieux naturels (tropicaux ou arctique, par ex : (Halbwachs et Simmel 2018) ; désertiques (Hosseyni Moghaddam *et al.* 2021 ; Gostinčar, Zalar, et Gunde-Cimerman 2022) et construits. Il existe une très grande variété d'espèces fongiques, probablement plusieurs millions (ANSES 2016, 33).

2. Reproduction et dissémination

Les champignons (dont les moisissures) produisent des structures de reproduction appelées spores³⁰ ou conidies qui, une fois libérées, se retrouvent naturellement présents dans l'air et assurent leur dispersion et leur multiplication (ANSES 2016 ; Bex *et al.* 2007 ; Méheust 2012 ; D'Orazio 2012, 335) :

- Ces organes microscopiques (de 2 à 250 µm) sont d'une résistance remarquable : sortes de graines microscopiques extrêmement résistantes aux agressions extérieures servant à la dissémination des champignons lorsqu'elles se détachent ;
- Les spores sont formées à partir de cellules allongées et cloisonnées, les « hyphes » (filaments pluricellulaires). Celles-ci constituent l'appareil végétatif assurant le maintien, la croissance et la multiplication des champignons. Les hyphes peuvent s'associer pour former un réseau filamentaire plus épais : le mycélium, qui possède un grand pouvoir de pénétration et de dissémination dans le substrat colonisé. Il compose en majeure partie les taches ou colonies visibles à la surface des matériaux colonisés. L'ensemble du mycélium constitue le « thalle » des champignons.

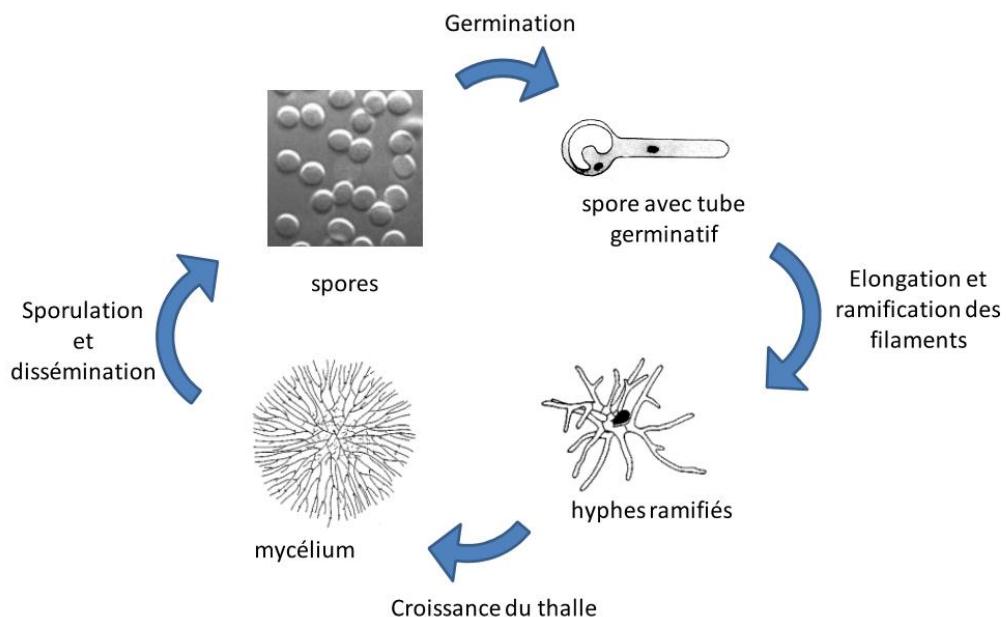
Les spores et fragments mycéliens disposent d'un nombre de vecteurs considérable : toutes les surfaces, mais aussi l'air de notre environnement extérieur et intérieur sont ainsi contaminés de fragments de mycélium ou chargés de spores en dormance qui sont disséminées et pénètrent dans les bâtiments via l'eau de pluie ou de ruissellement, par les

³⁰ Le mode de production des spores, observé directement au microscope en mycologie, est l'élément d'identification principal des genres et espèces fongiques (Bex *et al.* 2007, 33).

courants d'air, les systèmes de ventilations, les occupants ou bien les animaux et insectes³¹ (Bex *et al.* 2007 ; Anagnost 2011 ; CSTB 2015). Ils se posent alors sur toutes les surfaces accessibles.

La Figure 10 illustre leur développement (ou cycle de vie) en quatre phases principales : germination, croissance hyphale (croissance végétative), croissance du thalle (puis reproduction) et sporulation (Méheust 2012, 23 ; D'Orazio 2012, 335).

Figure 10. Cycle de vie des moisissures



(Méheust 2012) : 23, d'après www.aspergillus.man.ac.uk

Pendant la phase de germination, les spores se déposent sur les surfaces et restent inactives jusqu'à ce qu'elles puissent absorber l'humidité et les nutriments de la sous-couche (D'Orazio 2012, 335). Pour qu'elles puissent germer et se développer dans un matériau sous forme de mycélium, les spores nécessitent certaines conditions : une source de nourriture (le substrat : matériaux, poussières), un taux d'humidité adapté (variable selon les espèces), ainsi que d'autres facteurs que nous aborderons plus loin. Si le substrat ne fournit pas une nourriture et une hydratation adéquates, les spores ne germent pas.

Les champignons peuvent être saprophytes s'ils se développent sur de la matière organique inerte (c'est le cas des moisissures dans le bâti) ou parasites s'ils se développent sur du vivant à leurs dépens. Certains sont symbiotiques, car ils vivent en association à bénéfice réciproque avec d'autres organismes³² (Bex *et al.* 2007).

³¹ Insectes vecteurs : les scolytes peuvent transporter des spores et infecter un arbre ou du bois sur pied après la coupe ; les acariens et autres coléoptères peuvent transporter des spores (S.E. Anagnost 2011).

³² Les bactéries peuvent développer des relations mutualistes avec ces organismes, comme les bactéries de la rhizosphère associées aux racines de plantes fixant l'azote et utilisées par ces dernières en échange de sources carbonées (A. Simons 2018). Il s'agit aussi de la symbiose entre les racines d'arbres et de plantes et les champignons mycorhiziens : ils constituent une composante clef dans les relations plante – sol. Grâce à leur réseau mycorhizien, ils démultiplient la capacité des plantes à accéder à l'eau en l'échange des

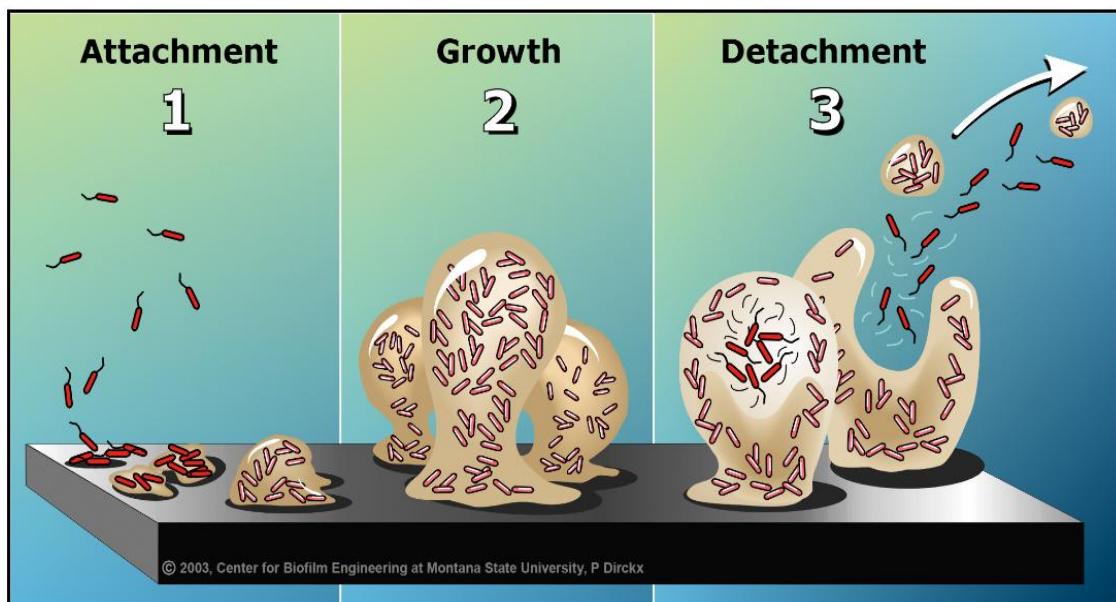
1. Biofilms

Les micro-organismes sont plus souvent fixés sur des substrats que flottant librement en milieux aqueux (Prescott *et al.* 2013). Lorsque les conditions humides se combinent avec de minces films de champignons et de bactéries formés à la surface, se développe un phénomène connu sous le nom de biofilm. Les biofilms sont généralement des couches visqueuses où des bactéries, des algues, des champignons ou des protozoaires s'associent et peuvent coloniser l'interface avec des matériaux de construction solides sans nécessairement affecter ce dernier (C. Brischke 2017, 254).

Cette forme d'organisation constitue une structure tridimensionnelle complexe dans laquelle les cellules adhérentes sont enveloppées dans une matrice extracellulaire polymérique (*Extracellular Polymeric Substance - EPS*) (Thomas Verdier 2015, 21). Elle fournit aux micro-organismes une résistance particulière vis-à-vis des agressions physiques et chimiques telles qu'un traitement biocide ou un changement brutal des conditions environnantes (Costerton *et al.* 1994 ; Davies *et al.* 1998 ; Prescott *et al.* 2013).

Les biofilms constituent un moyen de dissémination extrêmement efficace, car ils peuvent se former sur n'importe quel type de surface. Leur cycle de formation peut se regrouper en trois étapes principales (Center for Biofilm Engineering, s. d. ; Prescott *et al.* 2013) représentées sur la figure suivante (Figure 11).

Figure 11. Schéma de développement d'un biofilm (Center for Biofilm Engineering, s. d.)



nutriments produits par celles-ci grâce à la photosynthèse. Un autre exemple est celui des lichens, une association bénéfique entre des algues et des champignons.

- (1) adhésion au support (pré-conditionnement du substrat par les molécules ambiantes)
- (2) la maturation du biofilm et multiplication cellulaire
- (3) le détachement cellulaire (détachement des organismes) permettant la contamination de nouvelles surfaces

D. Décoloré, moisi ou pourri ? Différents dégâts d'origine fongique

Il est important ici de dégager un point crucial : si jusqu'ici nous avons abordé les études sur les micro-organismes colonisant les matériaux de construction sans distinction de leurs impacts sur les matériaux, car leur impact délétère sur la QAI et la santé est reconnu, ils n'entraînent pas tous une détérioration ou une décomposition des matériaux atteints. De manière générale, les champignons dégradent les matériaux lignocellulosiques pour se nourrir, en produisant des enzymes spécifiques et chaque espèce dégrade préférentiellement la lignine et/ou la cellulose, ou encore les sucres dissous à l'intérieur des cellules, provoquant en conséquence dans les matériaux des dégâts différents, qui se distinguent en deux grands types de dégradations³³ :

- L'altération des composés des membranes cellulaires du bois (la lignine, et/ou la cellulose), ce qui modifie profondément les propriétés mécaniques du matériau attaqué ;
- L'altération des contenus des cellules (leurs substances nutritives), sans provoquer d'autres dégâts que des tâches ou des défauts de colorations, superficiels ou non.

Dans le premier cas, on parle de champignons de décomposition du bois ou composteurs (lignivores), qui est en fait une simplification, car selon la variété, ils peuvent décomposer l'hémicellulose, la cellulose et/ou la lignine, simultanément ou successivement (Brischke et Jones 2017). Ils sont susceptibles de causer des dégâts importants liés à une pourriture grave accompagnée d'une perte remarquable de masse et de résistance (S.E. Anagnost 2011). Il existe trois grands types de pourriture, distingués par l'aspect que prend le bois lorsqu'il est attaqué : la pourriture cubique, la pourriture blanche fibreuse et la pourriture molle (Anagnost 2011) :

- Pourriture brune ou cubique (champignons *Basidiomycètes*) ;
- Pourriture blanche fibreuse (champignons *Basidiomycètes*) ;
- Pourriture molle (champignons *Ascomycètes* et *Deutéromycètes*).

Dans le second cas, on parle de champignons lignicoles, ou de décoloration ; on y retrouve des moisissures responsables du bleuissement, ainsi que quelques champignons d'échauffures, dont l'action peut se transformer en pourriture³⁴ si les conditions de leur développement ne sont pas modifiées ou s'ils elles s'accentuent. Les moisissures n'ont en réalité pas de statut officiel dans la classification générale des champignons. Elles constituent un regroupement hétérogène d'organismes microscopiques liés à une altération visible des matériaux dans l'habitat (Bex *et al.* 2007) et dont la plupart sont représentés dans l'habitat par :

³³ Source : CTBA, fiches pratiques, <https://www.ctbaplus.fr/fiches-pratiques/champignons-degradant-bois-en-oeuvre/>. Consulté le 18.07.2022.

³⁴ Source : CTBA, fiches pratiques, <https://www.ctbaplus.fr/fiches-pratiques/champignons-degradant-bois-en-oeuvre/>. Consulté le 18.07.2022.

- les *Deutéromycètes* (sur les 16 000 espèces recensées, une soixantaine se rencontrent fréquemment dans l'habitat, dont trois genres sont présents dans 90 % des logements : *Cladosporium*, *Penicillium* et *Aspergillus*) ;
- et en petit nombre par des *Zygomycètes* (*Mucorales*), des *Ascomycètes* et *Basidiomycètes*.

Nous verrons plus loin que plusieurs types de colonisations fongiques peuvent s'enchaîner au fil du temps, voire se superposer en fonction des conditions environnementales et des compétitions pouvant s'opérer entre les souches de champignons. Selon celles-ci, les dégâts sur les matériaux peuvent aussi varier.

Champignons lignicoles et lignivores font référence à des groupes complètement différents. C'est la différence qui est faite en anglais³⁵ entre *mould* (ou *mold*) et *decay fungi* soit, traduit littéralement, entre *moisissures* et *champignons décomposeurs* ou destructeurs. Il s'agit pour ces derniers de ce que l'on nomme également « pourriture du bois » ou champignons xylophages.

La contamination fongique fait souvent référence au bois, mais s'applique à tous les matériaux lignocellulosiques, donc la plupart des IBS (excepté les fibres animales), car la cellulose et l'hémicellulose sont les principaux composants des parois cellulaires des plantes : le coton, le lin, le chanvre sont composés de cellulose quasi pure, la part de cellulose dans le bois atteint presque 50 %, le roseau et la paille en comptent 30 %³⁶.

Dans cette section, nous ne donnerons qu'une brève description des paramètres les plus pertinents liés à la décomposition de certains lignocellulosiques. La pourriture humide (champignons lignivores) fait souvent référence aux champignons spécifiques appelés *Coniophora puteana* ou encore à la virulente *Serpula Lacrymans* (un type de mérule, un champignon brun cubique dit « du pourrissement »). La moisissure, quant à elle, est un terme générique qui désigne des milliers de champignons tels que *Stachybotrys* (moisissure noire), *Cladosporium*, *Bipolaris* et *Aspergillus*.

Tableau 4. Décoloration et destruction des champignons qui attaquent le bois et d'autres matériaux de construction biosourcés (Brischke et Jones 2017)

Champignons destructeurs/composteurs (lignivores)			Champignons colorants (lignicoles)		Champignons de surface (moisissures /lignicoles)
Champignon à pourriture brune	Champignons à pourriture blanche	Champignons à pourriture molle	Champignons à tache bleue	Autres champignons de coloration	Ascomycètes, deutéromycètes
Basidiomycètes	Basidiomycètes (ascomycètes)	Ascomycètes, deutéromycètes	Ascomycètes, deutéromycètes	Ascomycètes, deutéromycètes	

³⁵ Source : <https://bj.thewelcomeplace.net/9818-the-differences-between-mold--wet-rot.html>. Consulté le 20.07.2022.

³⁶ La cellulose est le polysaccharide (des sucres complexes, polymères, appartenant aux hydrates de carbone) le plus répandu dans la nature. L'hémicellulose est un terme générique utilisé pour les autres polysaccharides contenus dans les parois cellulaires des plantes. Source : <https://toholz.wsl.ch/fr/bois-mort/decomposition-du-bois/chimie-du-bois.html>

Par exemple, <i>Coniophora puteana</i> ^{a,b} , <i>Serpula lacrymans</i> (ou Mérule), <i>Postia placenta</i> ^{a,b} , <i>Gloeophyllum trabeum</i> ^b , <i>G. sepiarium</i> , <i>G. abietinum</i> , <i>Antrodia vaillantii</i>	Par exemple, <i>Trametes versicolor</i> ^{a,b} , <i>Donkioporia expansa</i> , <i>Schizophyllum commune</i> , <i>Phanerochaete chrysosporium</i> ^m ,	Par exemple, <i>Chaetomium globosum</i> ^c , <i>Phialophora spp.</i> , <i>Monodictys spp.</i> , <i>Humicola grisea</i> ^c , <i>Petriella setifera</i> ^c , <i>Lecythophora mutabilis</i> ^c , <i>Trichurus spirale</i> ^c	Par exemple, <i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>Ceratocystis spp.</i> , <i>Ophiostoma spp.</i> , <i>Ceratocystiopsis spp.</i>	Par exemple, <i>Discula spp.</i> , <i>Arthrographis cuboidea</i> , <i>Chlorociboria aeruginosa</i>	Par exemple, <i>Paecilomyces variotii</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Trichoderma spp.</i> , <i>Bisporia spp.</i> , <i>Penicillium spp.</i>
--	--	--	--	---	--

^a Essai selon CEN/TS 15083-1 (CEN, 2015a).

^b Essai selon la norme EN 113 (CEN, 1996).

^c Essai selon ENV 807 (ENV, 2001).

Modifié à partir de (Schmidt 2006 ; Unger, Schniewind, et Unger 2001).

1. Les champignons lignivores (ou de pourriture)

Selon les types de champignons considérés, ceux-ci dégradent la lignine, la cellulose, ou les deux. La nature des supports (bois, papiers et autres matériaux cellulosiques) peut aussi influencer l'installation d'espèces adaptées, par exemple ligninolytiques (*Donkioporia expansa*, *Coriolus versicolor*, etc.) et/ou cellulolytiques³⁷ (*Serpula lacrymans* - ou Mérule -, *Coniophora* sp, *Chaetomium globosum*, *Trichoderma* sp..) (Bex et al. 2007). Le **Erreur !**

Source du renvoi introuvable. regroupe trois types de champignons qui diffèrent ainsi par la décomposition opérée du matériau, l'apparence extérieure du substrat (ils provoquent trois formes distinctes de pourriture) et, dans une certaine mesure, par les besoins physiologiques des champignons respectifs (Brischke et Jones 2017) :

- La pourriture brune appartiennent aux basidiomycètes ;
- La pourriture fibreuse blanche : est causée par les basidiomycètes et les ascomycètes ;
- Et la pourriture molle : comporte des ascomycètes et des deutéromycètes (dits « champignons imparfaits »).

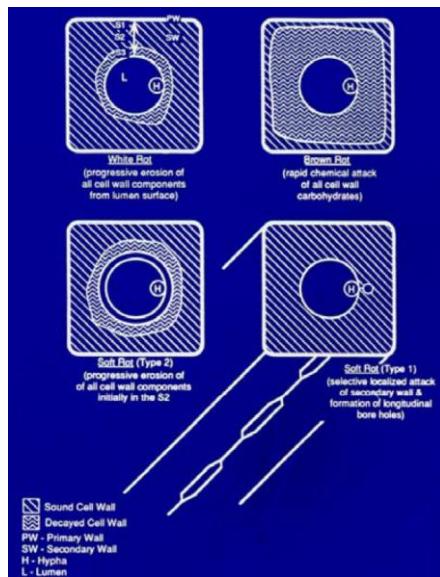
Cependant, il est possible que plus d'un type de pourriture se produise sur le même morceau de substrat, soit temporellement parallèle, soit en termes de succession. En effet, les champignons de pourriture cubique brune se développent à un taux d'humidité plus faible

³⁷ Un large éventail de micro-organismes existe, catégorisés aussi sous le nom de **cellulolytiques** pour ceux capables de dégrader l'amidon ou la cellulose (le bois, le bois composite, le papier peint, le carton, panneaux de gypse, etc.) et de **ligninolytiques** pour ceux qui attaquent préféablement la lignine. (Thomas Verdier 2015).

que les champignons de pourriture fibreuse blanche, qui eux même se développent à un taux d'humidité plus faible que les champignons de pourriture molle.

a) Effet de la pourriture sur les propriétés de résistance du bois

La pourriture provoque une perte de masse de 5 % à 10 %, et les propriétés de résistance mécanique peuvent être réduites de 20 à 80 %. Cependant les effets varient selon le type de champignon de désintégration et les essences de bois ou le type de fibres.



(S.E. Anagnost 2011)

b) Pourriture brune

Les champignons responsables de la pourriture brune dégradent principalement les hémicelluloses et la cellulose, mais pas la lignine. Ils détériorent toute l'épaisseur du matériau. Pour le bois, une fracturation dans les trois dimensions sous forme de cubes plus ou moins réguliers se forme et le bois brunit après attaque par l'un de ces champignons (seule la lignine, de couleur brune, reste)

Les Mérules sont les plus célèbres champignons de pourriture cubique brune, mais il en existe d'autres comme les Coniophores (*Coniophora sp.*) ou les Lenzites (*Gloeophyllum sp.*)



Mérule *Serpula lacrymans* colonisant un plancher



Coniophage



<https://totholz.wsl.ch/fr/bois-mort/decomposition-du-bois/les-pourritures-du-bois.html>

La pourriture brune est provoquée par les Basidiomycètes qui consomment de la cellulose et des hémicelluloses. Ils n'attaquent pas la lignine, mais entraînent une perte de résistance mécanique rapide. La forme caractéristique est celle d'une pourriture cubique ou de poche cubique et toujours, une pourriture sèche. On caractérise cette pourriture brune de « champignon de la pourriture du bâtiment ».

Figure 12. Exemple de pourriture brune



(S.E. Anagnost 2011)

c) Pourriture blanche

Les champignons de la pourriture blanche dégradent les hémicelluloses, la cellulose et la lignine, simultanément ou successivement et donne un aspect fibreux aux bois et a tendance à le blanchir.

La pourriture blanche est engendrée par des Basidiomycètes qui consomment de la cellulose, des hémicelluloses et de la lignine. Cependant, certaines espèces attaquent préférentiellement la lignine. La conséquence principale est une perte de force significative. La pourriture se manifeste en poche, avec une forme filandreuse ou spongieuse.

Figure 13. Exemple de pourriture blanche



(S.E. Anagnost 2011)

Les Astérostromes (*Asterostroma sp.*), le Polypore des caves (*Donkioporia expansa*) ou encore la Coriole multicolore (*Coriolus versicolor*) sont des champignons provoquant ce type de pourriture

Astérostroma



<https://abanco.fr/pourriture-du-bois/>

d) Pourriture molle

Les champignons de la pourriture molle constituent un type de pourriture distinct. Ils se nourrissent principalement de la cellulose, mais aussi la lignine, qui est néanmoins dégradée à un stade intermédiaire et, en général, plus lentement.

Contrairement aux champignons de pourriture brune, la pénétration reste superficielle.

La pourriture molle, dites aussi « Microfungi » est provoquée par les Hyphomycètes, Coelomycetes et Ascomycetes, qui consomment de la cellulose, des hémicelluloses et de la lignine. La dégradation est plus lente que la pourriture brune ou blanche, mais entraîne une perte de résistance importante et une érosion de surface du bois en service.

Figure 14. Exemple de pourriture molle



(S.E. Anagnost 2011)

Les Pézizes (*Peziza sp.*) et les Chaetomium (*Chaetomium sp.*) sont des champignons de pourriture molle.

Les sporophores de Pézize se développent, presque toujours, directement sur la maçonnerie



<https://abarco.fr/pourriture-du-bois/> ; <https://www.merule-expert.com/champignons-insolites>

2. Les champignons lignicoles

Les **champignons lignicoles** vivent sur les matériaux et modifient l'aspect esthétique du support sur lequel ils se développent (en entraînant des colorations par exemple), mais ne provoquent pas de destruction (ou pourritures) et n'altèrent pas les propriétés mécaniques des matériaux³⁸. Il en existe trois catégories : les échauffures, les champignons de bleuissement et les moisissures.

Les champignons lignicoles responsables de ces changements esthétiques appartiennent au groupe des « champignons imparfaits » et ont également le potentiel de provoquer des réactions allergiques et inflammatoires. Leur présence et la croissance des moisissures ne se limite ni à la construction ni aux matériaux organiques, les matières inertes peuvent être contaminées (Brischke et Jones 2017, 192).

³⁸ <https://www.ctbaplus.fr/fiches-pratiques/moisissures-bois/>

Tableau 5. Moisissures sur des surfaces lignocellulosiques

Les échauffures	Le bleuissement	Les moisissures
se limitent aux arbres sur pied, grumes et parfois aux arbres dont les coupes sont fraîches. Ils provoquent uniquement des taches sombres dont le contour est noir	se développent préférentiellement dans l'aubier du bois, où l'amidon est présent en grande quantité. Ils provoquent une coloration du bois en surface et en profondeur	présentent un panel de couleurs et de textures varié et se développent sur de nombreux substrats (sol, terre, cartons, murs, papier peint, etc.), parfois dès que leur taux d'humidité atteint 18 %.



Bleuissement



Stachybotrys

<https://abanco.fr/champignon-lignivore/>

Les moisissures se produisent sur des surfaces lignocellulosiques fraîches ou en service qui sont exposées à l'humidité. Habituellement, la croissance de moisissures se fait uniquement à la surface et ces dernières peuvent être enlevées. Il est remarquable que certaines moisissures puissent avoir la capacité de détoxifier les conservateurs (naturels ou traitements chimiques) et, dans ce cas, puissent fournir des conditions propices à la colonisation et à l'attaque du bois par les champignons de décomposition (S.E. Anagnost 2011).

Les champignons lignicoles ou « moisissures » peuvent se développer à la surface de toutes les essences lignocellulosiques à partir du moment où les conditions d'humidité sont

suffisantes. Les matériaux changent de couleur, mais leur solidité et leur résistance ne sont pas directement atteintes. Néanmoins, le développement des moisissures peut entraîner une augmentation de la perméabilité des cellules, une détérioration des conservateurs (naturels ou traitements) et ainsi, indirectement, constituer un terrain plus favorable au développement de champignons lignivores destructeurs. La section suivante vise à préciser les facteurs et conditions de la croissance des différents champignons selon des paramètres particuliers.

3. Les facteurs déterminants de la croissance microbienne sur les matériaux de construction : focus sur la croissance fongique

Cette section décrit différents facteurs de croissance, mais aussi de régression des champignons ainsi que les démontrent plusieurs travaux en laboratoire. Les résultats désignent en particulier le rôle prépondérant de l'eau, de la composition chimique et du pH des matériaux. La prolifération de moisissures sur et à l'intérieur des matériaux du bâtiment est fonction de davantage de facteurs qui ont été mis en évidence dans des études récentes (De Ligne 2021 ; Delannoy 2018 ; Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016 ; Tobon Monroy 2020). Les principaux paramètres rapportés dans la littérature comme étant les déterminants fondamentaux influençant la contamination et la prolifération fongique en relation avec un matériau support sont les suivants (D'Orazio 2012 ; Andersen *et al.* 2011 ; Krus *et al.* 2001 ; Sedlbauer 2001) :

- Activité de l'eau et humidité relative de l'air environnant le matériau ;
- Température ambiante ;
- Temps d'exposition ;
- Type de matériau disponible et/ou de poussière à sa surface (composition et nature chimique, présence d'une porosité ouverte, de surface rugueuse, etc.) ;
- Nature de la souche de moisissure ;
- Et autres facteurs (présence d'oxygène moléculaire, valeur de pH, lumière et exposition aux UV, interactions biotiques, etc.).

Plusieurs travaux, notamment (Schmidt 2006 ; Brischke, Bayerbach, et Otto Rapp 2006), ont souligné que :

- La correspondance entre ces facteurs et leurs conditions favorables au sein d'un milieu spécifique à une espèce fongique est cruciale pour sa croissance et sa reproduction ;

L'absence de l'un de ces facteurs favorables peut donc ralentir ou bloquer le développement fongique, voire faire disparaître son mycélium ou le rendre totalement inactif (mais toujours présent sous forme de spores). Ainsi la règle fondamentale de protection des matériaux de construction organiques (MBS et/ou IBS) est donc de s'assurer qu'au moins un des paramètres essentiels se situe en dehors de la plage requise pour son développement, par exemple :

- En éloignant l'humidité (le manque d'eau oblitérera le transport d'enzymes fongiques), mais aussi et de manière contre-intuitive,
- En évitant l'imprégnation avec des conservateurs toxiques, dont les substances nocives peuvent devenir à terme des sources nutritives potentielles (une fois dégradées au préalable par des bactéries ou des colonies fongiques spécifiques).

Nous aborderons donc les points suivants, lesquels ne constituent pas une liste exhaustive de paramètres influençant la susceptibilité fongique des matériaux, mais les plus représentatifs et étudiés :

- Les paramètres hygrothermiques :
 - Humidité (activité de l'eau (a_w), humidité relative (HR), humidité relative à l'équilibre (HRE), teneur en eau (MC), teneur en eau à l'équilibre (EMC), etc.) ;
 - Température.
- La prévalence des micro-organismes liés à certaines caractéristiques des matériaux :
 - Types de matériaux et souches fongiques ;
 - Nature chimique et pH du matériau ;
 - Propriétés de surface.

Tout d'abord, la plupart des études menées se concentrent sur les bâtiments humides et les matériaux endommagés par l'eau, car l'humidité - qu'elle soit induite par des événements de mouillage (une inondation, une mauvaise isolation ou ventilation défaillante, etc.) - est reconnue comme étant le paramètre le plus influent qui conduit à la croissance microbienne au sein des matériaux de construction (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016, 5). L'humidité augmenterait ainsi à la fois (Santucci *et al.* 2007 ; Andersson *et al.* 1997) :

- La concentration des micro-organismes sur les surfaces endommagées par l'eau
- Leur diversité ;
- Leur potentiel de dissémination dans l'air.

Pour rappel, les termes « hygriques » et « hydriques » font référence à des notions bien distinctes (Héberlé 2016, 10) :

- Le mot « hygrique » se rapporte à l'eau sous forme de vapeur d'eau ;
- Le mot « hydrique » désigne l'eau sous sa forme liquide.

La majorité des matériaux poreux sont capables de contenir de l'humidité selon les conditions de leur environnement ambiant et l'eau peut y être présente sous différentes phases au sein des pores du matériau. Il faut distinguer (Raiffaud 2017 ; Evrard et De Herde 2010) :

- L'eau « liée », fixée dans des structures physico-chimiques à l'intérieur des cellules et considérée comme « eau de constitution » et non disponible, car les molécules d'eau sont chimiquement intégrées à la structure poreuse ;
- De l'eau adsorbée quand une pellicule d'eau se dépose sur la surface des pores ;
- De l'eau capillaire quand certains pores se remplissent d'eau ;
- Et de l'eau « libre », circulant librement à travers les pores du matériau sous forme liquide et, par exemple, disponible pour des réactions de dégradation.

Nous simplifierons cette liste en « eau liée » et « eau libre » pour la suite :

- **L'eau liée** dans les parois cellulaires et la lamelle mitoyenne : elle est retenue par la formation de liaisons chimiques (hydrogènes) dans les parois ;
- **L'eau libre** qui se trouve dans les micropores des parois cellulaires et dans les vides : elle est retenue par les forces capillaires.

A. Paramètres hygrothermiques

1. Eau et activité de l'eau

Le développement des champignons et moisissures dans les environnements intérieurs repose sur des conditions favorables et notamment la présence d'humidité dans différents éléments du bâti (cloisons, isolants, structure en bois, faux plafond, etc.) et de différentes natures (lignocellulosique, minérale, etc.). Une humidité excessive peut être causée par : les remontées capillaires, les inondations et les dégâts des eaux, les façades insuffisamment imperméables à la pluie, la condensation alliée à une ventilation insuffisante (notamment dans les salles d'eau, les cuisines, les WC), tout comme les fuites et autres infiltrations d'eau. Ce sont là autant de facteurs qui favorisent la prolifération de la moisissure à l'intérieur des bâtiments.

La littérature s'accorde sur le fait que l'humidité est le facteur le plus déterminant de la croissance microbienne sur les matériaux de construction (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016, 9 ; Bex *et al.* 2007, 24 ; Simons 2018 ; Santucci *et al.* 2007 ; Tobon Monroy 2020) :

- Elle est primordiale pour déclencher le passage des micro-organismes en phase active de multiplication ;
- Elle conduit, lorsque sa quantité augmente, à une croissance de la concentration et de la diversification des micro-organismes à la surface des matériaux de construction ;
- Elle est essentielle, principalement à l'état liquide, pour les échanges transmembranaires et certaines réactions métaboliques au sein des cellules fongiques

a) Mécanismes liés à l'eau

Les mécanismes mis en jeu liés à l'eau dans la croissance fongique au sein des matériaux sont multiples. Au sein d'un matériau, de multiples forces sont mises en œuvre (Bex *et al.* 2007, 24), notamment :

- De gravité ;
- Capillaires ; d'absorption et d'osmose ;
- Électro-osmotiques.

Lorsque une molécule d'eau se fixe sur une surface, plusieurs mécanismes sont mis en jeu (Bex *et al.* 2007) :

- Diffusion de vapeur d'eau : mécanismes de transfert de l'eau entre le matériau et l'air³⁹
- L'adsorption physico-chimique mono et plurimoléculaire⁴⁰ : les quantités d'eau fixées par adsorption, qui représentent 3 à 4 couches de molécules d'eau, sont généralement très faibles ;

³⁹ La capacité des produits à être plus ou moins perméables à la vapeur d'eau se traduit également par leur perméance ou leur coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau.

⁴⁰ La molécule d'eau a une très petite taille (diamètre effectif égal à 0,3 nm) et peut se déplacer dans les pores les plus fins des matériaux, dont le comportement vis-à-vis de

- La condensation capillaire : les molécules d'eau sont confinées dans les volumes des pores, microspores et des connexions entre eux, ce qui explique la quantité d'eau importante adsorbée par les matériaux poreux. Ce phénomène (qui dépend de la température, de l'humidité environnante et de la taille des pores), peut conduire à la saturation en eau d'un matériau situé dans une ambiance très humide (> 98 %), même sans apport d'eau liquide.
- Le mouillage et la capillarité : concernent l'eau sous forme liquide.

L'eau contenue dans les matériaux peut ainsi être présente sous diverses formes classées ci-dessous par ordre décroissant de disponibilité pour un éventuel micro-organisme (Bex *et al.* 2007) :

- L'eau libre, pouvant généralement être extraite du produit par séparation physique ;
- L'eau capillaire ou adsorbée en surface ;
- La vapeur d'eau contenue dans les pores du produit ;
- L'eau liée ou de constitution impliquée dans les réactions chimiques, nécessaire à la fabrication du matériau.

Pour les micro-organismes, la croissance dans un milieu pauvre en eau nécessite alors plus d'énergie pour croître et par conséquent, ce minimum d'humidité sera susceptible de dépendre du type de matériau : plus le matériau contient de nutriments, plus le besoin en eau est faible (Thomas Verdier 2015).

Différents indicateurs liés à l'eau peuvent aussi être distingués et utilisés en ce qui concerne la prolifération des micro-organismes au sein des matériaux de construction (Thomas Verdier 2015 ; Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016 ; Simons 2018) :

- L'activité de l'eau (a_w) ;
- La teneur en humidité (MC pour « moisture content ») ;
- L'humidité relative (HR) ;
- Et l'humidité relative d'équilibre (HRE).

Le MC est lié à un matériau et peut être calculé comme la quantité d'eau qu'il contient.

L'HR est couramment utilisée pour décrire la quantité d'eau dans l'air. Le terme d'humidité relative d'équilibre est utilisé lorsqu'un bilan hydrique est atteint dans un système air-matériau et que l'humidité relative de l'air est égale à l'humidité relative du matériau.

Ces différents indicateurs seront abordés dans les paragraphes suivants.

b) Activité ou disponibilité de l'eau (a_w)

L'activité de l'eau sert à mesurer le statut énergétique de l'eau dans un produit et détermine la limite minimale d'eau disponible pour la croissance microbienne, pour laquelle elle joue un rôle important. Plusieurs études soutiennent que l'activité de l'eau est un meilleur indicateur de la croissance des moisissures sur les matériaux de construction que l'humidité relative ou la teneur en eau (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016 ; A.-L. Pasanen 2001). La

l'humidité dépend également de leurs caractéristiques dimensionnelles (surface spécifique : déployé de la surface de chaque paroi et constituants, volumes des microporosité vides dont la taille est < 0,1 µm, porosité totale, etc.) et de leur nature physico-chimique (hydrophobicité) (Bex *et al.* 2007).

température, le pH et plusieurs autres facteurs influencent le développement des micro-organismes, mais l'activité de l'eau constitue le facteur le plus déterminant.

L'activité de l'eau (a_w ou Aw) est un indicateur qui provient initialement du domaine de la sécurité alimentaire, où son impact significatif sur la croissance microbienne est étudié depuis de nombreuses années (Ayerst 1969 ; Mugnier et Jung 1985 ; Corry 1987 ; Gibson *et al.* 1994 ; Sautour *et al.* 2001 ; Parra et Magan 2004 ; Leong, Hocking, et Scott 2006)⁴¹.

En effet, les microbiologistes l'utilisent afin de décrire l'eau disponible pour les micro-organismes dans les solides ou les liquides (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016), tandis que l'HR représente la teneur en eau dans un milieu gazeux en équilibre. La sensibilité d'un substrat à la contamination microbienne dépend dans une large mesure de l'activité de l'eau du matériau (Thomas Verdier 2015, 44), qui est elle-même directement liée à son hygroscopité.

L'activité de l'eau perturbe la pression exercée sur la cellule d'un micro-organisme (Brown 1976 ; Scott 1957)

De plus, la disponibilité de l'eau et la température sont évidemment interdépendantes (Grant *et al.* 1989 ; Ayerst 1969) :

- L'augmentation de la température entraîne une réduction des besoins en eau des moisissures ;
- La température a un effet sur le taux de croissance fongique sur le milieu de culture, donnant des températures optimales pour différentes espèces de moisissures (d'orazio *et al.* 2014).

Le tableau ci-dessous montre les variations de l'exigence de certaines espèces qui avaient poussé sur des papiers de copeaux de bois peints en émulsion. Les auteurs ont également souligné que ces valeurs étaient considérablement plus élevées que sur un milieu de culture pour les deux températures (Grant *et al.* 1989). Les informations présentées ci-dessous mettent en évidence l'influence combinée de l'eau, de la température et de la teneur en nutriments sur la croissance microbienne sur les matériaux de construction (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016).

Tableau 6. Valeurs de l'activité de l'eau requises pour que des moisissures sélectionnées se développent (sur du papier de copeaux de bois recouvert d'une émulsion de spores)

Espèces de moisissures	12 °C	25 °C
<i>Aspergillus versicolor</i>	0,87	0,79
<i>Cladosporium cladosporioides</i>	0,91	0,93
<i>Cladosporium sphaerospermum</i>	0,96	0,93
<i>Penicillium brevicompactum</i>	0,87	0,84
<i>Penicillium chrysogenum</i>	0,87	0,84
<i>Penicillium spinulosum</i>	0,87	0,97
<i>Stachybotrys atra</i>	0,96	0,98
<i>Ulocladium chartarum</i>	0,96	0,98
<i>Ulocladium consortiale</i>	0,98	0,97

⁴¹ (Thomas Verdier 2015)

D'après Grant & al. (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016).

En plus d'affecter la croissance microbienne, l'eau disponible affecte également la production de composés organiques volatils par des micro-organismes (COVm) (Ayerst 1969))

Lorsque l'équilibre hydrique est atteint dans un système, l'activité de l'eau (a_w) représente la quantité d'eau disponible pour les moisissures (Joblin 2011 ; Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016). Elle est définie, dans le matériau, comme le ratio (ou rapport) de la pression partielle de vapeur d'eau sur la pression de l'eau pure (pression de vapeur saturante) à la même température. Elle est représentée dans l'équation suivante (Tobon Monroy 2020, 20) :

$$Aw = \frac{p}{p_0}$$

Avec :

p = Pression de la vapeur d'eau présente dans le matériau

p_0 = Pression de la vapeur d'eau pure (saturante)

L' a_w s'exprime par un nombre sans dimension compris entre 0 et 1. Les micro-organismes se développent préférentiellement lorsque les valeurs de a_w sont élevées et voisines de 1.

L'humidité relative de l'air faisant référence à la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air $p(vap)$ par rapport à la capacité de vapeur d'eau maximale (saturée) que l'air peut contenir $p(sat)$. L'HR dépend de la température et de la pression (Tobon Monroy 2020) :

$$HR = \frac{p(vap)}{p(sat)}$$

Dans un système à l'équilibre, l'HR de l'air correspond à l'HR de la surface du matériau, nommée humidité relative d'équilibre (HRE). L'activité de l'eau correspond au 1/100 de l'humidité relative à l'équilibre (HRE) à une température donnée. L' a_w et l'HR sont liées par l'équation suivante :

$$HR = Aw \times 100$$

Les études peuvent ainsi raisonner en termes d' a_w ou d'HRE, qui sont donc les mêmes.

Les besoins en eau varient selon l'espèce fongique. Un résumé des principaux micro-organismes trouvés dans la littérature sur les matériaux et espaces intérieurs des logements selon la disponibilité en eau des matériaux (a_w) est proposé dans le tableau ci-dessous (Tableau 7), lequel classe les micro-organismes :

- En trois catégories selon les gammes d' a_w favorables à leur développement ;
- En trois niveaux de coloniseurs qui prolifèreront selon la disponibilité en eau (primaires, secondaires et tertiaires), lesquels correspondent aussi ces catégories.

Le tableau montre aussi qu'à une a_w donnée, tel ou tel champignon peut être trouvé. Inversement, ceux-ci peuvent être des indicateurs d'humidité excessive lorsqu'ils sont détectés dans l'air ou dans les matériaux.

Tableau 7. Niveaux d'humidité nécessaires à la croissance de micro-organismes sélectionnés dans les bâtiments, sur les matériaux de construction, d'ameublement et les finitions

Niveaux d'humidité nécessaires à la croissance des principaux micro-organismes au sein des bâtiments		
Niveau d'humidité	Catégorie de micro-organismes ⁴²	Exemples
ÉLEVÉ ($a_w > 0,9$; ERH > 90 %) ou $a_w > 0,95^{43}$	Colonisateurs tertiaires (hydrophiles) Actinobactéries (ou Actinomycètes)	<i>Alternaria alternata</i> ; <i>Aspergillus fumigatus</i> ; <i>Epicoccum</i> spp ; <i>Exophiala</i> spp ; <i>Fusarium*</i> <i>moniliforme</i> ; <i>Mucor plumbeus</i> ; <i>Phoma erbarum</i> ; <i>Phialophora</i> spp ; <i>Rhizopus</i> spp ; <i>Stachybotrys chartarum*</i> (<i>S. atra</i>) ; <i>Trichoderma</i> spp ; <i>Ulocladium consortiale</i> ; <i>Sporobolomyces</i> spp ; levures.
INTERMÉDIAIRE (a_w 0,8–0,9 ; ERH : 80 à 90 %) a_w optimum > 0,9 ou a_w 0,85–0,90 ⁴⁴	Colonisateurs secondaires (mésophiles)	<i>Aspergillus flavus</i> ; <i>Aspergillus versicolor</i> ; <i>Cladosporium cladosporioides</i> ; <i>Cladosporium sphaerospermum</i> ; <i>Mucor circinelloides</i> ; <i>Rhizopus orzyae</i>
BAS ($a_w < 0,8$; ERH < 80 %) ou $a_w < 0,85^{45}$ maximum < 0,97 ⁴⁶	Colonisateurs primaires (xérophiles)	<i>Alternaria citri</i> ; <i>Aspergillus (Eurotium) amstelodami</i> ; <i>Aspergillus candidus</i> ; <i>Aspergillus (Eurotium) glaucus</i> ; <i>Aspergillus niger</i> ; <i>Aspergillus penicilloides</i> ; <i>Aspergillus (Eurotium) repens</i> ; <i>Aspergillus restrictus</i> ; <i>Aspergillus versicolor*</i> ; <i>Penicillium variatii</i> ; <i>Penicillium aurantiogriseum</i> ; <i>Penicillium brevicompactum</i> ; <i>Penicillium chrysogenum</i> ; <i>Commune de Penicillium</i> ; <i>Penicillium expansum</i> ; <i>Penicillium greseofulvum</i> ; <i>Wallemia sebi</i>

Les noms marqués d'un astérisque désignent des organismes potentiellement toxinogènes ou pathogènes (Bex *et al.* 2007, 8)

Élaboration propre d'après (Grant *et al.* 1989 ; Anagnost 2011 ; D'Orazio 2012 ; B. Flannigan *et al.* 1996)

En dessous d'une certaine disponibilité ou activité de l'eau (a_w), ils ne peuvent ni germer ni croître. Mais faut garder à l'esprit que les spores peuvent survivre lorsque l'humidité est en dessous de ces valeurs et présenter un risque pour la santé. Ici encore, certaines particularités sont liées aux espèces rencontrées.

⁴² Une autre catégorie définie par (ANAGNOST, 2011) incluait les « xéro-tolérants », avec les valeurs d' a_w suivantes : minimum aw <0,80 ; optimum >0,80 et un maximum 1,00. Nous ne l'avons pas inclus dans le tableau en raison d'un manque de données sur les souches correspondantes.

⁴³ Chiffre différent donné par (ANSES 2016)

⁴⁴ *Ibid.*

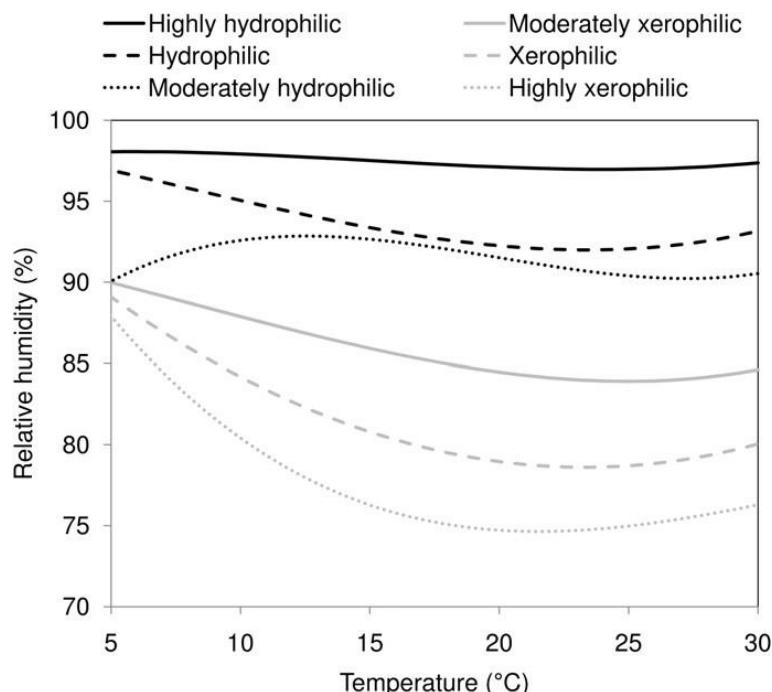
⁴⁵ *Ibid.*

⁴⁶ Chiffre différent donné par (S.E. Anagnost 2011).

Les souches colonisatrices peuvent être subdivisées en trois groupes selon la valeur minimale d' a_w à partir de laquelle commence la croissance. C'est à partir d'une a_w de 0,85 - 0,90 que la plupart des bactéries contaminantes se développent et pour la plupart des micro-organismes, l' a_w optimale pour la croissance est de 0,9 à 0,99 (Ayerst 1969). Cependant, la croissance microbienne n'est généralement plus limitée par l'activité de l'eau pour des valeurs d' a_w supérieures à 0,7 : beaucoup d'espèces de champignons peuvent se développer en intérieur à des valeurs d'environ 0,7 à 0,8 (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016). Mais l'exigence minimale peut être encore plus faible : (Grant *et al.* 1989) ont montré qu'avec une alimentation adéquate, la croissance fongique sur les substrats se produit déjà à des valeurs d' $a_w = 0,65$. D'autres soulignent que dans certains matériaux, la valeur limite de l' a_w permettant le développement de moisissures et de levures est encore plus bas, estimée autour de 0,60 (0,61) (Prescott *et al.* 2013). La limite la plus faible pour les moisissures productrices de mycotoxines serait de 0,78⁴⁷.

Le tableau suivant indique les limites inférieures d'humidité relative favorisant la croissance fongique

Figure 15. Isoplèthes critiques pour différentes espèces fongiques



(Clarke *et al.* 1999), cité par (S.E. Anagnost 2011)

c) Teneur en humidité - BATI

En fonction des conditions hygrothermiques environnantes, les fibres végétales peuvent contenir de l'eau sous formes forme d'eau liée et d'eau libre.

Le « point de saturation » (PSF) des fibres désigne l'étape à laquelle il ne reste que l'eau liée dans les parois cellulaires, toute autre eau (appelée eau libre) ayant été retirée. Il est dit

⁴⁷ Source : <https://www.gazettelabo.fr/archives/pratic/2005/97labcell.htm>. Consulté le 16.06.2022.

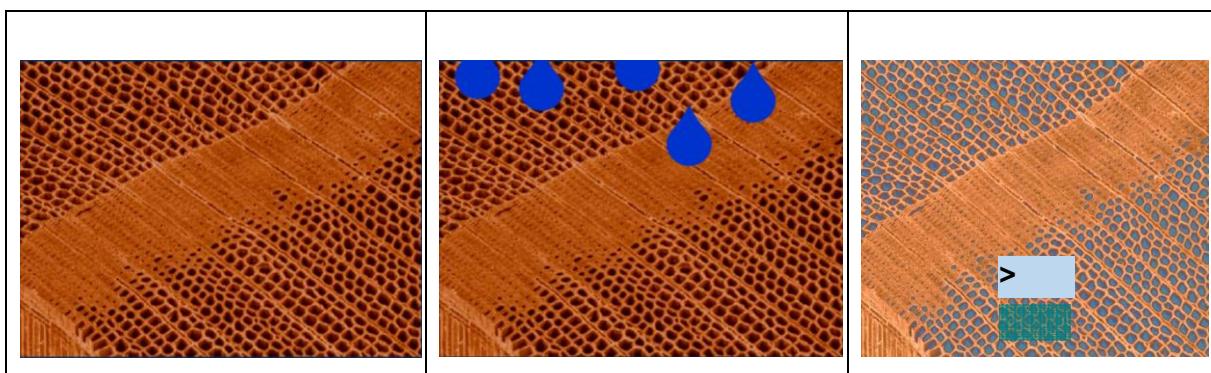
atteint lorsque la paroi cellulaire est saturée d'eau liée. Au-delà de ce point, il est considéré que des risques microbiologiques existent.

La teneur en eau au PSF pour le bois se situe entre 20 et 40 % selon les matériaux, les conditions hygrothermiques, etc. Sa valeur moyenne est de 26 % (S.E. Anagnost 2011).

< PSF = Eau liée

> PSF = Eau libre

Figure 16. Le processus de dégradation ne peut se produire qu'au-dessus du point de saturation des fibres.



(S.E. Anagnost 2011)

Outre les changements structurels qui peuvent affecter de manière significative les performances fonctionnelles des matériaux de construction, les champignons peuvent affecter la qualité des matériaux de construction par la (dé)coloration. Les moisissures décolorant la lignocellulose et les champignons colorants vivent des nutriments contenus dans les cellules vivantes du parenchyme⁴⁸ (Schmidt 2006) et ne causent que peu de dommages à la structure de la paroi cellulaire. (Brischke et Jones 2017, 192).

Un milieu chaud, humide, sombre et mal ventilé suffit pour offrir des conditions favorables à la prolifération fongique à l'intérieur des bâtiments. Les paragraphes suivants donneront un aperçu des besoins physiologiques liés aux différents champignons du bois donnant également une indication pour d'autres lignocellulosiques. Comme nous l'avons vu à la section précédente, il est communément admis que la décomposition fongique nécessite une teneur en humidité supérieure au point de saturation des fibres – PSF). Néanmoins, plusieurs études (Anagnost 2011 ; Brischke et Jones 2017, 191) ont montré que :

- différents champignons sont capables de croître sur des substrats organiques à une teneur minimale en eau plus faible que le seuil de dégradation fongique de la lignocellulose ;
- ils peuvent de plus dégrader la lignocellulose à une teneur en eau nettement en dessous de la saturation des fibres, du moins si une source d'humidité externe est fournie et à proximité.

⁴⁸ Le tissu du parenchyme des plantes assure les échanges gazeux entre le sol, la plante et l'air.

Tableau 8. Besoins physiologiques d'humidité (teneur en eau) pour la décomposition du bois par certains champignons⁴⁹

Groupe	Champignon	Teneur en humidité (% massique)			Sources (cité par BRISCHKE & UNGER, 2017 : 191)
		Min.	Optimale	Max.	
Champignons à pourriture brune	<i>Coniophore puteana</i>	21,5	36,4–210,0	>200	Huckfeldt et Schmidt (2006)
		22,3–29,7	29,0–76,1	nc	Meyer et Brischke (2015)
		27,4	64,3	nc	Stienen et al. (2014)
Champignons à pourriture brune	<i>Serpula lacrymans</i>	26,2	45,0–208,0	>200	Huckfeldt et Schmidt (2006)
Champignons à pourriture blanche	<i>Donkioporia expansa</i>	27,0	34,4–126,0	>200	Huckfeldt et Schmidt (2006)
		18,9–52,3	57,6–120,0	nc	Meyer et Brischke (2015)
		34,9	74,3	nc	Stienen et al. (2014)
Champignons à pourriture brune	<i>Gloeophyllum trabeum</i>	30,7	45,7–179,0	>200	Huckfeldt et Schmidt (2006)
		16,3–37,1	47,3–172,8	nc	Meyer et Brischke (2015)
Champignons à pourriture blanche	<i>Trametes versicolor</i>	14,6–42,2	46,6–113,1	nc	Meyer et Brischke (2015)

(d'après Brischke et Jones 2017, 191)

Afin de définir des indicateurs fiables de la croissance des moisissures sur les matériaux de construction dans l'environnement intérieur, plusieurs auteurs ont étudié le niveau d'humidité critique, c'est-à-dire l'HR la plus basse auquelle les moisissures peuvent se développer, pour divers matériaux. Les recherches de Johansson (P. Johansson et al. 2005) jusqu'à sa thèse (P. Johansson 2014) ont permis de définir différents niveaux d'humidité critiques en fonction de chaque matériau. Sur la base de ces résultats, elle a développé un modèle de prédiction du risque fongique (le PJ model) (P. Johansson 2014).

(Ritschkoff, Viitanen, et Koskela 2000) ont également étudié plusieurs matériaux dans différentes conditions de température et d'humidité relative : du plâtre, du béton, des matériaux isolants (laine de verre, laine de roche) et composites à base de bois (planches de panneaux de particules, laine de bois et panneaux de contreplaqué). Ses résultats montrent que tous les matériaux peuvent contribuer à la croissance des moisissures si leur humidité relative atteint 90 %.

D'autres auteurs⁵⁰ ont indiqué que les moisissures ne se développent pas :

- Avec une HR < de 80 % ;

⁴⁹ Les essences de bois utilisées différaient entre les tests. Leurs configurations n'étaient donc pas identiques, mais dans toutes les études, une humidité externe a été fournie avec l'utilisation d'un support de gélose de malt.

⁵⁰ Cités par Thomas Verdier (2015) : Rowan & al., 2003 ; Viitanen & Ritschkoff, 1991 ; Adan, 1994.

- Ou avec une HR < de 75 % lorsque la température est comprise entre 5 et 40 °C.

Bien qu'il soit difficile de comparer les niveaux d'humidité critiques entre les études en raison de l'utilisation de différentes méthodes, d'autres études (A.-L. Pasanen *et al.* 2000 ; Thomas Verdier 2015 ; P. Johansson *et al.* 2005 ; 2012 ; P. Johansson, Ekstrand-Tobin, et Bok 2014) montrent que les matériaux deviennent la cible de la prolifération fongique lorsque les valeurs d'HRE sont supérieures à :

- Des valeurs supérieures à 75 % pour les matériaux en bois et à base de bois ;
- 80 % pour les matériaux en gypse (panneaux) ;
- 90 % pour les matériaux cimentaires et les matériaux d'isolation

La plupart des auteurs appuient l'opinion selon laquelle la mesure et l'évaluation du niveau d'humidité critique par les HRE devraient être utilisées comme indicateurs de contamination microbienne pour les matériaux de construction et des modèles mathématiques ont été développés pour prédire la contamination par les moisissures en fonction de l'HR des matériaux (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016).

Pernilla Johansson (P. Johansson *et al.* 2005), après analyse de la littérature, a résumé les valeurs critiques de l'HR pour différents matériaux qui, s'ils sont dépassés, favorisent la croissance microbienne (Tableau 9).

Tableau 9. Humidité relative critique pour différents matériaux

Matériaux	Humidité relative (%)
Bois et produits du bois	75–80
Papier peint et revêtement plastique	80–85
Isolants minéraux (p. ex. silicate de calcium)	90–95
Autres isolants thermiques (EPS, XPS)	90–95
Ciment	90–95
Brique	90–95
Plâtre	90–95

(P. Johansson *et al.* 2005)

P. Johansson a comparé 21 matériaux de construction (JOHANSSON & al., 2020). Le tableau suivant tiré de leur étude montre par exemple le niveau de résistance fongique de différents matériaux biosourcés à des HR très élevées, comme la ouate de cellulose en vrac (n° 11 dans la liste).

Tableau 10. Comparaison de la résistance fongique de 21 matériaux de construction

Nr	Class	RH _{crit} (%)	Group
1	D	90 > RH _{crit} ≤ 95	Calcium silicate board
2	E	RH _{crit} > 95	Calcium silicate board
3	D	90 > RH _{crit} ≤ 95	Calcium silicate board
4	D	90 > RH _{crit} ≤ 95	Calcium silicate board
5	D	90 > RH _{crit} ≤ 95	Polyurethane foam (PUR)
6	D	90 > RH _{crit} ≤ 95	Gypsum board
7	E	RH _{crit} > 95	Polystyrene board
8	E	RH _{crit} > 95	Polystyrene board
9	D	90 > RH _{crit} ≤ 95	Mineral wool
10	E	RH _{crit} > 95	Mineral wool
11	E	RH _{crit} > 95	Cellulose fibre
12	C	85 > RH _{crit} ≤ 90	Aluminum foil
13	A	75 > RH _{crit} ≤ 80	Cellulose fibre
14	E	RH _{crit} > 95	Polyurethane foam (PUR)
15	E	RH _{crit} > 95	Polystyrene board
16	D	90 > RH _{crit} ≤ 95	Gypsum board
17	D	90 > RH _{crit} ≤ 95	Gypsum board
18	C	85 > RH _{crit} ≤ 90	Gypsum board

A.-L. Pasanen puis S. C. Doll (A.-L. Pasanen 2001 ; Doll 2002) ont suggéré que la croissance fongique est minime dans des conditions non mouillantes à 85 % -95 % HR et affirment que les événements mouillants (accidents hydriques) favorisent la germination, la prolifération et la diversité des moisissures sur les matériaux de construction.

Les différentes catégories de colonisateurs croisent aussi celles des champignons. Le tableau suivant (Tableau 11) nous permet de relier les champignons selon leur type (composteurs, moisissures) et l'activité de l'eau. Les champignons de la décomposition, les plus agressifs pour les matériaux (lignivores) surviennent souvent aux a_w les plus élevés.

Tableau 11. Synthèse sur les conditions hygrothermiques de la prolifération fongique

Type de champignon	Exigences en matière d'humidité pour la croissance
--------------------	--

Lignivores (``pourriture'')	<ul style="list-style-type: none"> - La plupart des champignons de décomposition du bois sont hydrophiles et nécessitent une activité hydrique d'eau moins 0,97 ; - Les champignons de décomposition commenceront à se développer (sur le bois d'œuvre) à partir d'une teneur en eau de 27 %⁵¹ ; - Cela correspond à une humidité relative de > 97 %, sauf si une source d'eau libre est présente.
Lignicoles (``moisissures fructifères'')	<p>De nombreuses moisissures peuvent tolérer une HR plus faible⁵² que les champignons de décomposition, bien qu'une croissance optimale se produise à une HR élevée :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Limite inférieure rapportée de tolérance à la croissance : 75 % à 80 % HR ; - Croissance de moisissures sur les surfaces se produira à HR >80 %.
Lignicoles (``(dé-) colorations'')	<ul style="list-style-type: none"> - Le développement de colorisation (bleuissement, etc.) peut se produire au point de saturation des fibres ou proche de celui-ci ; - L'HR minimale tolérée par le champignon de coloration de l'aubier, <i>Ophiostomataceae</i>, est de 93 à 94 % HR, soit une teneur en humidité du bois étudié de 21 à 22 % à 15 °C

Élaboration propre d'après (S.E. Anagnost 2011)

La phase de germination nécessite un apport d'eau plus important que celle de la croissance (Tobon Monroy 2020) ? De plus :

- Lorsque l' a_w du milieu est inférieure à celle du milieu environnant, la spore subit un stress osmotique : elle ne peut pas absorber l'eau nécessaire pour germer ;
- À l'inverse, si l' a_w augmente dans le milieu environnant, le transport d'eau vers la cellule a lieu, permettant à la spore de s'hydrater et de germer.

Température et humidité sont ainsi intimement reliées dans ces processus⁵³ (P. Johansson *et al.* 2012 ; Thomas Verdier 2015) :

- Ainsi plus la température est basse, plus le niveau d' a_w requis pour que les spores puissent s'hydrater est élevé ;
- À l'inverse, l'augmentation de la température peut conduire à une réduction du niveau d' a_w nécessaire pour la croissance.

L'humidité est donc unanimement reconnue comme l'un des principaux facteurs de développement fongique, toutefois, certaines limites pour l'évaluer existent (Bex *et al.* 2007) :

- La mesure seule de l'humidité relative ambiante (y compris proche de la surface contaminée) ne permet pas de juger de l'existence réelle d'un risque de

⁵¹ Nous verrons plus loin qu'une étude expérimentale a montré que des isolants en laine de bois peuvent être plus résistants que du bois d'œuvre (pin).

⁵² En effet, des preuves ont été rapportées, soulignant que les spores de champignons xérophiles ont une plus grande capacité de rétention d'humidité (S.E. Anagnost 2011).

⁵³ Les exigences de température pour l'activité fongique déterminent le dispositif expérimental en ce qui concerne les conditions d'humidité et l'apport en nutriments (Brischke et Jones 2017).

- développement fongique (car la teneur en eau disponible dans le matériau ne correspondant souvent pas à l'humidité de l'ambiance) ;
- La détermination de la teneur en eau, souvent réduite à quelques centimètres de profondeur dans le matériau et à l'endroit du développement fongique n'est pas pertinente. En effet, la croissance a pu se produire lors d'un accident hydrique ou d'excès ponctuel de l'humidité déjà résolu lors du contrôle. Alors le développement fongique est en dormance, mais les micro-organismes (spores, fragments mycéliens) conservant leur capacité à coloniser de nouveau le matériau (ou un autre) si les conditions hygrothermiques favorables sont rencontrées.

De plus, les phénomènes de germination et de croissance, liés aux particularités hygrothermiques du milieu et du matériau, sont aussi dépendants des spécificités des souches fongiques. Cette synthèse reste donc néanmoins relativement rigide et il est important de souligner que :

- Les interactions entre micro-organismes sont extrêmement complexes (allant de l'association à la compétition pour l'accès aux nutriments) ;
- Les conditions de développement des moisissures non destructrices peuvent amener au développement de champignons destructeurs ;
- Les dynamiques temporelles de développement ou de décroissance voire de disparition (« séchage ») ne sont pas encore parfaitement connues et nécessitent des durées d'analyse plus proches de la réalité des processus en œuvre dans le bâti (saisonnalité, dynamismes des phénomènes, etc.).

Pour conclure sur cette section fondamentale concernant la croissance fongique, une étude menée (A. Laborel-Préneron 2018) montre que – pour un matériau testé⁵⁴ avec une humidité relative et une température favorables à la croissance fongique - l'ajout d'eau liquide par inoculation semble davantage initier la croissance fongique sur et à l'intérieur du matériau que l'ajout de souches fongiques. Les échantillons mouillés avec des gouttes d'eau ont clairement montré que la croissance fongique s'est produite sans avoir besoin d'être inoculée en souches fongiques. Ainsi, l'inoculation ne semble qu'accélérer la prolifération, par l'ajout d'eau. Cette expérience confirme le fait que l'eau liquide favorise davantage la croissance fongique que l'humidité.

2. Exigences de température pour les champignons

a) Gammes de température

La température a une forte influence sur la multiplication microbienne en impactant leur métabolisme et principalement leur cinétique de croissance (Joblin 2011), car elle influence leurs activités enzymatiques, qui peuvent être inactivées à des températures trop élevées ou trop basses (S.E. Anagnos 2011).

Ainsi, chaque micro-organisme présente une plage de températures optimale pour sa viabilité et sa croissance (Thomas Verdier 2015), mais d'un point de vue général, les champignons peuvent tolérer une large gamme de températures de croissance allant de 0 et 15 °C pour les plages basses et de 35 à 52 °C pour les maximales (Cf. Tableau 12). Dans

⁵⁴ Les matériaux étaient de la terre allégée amendée soit avec de la chènevotte de chanvre, soit de la paille.

les environnements intérieurs, les champignons sont principalement mésophiles : leur croissance est optimale à des températures proches de la température ambiante des locaux (Tobon Monroy 2020), mais des exceptions existent, notamment dans les espaces confinés, les caves, greniers, etc. (P. Johansson *et al.* 2020).

Tableau 12. Catégories de champignons (moisissures) selon la gamme de température favorable à leur développement

Type de moisissure	Gamme de température (°C)	Température optimale (°C)
Mésophiles	0 à 50	15 à 30 10 à 40
Thermophiles	20 à 50 20° à >50 °C	35 à 40
Thermotolérants	0 à 50	15 à 40
Psychrophiles	0 à 20 4 à 12	0 à 17 8 à 10

D'après (Boudih 2011), cité par (Tobon Monroy 2020)

Concernant ces différentes catégories fongiques classées selon leur gamme préférentielle de températures, nous pouvons préciser les points suivants (Anagnost 2011) :

- La plupart des champignons sont des mésophiles ;
- Les psychrophiles peuvent survivre aux températures froides dans les climats arctiques et à haute altitude ;
- Les thermophiles existent dans des zones proches de volcans, après des incendies de forêt, des tas de compost, etc. De nombreux champignons concurrents ayant été éliminés, cela leur permet de s'épanouir.

Les champignons, selon leur type, répondent à des gammes plus ou moins spécifiques. Ainsi (S.E. Anagnost 2011) précise que :

- La plupart des champignons thermotolérants sont des moisissures (mais peu de moisissures sont thermotolérantes) ;
- La plupart des champignons de décomposition du bois sont des mésophiles et se développent préférablement à des températures de 10 à 40 °C.

Le tableau ci-dessous présente les gammes de températures de croissance pour les champignons dits de pourriture (lignivore).

Tableau 13. Températures nécessaires à l'activité et à la croissance optimales de différents champignons lignivores (« composteurs »)

Type de Champignon lignivore (« composteurs »)	Gamme de température (°C)	
	Optimum	Croissance
<i>Coniophora puteana</i>	20 à 32	0 à 40
<i>Serpula lacrymans</i>	17 à 23	0.1 à 27
<i>Donkioporia expansa</i>	24 à 30	10 à 35

<i>Gloeophyllum trabeum</i>	30 à 38	5 à 45
<i>Trametes versicolor</i>	25 à 30	5 à 40

D'après selon Huckfeldt et Schmidt (2006), cité par ((Brischke et Jones 2017, 191)

Le temps d'exposition aux conditions optimales de température et humidité est aussi important et celles-ci sont peuvent être très fluctuantes au sein des différentes parties et niveaux d'un bâtiment (sous-sols, greniers, pièces de vie/d'eau, etc.). Ainsi, il est important de noter que ces données sont à prendre avec précaution, car mesurées sous des régimes constants, qui ne correspondent pas aux conditions réelles : le taux de croissance des moisissures peut en conséquence diminuer lorsque les conditions des périodes favorables sont interrompues, même brièvement, par des périodes moins favorables (P. Johansson *et al.* 2020 ; Gradeci *et al.* 2017).

Il faut aussi faire la distinction entre les températures nécessaires à la germination et à la croissance, d'un côté et, celles, plus élevées, qui entraînent une régression voire une destruction des champignons, pour ceux qui ne sont pas thermotolérants.

b) Températures de survie

Le Tableau 14 présente les températures de survie des champignons thermotolérants.

Tableau 14. Températures de survie des champignons thermotolérants

Températures de survie des champignons thermotolérants (déterminées à partir de diverses sources)			
Type de Champignon	Température maximale	Temps maximal	Sources (citées par : ANAGNOST, 2011)
<i>Aspergillus fumigatus</i>	65 °C 50 °C	72 heures 168 heures	Hulme et Stranks, 1976 Payne et coll., 1998 ; Wakeling et van der Waals, 1996
<i>Aureobasidium pullulans</i>	60 °C	24 heures	Hulme et Stranks, 1976
<i>Paecilomyces variotii</i>	50 °C 50 °C 65 °C 47 °C 50 °C	168 heures 24 heures 8 heures	Payne <i>et al.</i> , 1998 Cooper <i>et al.</i> 1998 Cooper <i>et al.</i> , 1998 ; Cooney et Emerson (1964) ; Samson & Hoekstra's (1988)

D'après (S.E. Anagnost 2011)

c) Stérilisation thermique

Enfin, des exemples de stérilisation thermique de MBS sont courants. Par exemple, la température de stérilisation des poteaux électriques en bois est effectuée autour de 65 °C

pendant 1 h,⁵⁵ et celle pour stériliser le bois destiné aux études de laboratoire, est de 121 °C à 15 PSI⁵⁶ pendant 15 minutes (S.E. Anagnost 2011).

Des températures létales permettant de tuer les filaments mycéliens (hyphes) ont été observées pour la Mérule (*Serpula lacrymans*) avec une exposition de 15 minutes à 40°-45 °C⁵⁷, ou une température entre 50 °C et 105 °C (en fonction des conditions expérimentales) (D’Orazio 2012). À noter que lorsque le mycélium est mort, même réhumidifié, il ne peut plus se développer. Néanmoins, les spores, beaucoup plus résistants, le peuvent et germeront si les conditions hygrothermiques sont de nouveau propices.

B. Prévalence et comparaison des micro-organismes liés à certaines caractéristiques des matériaux

La plupart des champignons sont des saprophytes, ce qui signifie qu’ils peuvent se nourrir de matières organiques (carbohydrates, de protéines et de lipides) et de minéraux dont les sources nutritives sont variées et abondantes dans les environnements intérieurs des logements à la fois dans les matériaux de construction, mais aussi sur toutes leurs surfaces (poussières, dépôt de graisse de cuisson, peinture et colle, papiers peints, etc.) (D’Orazio 2012). Les matériaux de construction riches en carbone sont davantage propices au développement fongique que d’autres qui ont une teneur en carbone plus faible (comme le plâtre, la laine de verre, etc.) (D’Orazio 2012). Mais à chaque matériau ou presque correspond un type de moisissures spécifiques : certaines se développent et croissent en présence d'une forte humidité, d'autres inversement peuvent apparaître dans des conditions minimales d'humidité comme celle contenue à l'intérieur même d'un matériau⁵⁸.

1. Nature chimique et pH des substrats

a) Potentiel hydrogène (pH)

Le potentiel hydrogène (pH) du milieu (activité des ions hydrogène) est un facteur influant sur le développement des micro-organismes avec différents pH optimaux suivant les espèces (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016 ; Prescott *et al.* 2013 ; Simons 2018) :

- Les organismes acidophiles (optimum entre 0-5) ;
- Les organismes neutrophiles (entre 5,5 et 8,0) ;
- Les alcalinophiles (entre 8,0 et 11,5) ;
- La plupart des micro-organismes connus préfèrent un pH inférieur à 12.

Ces gammes de pH sont relativement larges selon les organismes et nombre d’entre eux sont capables de se développer dans des environnements extrêmes, très acides ou très alcalins (on parle d’organismes acidophiles ou basophiles) (Thomas Verdier 2015, 22). La majorité des germes croissent à des pH relativement peu acides / neutres, entre 4 et 7 et les

⁵⁵ Les normes (AWPA 2001, ANSI 2002) pour le séchage/stérilisation des poteaux (pin) exigent que les températures de séchage au four atteignent (65,5 °C) dans le cœur du poteau pendant 1 heure (AWPA 2001) (S.E. Anagnost 2011).

⁵⁶ PSI : pound per square inch. 1 psi équivaut à environ 6894,76 Pa

⁵⁷ Source : <https://www.merule-expert.com/publications>. Consulté le 15.06.2022.

⁵⁸ Source : <https://www.merule-expert.com/moisissures>. Consulté le 15.07.2022.

matériaux ayant un pH correspondant sont donc plus sensibles à la prolifération microbienne (Simons 2018, 103) que les matériaux très alcalins (pH environ 12-13), lesquels sont donc relativement immunisés (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016).

Les champignons, moisissures et levures peuvent se développer dans les environnements acides (3-6) et les bactéries dans les milieux neutres à légèrement alcalins (autour de 7-7,5) (Thomas Verdier 2015, 22). Les matériaux alcalins (au pH entre 12 et 13), comme ceux produits avec des liants hydrauliques (ciment, chaux) fraîchement mis en œuvre, sont peu favorables à la croissance fongique (T. Verdier *et al.* 2014). Néanmoins, pendant leur « prise » au fil du temps, le processus de carbonatation⁵⁹ fait baisser le pH jusqu'à des valeurs de 8-9, facilitant la prolifération sur le matériau de construction (Wiktor *et al.* 2009 ; Delannoy 2018 ; Simons 2018). Ce phénomène est d'autant plus vrai si la carbonatation a été rapide (V. Wiktor 2008). Une étude poussée sur les bétons de chanvre soumis à un vieillissement accéléré, notamment en conditions réelles, a analysé des variations selon les profondeurs examinées (surface / cœur du matériau) en fonction des natures chimiques des liants et des proportions entre agrégats végétaux/liants (G. Delannoy 2018).

À contrario, d'autres espèces bactériennes et fongiques tolèrent voire ont une prédilection pour les milieux à forts pH, malgré des conditions caustiques (K. Sedlbauer 2001). Certaines bactéries alcalophiles sont même incorporées dans des bétons afin d'en réparer les microfissures (Simons 2018, 103).

b) Oxygène

Les moisissures ont particulièrement besoin d'oxygène (D'ORAZAIO, 2012). La matière organique constitue une source d'azote, d'oxygène, d'hydrogène et d'hydrates de carbone (Simons 2018, 24).

La présence d'oxygène est aussi un facteur influant sur le développement microbien et permettant de classifier différents groupes. Il existe deux types de respiration, avec différents types de comportement par rapport à l'oxygène chez les micro-organismes (Simons 2018, 103 ; Thomas Verdier 2015, 22) :

- Les aérobies stricts qui ont besoin d'oxygène libre pour pouvoir se développer, les anaérobies stricts ne tolérant pas l'oxygène libre ;
- Les aéro-anaérobies ou anaérobies facultatives pouvant se multiplier avec ou sans oxygène libre et les micro-aérophiles qui ne peuvent croître qu'en présence d'une faible tension d'oxygène.

L'exposition à l'eau liquide de matières organiques amène à leur humidification, condition de la croissance fongique, avec comme corollaire que l'eau liquide inhibe l'accès à l'oxygène ce qui limite la croissance fongique (C. Brischke 2017). Par conséquent, le développement fongique implique une phase préalable d'infestation par des spores fongiques en suspension dans l'air. . Cette phase initiale est fréquemment occultée, étant donné que les supports du développement des micro-organismes (murs, sols, meubles, etc.) sont majoritairement au contact de l'air ambiant, les micro-organismes aérobies ou anaérobies facultatifs sont essentiellement retrouvés lorsqu'il y a un développement microbien dans le bâtiment.

⁵⁹ La carbonatation est la réaction, en présence d'eau, du CO₂ de l'air avec le calcium contenu dans le liant entraînant la formation de calcite.

c) Nutrition

Les champignons et moisissures sont hétérotrophes et ont besoin d'oxygène et de nutriments, qu'ils trouvent dans la matière organique qu'ils dégradent grâce à l'excrétion et l'action d'enzymes hydrolytiques et d'acides (Bex *et al.* 2007 ; CSTB 2015 ; Méheust 2012). Leurs besoins nutritionnels en carbone, en énergie et en électrons, ainsi qu'en une dizaine d'éléments chimiques (C, O, H, N, S, P, Mg, K, Ca, Fe) peuvent être classés en deux catégories (Tobon Monroy 2020) :

- Les nutriments constitutifs comme le carbone, l'azote, l'hydrogène, le potassium, le soufre, le phosphore et le magnésium ;
- Et les oligonutriments parmi lesquels figurent le fer, le cuivre, le manganèse, le zinc et le molybdène.

Ces composés peuvent appartenir aux éléments constituants des matériaux de construction, mais aussi se retrouver dans les poussières des environnements intérieurs, lesquelles suffisent pour alimenter la germination de spores en cas de présence d'une humidité suffisante (A.-L. Pasanen *et al.* 2000 ; Tobon Monroy 2020). L'apport externe de poussières et de composés organiques sur une paroi peut constituer un facteur important de risque de colonisation, y compris sur des matériaux qui n'y sont pas ou peu sensibles (Hoang *et al.* 2010). Quelques poussières cellulosiques suffisent par exemple au développement sur plusieurs dizaines de m² de mérule sur un mur totalement dépourvu de bois ou d'autre matériau susceptible de favoriser son développement⁶⁰.

La croissance fongique peut être amplifiée par d'autres effets favorisant l'accès à des nutriments carbonés ou azotés initialement présents dans la matrice chimique de ces matériaux : ainsi la formation d'acides organiques, induite par une humidité suffisante dans les matériaux, permet de favoriser la dégradation et la corrosion des matériaux de construction et en conséquence l'apport de nutriments (ANSES 2016 ; Delannoy 2018 ; Thomas Verdier 2015 ; Tobon Monroy 2020).

Tableau 15. Tableau synthétique de différents types nutritionnels

Besoins	Types nutritionnels
Source de carbone	
CO ₂	Autotrophes
Composés organiques	Hétérotrophes
Source d'énergie	
Lumineuse	Phototrophes
Chimique	Chimiotrophes
Source d'électrons	
Minéral	Lithotrophes
Organique	Organotrophes
Facteurs de croissance	
Non exigeant	Prototrophes
Exigeant	Auxotrophes

⁶⁰ Source : <https://www.merule-expert.com/publications>. Consulté le 28.07.2022.

(Leclerc et al., 1995 ; (Prescott et al. 2013) (Thomas Verdier 2015)

Aussi, selon les matériaux colonisés, les éléments ou composés chimiques entrant dans leur composition constituent une source nutritive plus ou moins facilement accessible : certaines espèces fongiques peuvent dégrader des polymères très complexes (comme la lignine et la cellulose) tandis que d'autres, comme certaines espèces d'*Aspergillus* et *Penicillium*, préfèrent les sucres plus simples et se développent très rapidement (Tobon Monroy 2020 ; Thomas Verdier 2015, 46).

Par ailleurs, la nature des composants est significative et est reliée à la capacité du champignon à en extraire des éléments nutritifs avec plus ou moins d'eau disponible : par exemple, l'ajout d'un matériau fournissant des nutriments facilement assimilables (comme la méthylcellulose composant la colle à papier ou certaines peintures émulsives), peut directement induire une réduction du niveau de a_w (activité ou disponibilité de l'eau) nécessaire à la croissance de moisissure (Ayerst 1969 ; Grant et al. 1989).

Les micro-organismes ne peuvent croître qu'au détriment du matériau, mais l'inverse est également possible : (Thomas Verdier 2015, 46) évoque des travaux précisant que la composition chimique de certains matériaux et leurs propriétés physiques peuvent constituer un effet fongistatique, c'est-à-dire un facteur inhibant ou perturbant le développement microbien, mais l'explication de cette résistance n'est pas encore clairement établie. Dans sa thèse, T. Verdier (2015) étudie également l'utilisation de molécules biosourcées, les monoglycérides, présentant des propriétés antimicrobiennes naturelles. A également été étudié l'effet fongistatique de certaines cendres⁶¹ qui, lorsqu'elles sont incorporées lors de la production de mélanges de ciment, de liants, de géopolymères, de mortiers et de bétons, peuvent augmenter les propriétés antimicrobiennes. Cependant, il n'existe pas encore de normes pour l'utilisation de ces cendres dans de telles applications.

Le Tableau 16 présente les résultats de plusieurs études référençant les espèces fongiques isolées selon le substrat colonisé (Bex et al. 2007).

⁶¹ *Fluidized Bed Combustion Fly Ash (FBCFA) and Bottom Ash (FBCBA)* : cendres volantes à combustion en lit fluidisé (FBCFA) et cendres de fond (FBCBA) : il s'agit de cendres issues de la récupération des dépôts de chaudières à combustion au charbon.

Tableau 16. Synthèse de quelques espèces fongiques isolées à partir de divers matériaux (Bex et al. 2007)

Matériaux colonisés		Spécies fongiques isolées
MURS ET REVETEMENTS MURAUX	Murs	<i>Cladosporium cladosporioides,</i> <i>Aspergillus glaucus,</i> <i>Paecilomyces variotii,</i> <i>Penicillium glabrum</i>
	Peintures	<i>Aspergillus penicillioides,</i> <i>Penicillium brevicompactum, P. chrysogenum, P. glabrum</i>
	Papiers peints	<i>Alternaria alternata,</i> <i>Aspergillus penicillioides, A. versicolor</i> <i>Cladosporium cladosporioides,</i> <i>Paecilomyces variotii,</i> <i>Penicillium brevicompactum, P. chrysogenum, P. glabrum</i> <i>Trichoderma harzianum,</i> <i>Chaetomium globosum</i>
	Bois	<i>Penicillium brevicompactum</i>
	Colle	<i>Aspergillus versicolor</i>
	Caoutchouc des cadres de fenêtre	<i>Cladosporium cladosporioides</i>
SYSTEMES DE TRAITEMENT D'AIR	Filtres et conduits	<i>Aspergillus fumigatus</i>
	Réservoirs d'eau, humidificateurs	<i>Exophiala jeanselmei</i>
PRODUITS DE DECORATION	Textiles	<i>Aspergillus niger, A. sydowii,</i> <i>Cladosporium cladosporioides, Cladosporium sphaerospermum,</i> <i>Aspergillus nidulans, Aspergillus glaucus</i> <i>Penicillium brevicompactum, P. chrysogenum,</i> <i>Trichoderma harzianum,</i> <i>Wallemia sebi,</i>
	Tapis	<i>Aspergillus nidulans, A. glaucus</i> <i>Paecilomyces variotii,</i> <i>Penicillium chrysogenum</i>
	Cuir	<i>Aspergillus niger, A. penicillioides, A. sydowii,</i> <i>Cladosporium sphaerospermum,</i> <i>Paecilomyces variotii</i>
	Archives	<i>Aspergillus glaucus</i> <i>Chaetomium globosum</i>
	Matériaux cellulosiques	<i>Aspergillus sydowii,</i> <i>Stachybotrys chartarum</i>
	Caoutchouc vulcanisé	<i>Cladosporium sphaerospermum,</i> <i>Penicillium brevicompactum</i>
	Produits céramiques	<i>Aspergillus versicolor</i>
	Papier	<i>Penicillium glabrum,</i> <i>Wallemia sebi</i>
	Plastiques	<i>Penicillium glabrum</i>
	Polyuréthane, tapisserie renfermant de l'arsenic	<i>Aspergillus niger,</i> <i>Cladosporium sphaerospermum</i>

2. Types de matériaux et souches fongiques

Selon (Squinazi 2002), la présence de micro-organismes dans l'air intérieur a quatre origines principales :

- L'Homme, par l'émission de gouttelettes salivaires et nasales et de squames ;

- La dissémination atmosphérique de microgouttelettes provenant notamment de réservoirs d'eau contaminés (douches, nébuliseurs, etc.) ;
- Les poussières mises en suspension dans l'air, induites par l'activité dans les bâtiments ;
- Les surfaces humides, qui deviennent des lieux de prolifération microbienne importants, une fois contaminées par l'ouverture des locaux ou par tout contact avec une source porteuse de micro-organismes (humain, animal, vêtements, poussières, etc.).

Les matériaux de construction peuvent aisément devenir des lieux de prolifération de micro-organismes notamment lorsqu'ils sont soumis à des conditions humides récurrentes ou à des événements mouillants accidentels et contribuer ainsi à la dégradation de la qualité de l'air intérieur.

L'étude d'(Andersen *et al.* 2011) a rapporté que *Penicillium chrysogenum* et *Aspergillus versicolor* étaient les espèces fongiques les plus courantes observées dans les bâtiments subissant des problèmes d'humidité. Mais le type de nutriments disponibles conditionnant aussi l'apparition de micro-organismes davantage sensibles à la nature des substrats, (Andersen *et al.* 2011) propose différentes classifications de substrats en fonction de leur composition et de leur capacité à nourrir les micro-organismes.

Dans (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016), les auteurs font ressortir de la littérature qu'après la disponibilité (ou l'activité de l'eau (a_w)) qui le premier facteur déterminant la diversité des champignons, la différence nutritionnelle en serait le deuxième.

Les substrats colonisés pouvant contenir des acides nutritifs favorisent le développement de micro-organismes (Santucci *et al.* 2007 ; Vacher *et al.* 2010 ; Hoang *et al.* 2010 ; Beata Gutarowska, Sulyok, et Krska 2010).

Le Tableau 17, effectué par (Thomas Verdier 2015, 38), présente une synthèse non exhaustive de 9 études concernant différents genres de micro-organismes les plus fréquemment identifiés *in situ* (habitation, école ou autres bâtiments) sur des échantillons de surface de divers matériaux à l'intérieur des bâtiments. Les principales conclusions tirées par l'auteur sont les suivantes :

- **Les matériaux lignocellulosiques** (de construction ou de finition), sont les plus susceptibles de favoriser une croissance fongique parce qu'ils contiennent des polymères organiques naturels rencontrés et dégradés par des micro-organismes, tels que l'amidon, la cellulose, l'hémicellulose, la pectine, la lignine, etc. ;
- **Les matériaux minéraux** (briques, mortiers, bétons, dérivés, etc.) sont comparativement moins colonisés et par très peu d'espèces. Toutefois, des espèces d'*Aspergillus* (*dont A. versicolor*), *Penicillium chrysogenum* et *Eurotium herbariorum* ont été couramment trouvées comme colonisatrices sur ce type de matériaux (V. Wiktor 2008). Mais les résultats pour les matériaux contenant des liants inorganiques sont assez dispersés (Bex *et al.* 2007) ;
- **D'autres matériaux de construction** surprenants sont également sensibles à la prolifération et à la dégradation fongique⁶² : notamment les plastiques et isolants

⁶² Les plastiques peuvent être dégradés par de nombreuses espèces de champignons : *Aspergillus niger*, *A. flavus*, *Aureobasidium pullulans*, *Chaetomium spp.*, *Penicillium funiculosum*, *P. luteum* et *Trichoderma spp.* Les résines d'urée-formaldéhyde sont contaminées par des micro-organismes phylloplanes, tels que *Cladosporium*

thermiques en mousse d'*urée-formaldéhyde* (MIUF), aussi appelée mousse urée-formol⁶³.

cladosporioides, *Alternaria alternata*, *Cladosporium herbarum*, *Penicillium fellutanum*, et par des moisissures transmises par le sol (Thomas Verdier 2015, 38).

⁶³ Source : <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/securite-produits-consommation/avis-mises-garde-retraits/lettres-annonces-information-industrie/interdiction-mousse-isolante-uree-formaldehyde-canada.html>. Consulté le 10.08.2022

Tableau 17. Synthèse de neuf études concernant différents genres de micro-organismes les plus fréquemment identifiés *in situ* (Thomas Verdier 2015, 38)

La relation entre les matériaux de construction et la croissance des moisissures a déjà été étudiée par plusieurs auteurs, mais les résultats disponibles ne sont pas faciles à résumer en raison de la grande variété de matériaux et de paramètres qui affectent le développement fongique (D'Orazio 2012, 335-336).

(K. Sedlbauer 2001) fourni une classification fongique fondée sur une relation entre la température, l'HR % et le type de substrat (Tableau 18). Des modèles de prédiction du développement des moisissures (présentés par la suite) prennent en compte les propriétés des matériaux sous forme de 4 classes de matériaux (K. Sedlbauer *et al.* 2011).

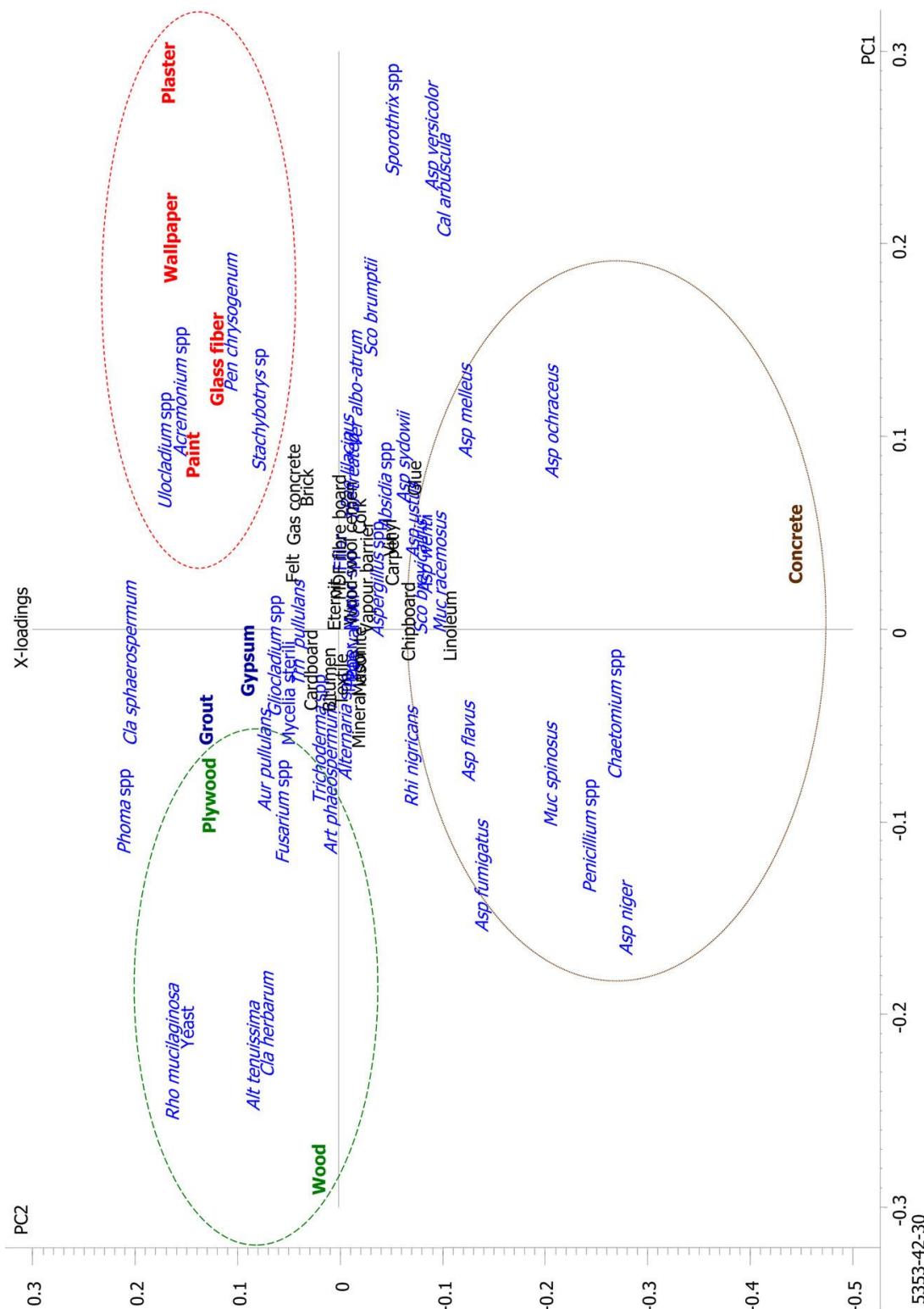
Tableau 18. Catégories des matériaux de construction pris en compte dans le modèle de prédiction de Sedlbauer en fonction de leur potentiel de croissance de moisissures
(K. Sedlbauer 2001)

Données des couches constitutives proches de la surface		
Catégorie de substrat		Matériaux / supports typiques
0	Milieu de culture optimal	Milieu biologique complet
I	Substrats bio-utilisable	Matériaux de construction biologiquement recyclables : papiers peints, plaques de plâtre, matériaux de construction fabriqués avec des matières premières facilement dégradables (bois, etc.), joints à élasticité permanente
II	Substrats de structure poreuse	Matériaux de construction biologiquement non recyclables : minéraux, plâtres, matériaux avec une structure poreuse comme le mortier pour le revêtement, certains types de bois et les matériaux isolants non recouverts de matériaux appartenant au type de substrat I
II I	Substrats inertes	Matériaux de construction qui ne sont ni biodégradables et qui ne contiennent pas nutriments : métaux, isolant (aluminium, plastique), verre, carrelage

Une autre corrélation entre les souches de moisissures et les matériaux est donnée par (Andersen *et al.* 2011). Dans la Figure 17. Association entre la nature du matériau et les espèces fongiques susceptibles de se développer (Andersen *et al.* 2011), les différentes espèces (en italique et en bleu) sont positionnées en fonction de leur affinité aux différents matériaux. Trois « groupes » se distinguent :

- *Wood, plywood* (bois, dont dérivés) ;
- *Paint, plaster, wallpaper* (peinture, plâtre, papier peint) ;
- Et *concrete* (béton) ainsi que ponctuellement *brick* (brique), linoleum, etc.

Figure 17. Association entre la nature du matériau et les espèces fongiques susceptibles de se développer (Andersen et al. 2011)



Loadings plot from the principal component analysis (PCA) based on the qualitative matrix A [5,353 samples X (30 materials and 42 fungi)]. The plot shows associations between building materials and fungi (e.g. between wood and *Alternaria tenuissima*, *Cladosporium herbarum*, *Rhodotorula mucilaginosa*, and yeasts). Fungi and building materials encircled are particularly associated. Fungi or components close to the centroid have little or no association with each other, occur no influence on the PCA model. Axes are principal components, PC 1 and PC 2, with loading values.

Ainsi, de nombreux micro-organismes sont détectés sur les matériaux de construction et leur prévalence (selon le genre ou l'espèce) peut être reliée à la nature du matériau en fonction de sa réponse aux besoins spécifiques des micro-organismes :

- Il est reconnu que les matériaux riches en cellulose présentent un risque de contamination et de développement fongiques plus important par rapport aux matériaux inorganiques, principalement parce que la cellulose peut être métabolisée par un large éventail de micro-organismes. Leur utilisation par les champignons comme source nutritive les rendrait plus sensibles à la prolifération fongique (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016, 10 ; Simons 2018, 104) ;
- mais les champignons peuvent aussi coloniser des matériaux sans matière organique, comme les plâtres ou les bétons et des matériaux aussi divers que les surfaces synthétiques et les plastiques, les métaux, le verre, les carburants, huiles, colles, peintures et textiles (A. -L. Pasanen *et al.* 1992 ; Schmidt 2006).

Les matériaux non organiques sont donc moins susceptibles d'être métabolisés et utilisés comme substrat par les champignons (Grant *et al.* 1989 ; Beata Gutarowska 2010 ; Hoang *et al.* 2010), mais cependant, des saletés et des poussières peuvent se trouver sur les surfaces intérieures des bâtiments et être alors utilisées comme une source de nutriments par les micro-organismes (Simons 2018, 104). C'est ainsi que des matériaux n'étant théoriquement pas sensibles à la prolifération microbienne peuvent néanmoins présenter des mycéliums visibles (Hoang *et al.* 2010) et favoriser la dissémination fongique plus largement dans les édifices.

Figure 18. Mycélium colonisant une dalle en béton et démarrant initialement sur une palette en bois



Source : <https://www.merule-expert.com/champignons-insolites>

Les micro-organismes possèdent ainsi une grande capacité à contaminer et dégrader une vaste diversité de matériaux. Cette ubiquité certaine est aussi rendue possible par la variété des réponses physiologiques que les champignons et moisissures sont capables d'exprimer au regard d'autres paramètres environnementaux.

Plusieurs autres facteurs comme la teneur en oxygène, la valeur de pH du substrat, la présence d'oxygène ou encore des propriétés de surface des matériaux peuvent aussi

influencer la croissance fongique en l'inhibant ou en la favorisant. Ils sont abordés dans les paragraphes suivants. (Schmidt 2006 ; A.-L. Pasanen *et al.* 1992 ; Anna-Liisa Pasanen *et al.* 2000 ; A.-L. Pasanen *et al.* 2000 ; Xie *et al.* 2011)

a) Contamination de surfaces vs. contamination aérienne

L'évaluation directe de la pollution de l'air intérieur par prélèvements aériens a été largement rapportée au cours des dernières années (T. Verdier *et al.* 2014 ; Thomas Verdier 2015) afin d'estimer les risques pour la santé des usagers selon le degré d'exposition aux contaminants microbiens (Beata Gutarowska et Piotrowska 2007 ; A.-L. Pasanen 2001 ; Portnoy, Barnes, et Kennedy 2004 ; Gorny 2004). Ces risques sont liés à une large gamme de paramètres (Doll 2002) :

- les genres/espèces de micro-organismes (qui déterminent une partie des contaminants) ;
- le mode d'exposition (inhalation, contact avec la peau, les yeux, ingestion) ;
- les conditions environnementales (convection, température, etc.) ;
la superficie totale de la croissance microbienne ;
l'aérosolisation (ou dissémination aérienne) des contaminants, etc.

Néanmoins, de nombreux auteurs ont aussi suggéré que les prélèvements d'échantillons aériens ne sont pas suffisants pour décrire complètement l'ensemble de la microflore présent à l'intérieur des bâtiments, en particulier dans les bâtiments humides ou endommagés par l'eau (Bex *et al.* 2007 ; Andersen *et al.* 2011 ; Lappalainen *et al.* 2001 ; Raw, Aizlewood, et Warren 1999).

La détection et l'identification des micro-organismes qui se développent sur les matériaux de construction permettraient de fournir des renseignements pertinents sur les sources potentielles de contaminants microbiens en suspension dans l'air (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016 ; Raw, Aizlewood, et Warren 1999) et de leur impact potentiel sur les agressions microbiennes sur les matériaux. Par exemple, la présence de matériaux lignocellulosique (bois et ses dérivés comme carton, papier) n'est pas indispensable à la germination des spores et à la croissance fongique. Comme nous l'avons vu précédemment, quelques poussières cellulosiques suffisent.

En outre, les espèces produisant des spores mucilagineuses qui restent préférentiellement attachées à des substrats nécessitent l'utilisation de méthodes d'échantillonnage de surface, afin de dresser un inventaire de la biodiversité microbienne le plus complet possible (Raw, Aizlewood, et Warren 1999).

Ainsi, le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France recommande l'échantillonnage direct sur matériaux de construction en plus des prélèvements aériens, afin d'évaluer au mieux la prolifération microbienne à l'intérieur des bâtiments et les risques associés (Bex *et al.* 2007).

Comme cela a été souligné, la corrélation directe entre les micro-organismes des surfaces intérieures et les problèmes de santé des occupants s'avèrent difficiles à prouver, même s'il est reconnu que des impacts existent et que des maladies sont liées à certains contaminants.

Néanmoins, l'étude des micro-organismes qui contaminent et prolifèrent à la surface ou à l'intérieur des IBS est indispensable pour l'évaluation de leur durabilité face au risque

d'agression fongique. Or, les techniques de prélèvement et d'analyse disponibles sont nombreuses, hétérogènes et elles ont un impact sur les résultats observés. Les paragraphes suivants proposent de préciser la situation sur ces méthodes.

b) Propriétés : rugosité de surface et porosité

La structure des produits de construction et l'état de leur surface ont également un fort impact sur la capacité des micro-organismes à coloniser un environnement et à s'y développer. Sur les matériaux de construction, deux paramètres sont principalement pris en compte : la porosité (%), type...) et la rugosité.

Les matériaux peuvent être classés en trois catégories de porosité (Bex *et al.* 2007, 23) :

- Matériaux poreux, avec une distribution variée de la taille des pores des substrats, parmi lesquels, sont distingués :
 - Ceux possédant une porosité « fermée » : les vides constitutifs ne communiquent pas entre eux, rendant la circulation des fluides impossible (par exemple, la pierre très fermée comme le granit) ;
 - Ceux à porosité « ouverte » : les vides sont reliés par des canaux plus ou moins fins permettant la circulation des fluides (gaz et liquides). Plus les canaux sont de grande section, plus le matériau est perméable à l'eau qui le traverse facilement. Plus ces canaux sont fins (capillaires), moins le matériau est perméable (mais aussi plus l'eau peut circuler et remonter haut, quelles que soient la forme et la longueur du capillaire). La pression, la pesanteur et l'évaporation par les parois vont limiter la hauteur de la remontée capillaire. Peuvent se regrouper avec des caractéristiques très variables : des matières minérales (briques, parpaings, etc.), et les fibres végétales ;
- Matériaux à structure compacte sans pore ni capillaire (le verre, les métaux et divers produits plastiques non expansés) ;
- Les fibres minérales : il s'agit d'un cas particulier, car leur capillarité ne s'exerce qu'à travers le vide lié à l'enchevêtrement de leur réseau fibreux (contrairement aux fibres végétales, dont la porosité s'exprime aussi dans la structure de leurs parois et cellules : microporosité), et peut être supprimée à l'aide d'un traitement réduisant leur mouillabilité.

Ces caractéristiques vont intervenir à la fois sur l'absorption de l'eau et sur l'accumulation de nutriments à la surface (Simons 2018 ; Hoang *et al.* 2010). Or, comme nous l'avons vu, la croissance des micro-organismes sur les matériaux de construction est largement conditionnée par la présence d'eau et de nutriments disponibles. L'hypothèse émise par (Thomas Verdier 2015) est que les matériaux permettant la fixation des nutriments et l'adsorption de l'eau favorisent indirectement l'adhésion et le développement fongique. (Beata Gutarowska 2010 ; Beata Gutarowska et Piotrowska 2007 ; B. Gutarowska et Żakowska 2002 ; D'Orazio *et al.* 2014)

La plupart des matériaux de construction se caractérisent par une porosité et une rugosité de surface et notamment les IBS, qui de surcroît ont un comportement spécifique en matière d'absorption d'eau (hygroscopicité, capillarité). L'ensemble des matériaux de construction peuvent donc contenir et stocker de l'eau mobilisable par les micro-organismes quand l'environnement intérieur et le système constructif autorisent une humidité relative élevée ou lorsque des accidents d'eau liquide surviennent (fuites, condensation).

De plus, des surfaces à forte porosité et rugosité peuvent favoriser le dépôt et l'adhésion des nutriments contenus dans la poussière et les substances organiques résultant de l'activité dans le bâtiment (ou le traversant). La combinaison de ces deux facteurs favoriserait alors le développement microbien en surface (Simons 2018, 106 ; Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016 ; Lugauskas, Levinskait, et Pečiulyt 2003 ; Van den Bulcke, Van Acker, et Stevens 2007).

Néanmoins, selon l'état de l'art de (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016), bien que les mécanismes d'adhésion des micro-organismes sur les surfaces et leurs interactions ont été rapportés dans la littérature (sur les métaux, plastiques, etc.), peu d'études auraient été menées sur les matériaux de construction et – selon nous - moins sur les IBS, principalement car leur nature poreuse et leur comportement à l'humidité rendent l'analyse plus complexe. Ce manque constitue en conséquence une limite forte à la compréhension des mécanismes de croissance fongique sur ces matériaux, pour lesquels les interprétations et les prévisions de croissance concernant les critères de porosité et de rugosité restent difficiles et lacunaires.

C. Dynamiques spatiales et temps d'exposition

Il s'agit certainement du point le plus critique et difficile à analyser : le temps d'exposition nécessaire à la formation de moisissures varie considérablement selon les conditions environnementales dans lesquelles se trouve le matériau. La germination puis la croissance fongique sont fortement influencées par la durée d'exposition du matériau à des conditions favorables de température et d'humidité. Ce couple « conditions » / « temporalité » est un des facteurs déterminants plus importants.

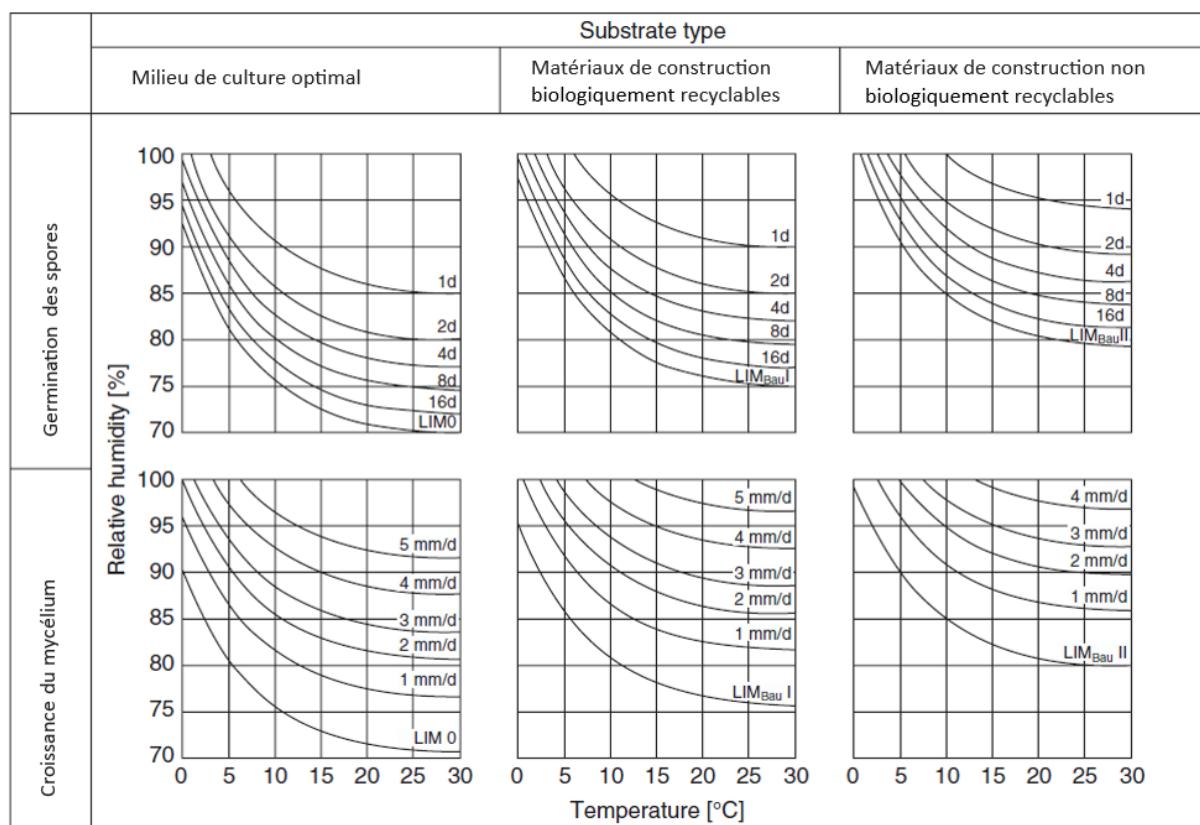
Tout d'abord, les matériaux de construction inorganiques ont des exigences d'humidité minimale plus élevées et un temps d'exposition plus long par rapport au milieu optimal pour qu'une croissance fongique soit observée, notamment car la quantité d'éléments nutritifs disponibles dans le substrat impacte le taux de croissance microbienne (D'Orazio 2012).

Dans des conditions environnementales favorables (température de surface et humidité relative), un temps d'exposition plus court est nécessaire pour que la germination se produise, cependant, les conditions de surface peuvent varier considérablement à l'intérieur d'un même bâtiment (en raison de ponts thermiques, de fissures dans les murs, selon le climat intérieur du local considéré et la localisation dans le bâtiment, etc.) (D'Orazio 2012).

Ensuite, plusieurs auteurs (P. Johansson *et al.* 2012 ; P. Johansson 2014 ; A.-L. Pasanen *et al.* 2000 ; Sedlbauer, Krus, et Breuer 2003) ont effectué des études comparant les dynamiques de croissance fongique d'échantillons en les soumettant d'un côté à des conditions d'humidité constante et, de l'autre, à un régime dynamique plus proche de la réalité avec une humidité relative connaissant des fluctuations.

Sur la base des catégories de la classification fongique fondée sur la relation entre la température, l'HR % et le type de substrat (K. Sedlbauer 2001) a également mis au point des systèmes d'isoplèthes qui corrèlent la température à l'humidité relative (Cf. Figure 19).

Figure 19. Vitesse de germination des spores et de croissance mycélienne selon différents types de substrat



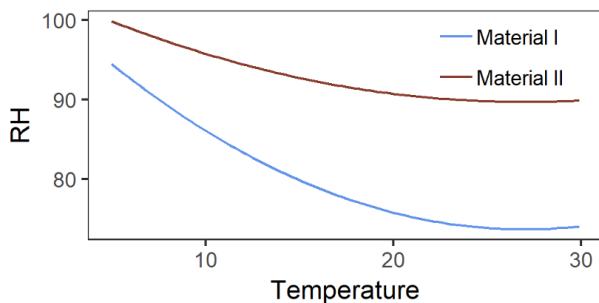
Traduit de (K. Sedlbauer 2001)

P. Johansson et Svensson soulignent par ailleurs la difficulté de connaître et de comprendre précisément ces dynamiques, montrant par l'expérimentation en comparant l'observation sur le terrain avec les résultats de modèles de prédition de croissance, que les conclusions sont parfois très divergentes (Pernilla Johansson et Svensson 2020). Les prochains paragraphes s'appuyant sur plusieurs des expérimentations étudiées en dressent une synthèse.

La croissance des moisissures est prédictive lorsque les mesures effectuées lors des essais sur le terrain étaient supérieures à la courbe limite de croissance définie par la méthode de l'HR critique⁶⁴. RHcrit dépend de la température, donc à une température plus élevée, RHcrit est plus bas. Les valeurs peuvent être décrites pour une plage de températures, sous forme d'isoplèthes. Deux exemples sont présentés à la Figure 20.

⁶⁴ L'HRcrit correspond à l'HR la plus basse à laquelle peut se développer une croissance fongique pour un matériau spécifique.

Figure 20. Deux exemples de RHcrit de matériaux hypothétiques à des températures différentes



(P. Johansson et al. 2020)

Dans le prochain exemple (Figure 21), un échantillon est situé dans le vide sanitaire 3, la moisissure est donc prédictée sur un panneau dur mince dans le vide sanitaire 3. Chaque point au-dessus de la courbe (cercle ou cercle d'étoiles) est une valeur minimale, car la valeur exacte n'a pas pu être déterminée en raison d'une dérive de l'enregistreur) est d'une heure, et donc il n'y a que quelques heures au total au-dessus de la courbe limite.

Figure 21. Mesures de température et d'HR dans des vides sanitaires et greniers

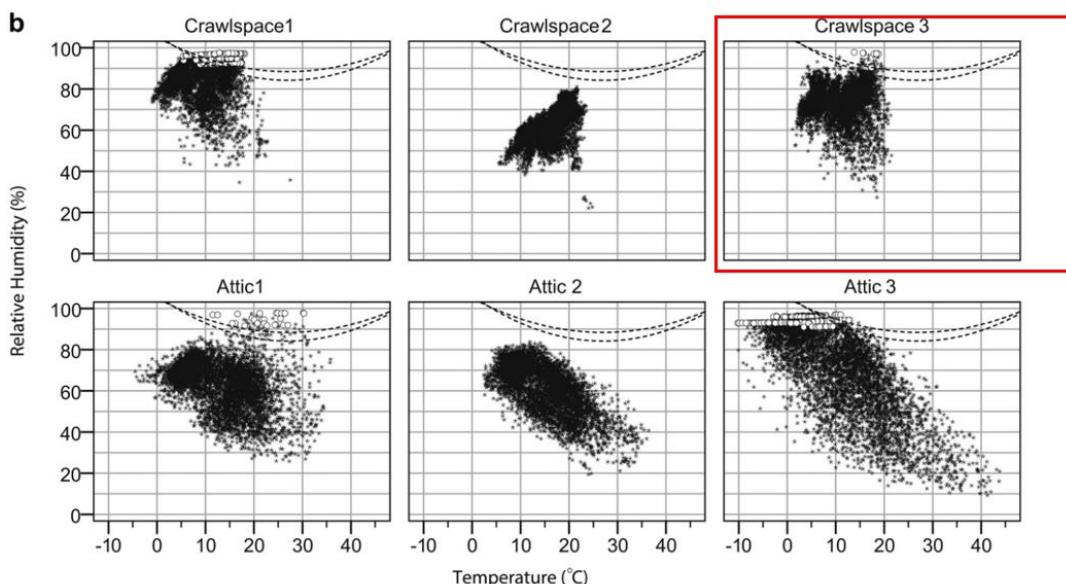


Fig. 5. Growth limit curves for (a) chipboard and (b) thin hardboard and measured temperature and relative humidity in three crawl spaces and three attics over 2.5 years. Each dot represents one measuring point. The circles indicate values where drift of the loggers made it impossible to calculate a "true calibrated value" of RH and are therefore minimum values. The dotted lines are the lower and upper growth limit curves estimated from results in laboratory tests.

L'exemple expliqué est marqué d'un carré rouge.

Source : (Pernilla Johansson, Svensson, et Ekstrand-Tobin 2013)

Le temps pour atteindre l'HRcrit en laboratoire était de plusieurs semaines : la durée dépendait des critères d'évaluation du moment où l'HRcrit était atteint et de la température étudiée. À condition constante, le temps de croissance était toujours plus long en laboratoire que dans l'exemple d'essai sur le terrain (P. Johansson et al. 2012), voir ci-dessous Figure 22 et Figure 23.

Figure 22. Temps d'atteinte du niveau de criticité humide (en semaines)

Material	Temperature	10 °C			Criterion (b), first rating ≥ 2	Criterion (a), median value ≥ 2	Criterion (a), first rating ≥ 2
		22 °C					
Asphalt paper		3 < $w \leq 3$	2 < $w \leq 3$	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w
Cement-based board		12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w
Chipboard		6 < $w \leq 7$	3 < $w \leq 4$	10 ≤ $w \leq 11$	8 < $w \leq 9$		
Exterior gypsum plaster board		0 < $w \leq 1$	0 < $w \leq 1$	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w
Extruded polystyrene board		12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w
Glass fibre board		12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w
Pine sapwood		7 < $w \leq 8$	4 < $w \leq 5$	10 ≤ $w \leq 11$	7 < $w \leq 8$	7 < $w \leq 8$	7 < $w \leq 8$
Plywood		5 < $w \leq 6$	4 < $w \leq 5$	11 < $w \leq 12$	11 < $w \leq 12$	11 < $w \leq 12$	11 < $w \leq 12$
Thin hardboard		11 < $w \leq 12$	3 < $w \leq 4$	12 ≤ w	10 < $w \leq 11$	10 < $w \leq 11$	10 < $w \leq 11$
Wet-room gypsum plaster board		4 < $w \leq 5$	3 < $w \leq 4$	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w	12 ≤ w

Source : (P. Johansson et al. 2012)

Le tableau présente les résultats du délai d'apparition de moisissure basés sur une moyenne de résultats de 7 capteurs relevés hebdomadairement à des taux d'humidité relative compris en 75 et 95 % à des température de 22 ° C et 10 ° C (P. Johansson *et al.* 2012).

Ainsi dans (Pernilla Johansson, Svensson, et Ekstrand-Tobin 2013), la divergence entre la croissance attendue et la croissance prévue pourrait s'expliquer par le fait que le temps passé sur le terrain (quelques heures) était trop court, car il n'y avait pas de croissance en laboratoire avec cette durée dans des conditions plus favorables.

La Figure 23 compare les résultats attendus selon ce critère avec les observations réelles de croissance sur les éprouvettes à la fin de l'étude de terrain. Aucune courbe limite de croissance n'a été établie pour les panneaux à base de ciment, les panneaux en fibres de verre ou les panneaux en polystyrène expansé, car la moisissure ne s'est développée sur aucun de ces matériaux dans aucun des tests en laboratoire.

Figure 23. Croissance attendue et observée des moisissures par matériaux et par site

	Crawl space 1		Crawl space 2		Crawl space 3		Attic 1		Attic 2		Attic 3	
	Expected	Existing										
			+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Plywood	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Chipboard	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Thin hardboard	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Exterior gypsum paper board	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Wet room gypsum paper board	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Asphalt paper	+	+	- ^a	-								
Cement-based board	- ^a	-										
Glassfibre board	- ^a	-										
Expanded polystyrene board	- ^a	-										

^a This is based on the finding that there was no mould growth on any of the test pieces in the laboratory

L'exemple expliqué est marqué d'un carré rouge.

Source : (Pernilla Johansson, Svensson, et Ekstrand-Tobin 2013)

En ce qui concerne les conditions fluctuantes, Pernilla Johansson montrent que lorsque les conditions varient entre des conditions favorables et non favorables, le délai d'amorçage de la croissance sera plus long (P. Johansson, Bok, et Ekstrand-Tobin 2013). Lors de l'essai sur le terrain, il y avait de grandes variations (comme toujours dans différentes parties du bâtiment), par conséquent, le temps nécessaire à la croissance des moisissures devrait être encore plus long que dans les conditions favorables constantes en laboratoire.

Figure 24. Contrôle de l'humidité relative et de la température dans trois greniers en Suède

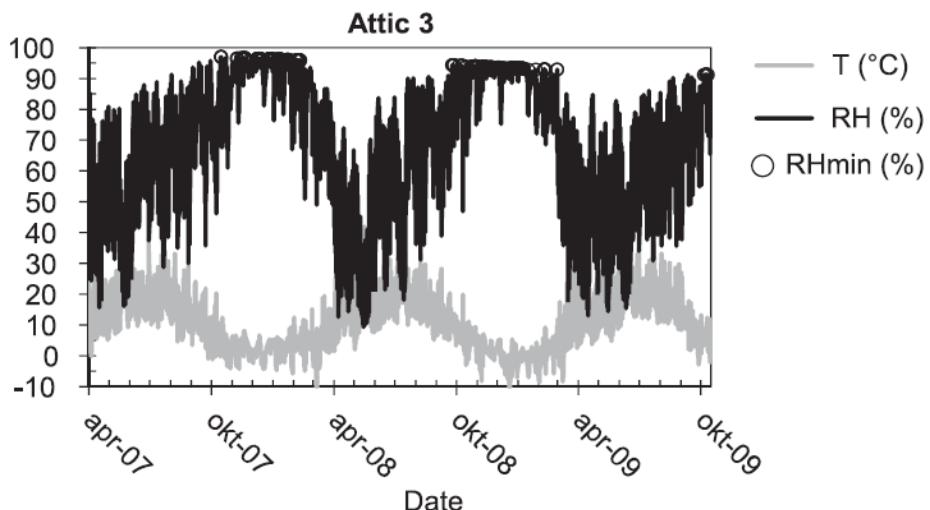


Fig. 3. Monitored relative humidity and temperature in three attics in Sweden. Values marked “RH_{min}” refer to data where the drift of the loggers was such that the correct value could not be estimated. The specified dates refer to when microbiological analyses were performed.

Source : (Pernilla Johansson, Svensson, et Ekstrand-Tobin 2013)

Voir aussi (Johansson, Lång et al. 2021) pour l'explication des conditions défavorables et défavorables par rapport au RHcrit.

Figure 25 Valeur médiane de croissance de moisissures à 22 °C pendant 12 semaines

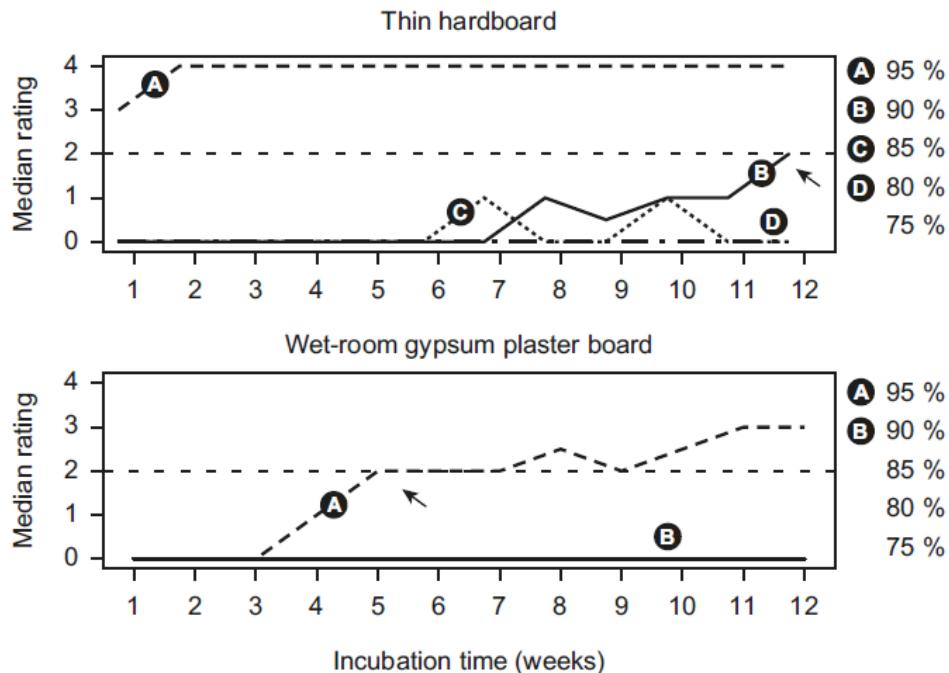
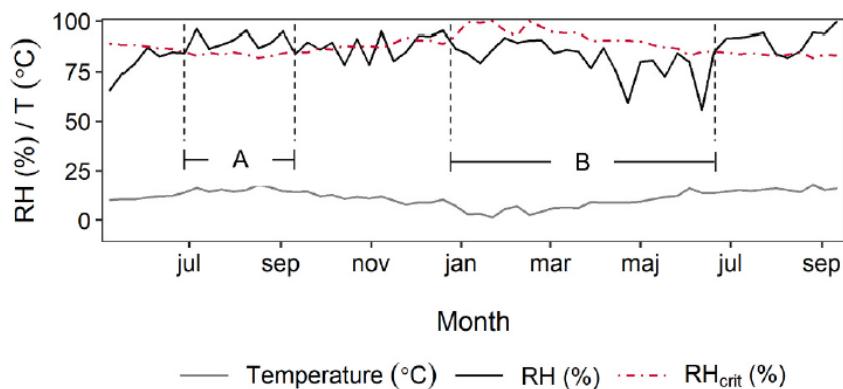


Fig. 1. Median value of mould growth on test pieces ($n = 6$) of building materials at different RH at 22 °C during 12 weeks. The critical moisture limit is reached when the median ≥ 2 , represented as a horizontal dotted line. The arrow indicates the point when this is reached.

Source : (P. Johansson et al. 2012)



(P. Johansson, Lång, et Capener 2021)

Dans une autre étude (De Ligne, Vidal-Diez de Ulzurrun, et al. 2019), L. De Ligne a effectué une analyse de la dynamique de croissance fongique spatio-temporelle dans différentes conditions environnementales en mesurant l'impact de celles-ci sur le potentiel de croissance du mycélium (des hyphes), dont elle a mesuré les différences notables en termes de longueurs et d'angles de recouvrement des surfaces.

L'ensemble de ces études conclut sur le fait que les fluctuations d'humidité étaient un facteur significatif du retard de la croissance fongique

(De Ligne, Vidal-Diez de Ulzurrun, et al. 2019) démontrent par ailleurs sur une durée assez courte (62 h) que lorsque des mycélium de *Coniophora puteana* (basidiomycète, saprophyte, champignon lignivore) et *Rhizoctonia solani* (basidiomycète, parasite) sont exposés à des conditions supposées extrêmes et entrent dans un stress hydrique en termes de disponibilité de l'eau, l'humidité relative de l'air joue alors un rôle fondamental, confirmant que la croissance, si elle est limitée, est toujours possible avec une HR de 65 %.

Dans les travaux de Hukka et Viitanen (Hukka et Viitanen 1999), il n'y a pas eu de croissance de moisissure à 75 % HR. L'humidité ambiante pour la croissance des moisissures était de 80 à 85 %, ce qui a entraîné une activité de l'eau de 0,80 à 0,85 (Viitanen et Ritschkoff, 1991). Un point important qui peut être pris en compte concerne les exigences en matière d'activité de l'eau pour les moisissures. Aucune croissance de moisissure n'a été observée chez les espèces de champignons lorsque l'activité de l'eau était inférieure à 0,62 (Scott, 1957).

Des niveaux excessifs d'eau dans les matériaux peuvent conduire à des développements de micro-organismes. Les facteurs favorisant leur développement sont la teneur en eau, la température, la physico-chimie du substrat (pH de surface, espèces ioniques et sels nutritifs, porosité et hygroscopicité), la luminosité et le temps d'exposition.

D'autres mécanismes physico-chimiques peuvent favoriser la croissance fongique. Certains peuvent être induits par l'humidité ou la teneur en eau dans les matériaux tels que la cristallisation de sels permettant de favoriser l'apport de nutriments, ou la dégradation/corrosion (du fait de la formation d'acides organiques) de matériaux favorisant l'accès à des nutriments carbonés ou azotés initialement présents dans la matrice chimique de ces matériaux.

Selon (Brian Flannigan, Samson, et Miller 2017), tous les matériaux de construction sont sensibles à la croissance microbienne s'il y a suffisamment d'eau disponible.

Cependant, les résultats disponibles ne sont pas faciles à résumer en raison de la grande variété de matériaux et des facteurs qui interviennent pour conditionner le développement fongique (D'Orazio 2012, 33)

4. Caractérisation de la prolifération fongique sur les matériaux de construction

Une analyse des dynamiques de croissance spatio-temporelles des champignons sous différentes conditions environnementales (De Ligne, Vidal-Diez de Ulzurrun, et al. 2019) montre que les champignons sont omniprésents et peuvent se développer dans les environnements les plus extrêmes tels que les climats tropicaux, arides, le pôle arctique, les milieux sous-marins, etc.

La problématique de contamination et de prolifération des micro-organismes dans l'environnement intérieur est extrêmement complexe et les approches possibles pour en caractériser la microflore sont multiples, tant en ce qui concerne les méthodes de prélèvement (surfacique, aérien, de poussières, fragments de matériaux) que de leur analyse par la quantification ou l'identification d'espèces, de composants ou de substances émises. (ANSES 2016, 346).

Les conditions favorisant la croissance microbienne, telles qu'une humidité élevée et la présence de nutriments, sont facilement satisfaites dans les bâtiments humides,

endommagés par l'eau ou mal isolés. En conséquence, les matériaux de construction d'intérieur deviennent des sources majeures et durables de contaminants microbiens. (Thomas Verdier 2015).

Cette multiplicité reflète bien la complexité de l'exposition microbienne. Elle représente une limite majeure pour la standardisation (ou l'homogénéisation) et la validation des méthodes, ainsi que pour la détermination de valeurs limites. Ces limites sont d'autant plus vraies que pour chaque matériau, les dynamiques peuvent varier, ainsi que les comportements hygrothermiques et les espèces contaminantes.

Selon la méthodologie adoptée, plusieurs informations sur les communautés microbiennes peuvent être combinées (Thomas Verdier 2015, 38) :

- L'étude microbiologique d'échantillons témoins de matériaux de construction provenant de l'environnement intérieur ;
- Les observations des potentiels facteurs d'influence de la prolifération microbienne issus du lieu, de l'humidité mesurée et du type de matériau colonisé ;
- Les essais en laboratoire permettent de confirmer ou de réfuter les différentes hypothèses formulées : les conditions expérimentales visent à évaluer alors l'impact des paramètres influençant la croissance microbienne (% HR, température, éléments nutritifs, etc.).

Dans ses travaux de doctorat (Paic Lacaze 2016), Isabelle Paic Lacaze, revenant sur le rôle de « niche écologique » des matériaux de construction, a mis en évidence plusieurs facteurs favorables au développement fongique. Notamment des successions de micromycètes en partie expliquées par des différences de vitesses de croissance et une évolution des conditions environnementales (nutriments, humidité), mais aussi des relations entre espèces plus importantes en milieu naturel que dans un environnement contrôlé. Pour elle, une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu lors de la colonisation ouvre des perspectives alternatives aux solutions basées sur l'introduction de substances biocides.

La littérature offre à comprendre que l'étude de la contamination et du développement fongique s'aborde de différentes manières :

- L'étude d'un habitat (ou d'un matériau) existant dans son propre environnement pour lequel une recherche de contamination est menée : il s'agit donc de prélever une source microbienne sur une surface ou au sein d'un matériau et de l'analyser afin d'accéder à la diversité des genres et espèces présentes ;
- L'étude de la résistance d'un matériau à la croissance fongique (sa durabilité face à cette agression) : dans ce cas, le matériau sera soumis à des conditions spécifiques de température et d'humidité, il pourra être préparé au préalable (stérilisé puis contaminé artificiellement par une ou plusieurs souches) ou bien sa propre flore sera testée et enfin le développement fongique sera analysé.

Les techniques d'échantillonnage et d'analyse afin d'évaluer la prolifération microbienne sur les matériaux de construction sont nombreuses et il n'existe pas vraiment de protocole d'essai spécifique standardisé ni de recommandation particulière pour les matériaux de construction, ce qui explique la grande variété des méthodes employées et très certainement, des écarts observés dans les résultats (Thomas Verdier 2015).

Ainsi, avant de pouvoir tester la résistance des matériaux face au risque fongique, il s'agit tout d'abord de savoir comment détecter ou identifier cette présence et de la quantifier. Nous présentons ici une vision très simplifiée d'un domaine extrêmement pointu et constamment

en évolution. Nous invitons les lecteurs.rices à consulter les références mentionnées pour un accès à des informations plus détaillées.

A. Méthodes de prélèvement

Nous avons vu que pour caractériser les flores microbiennes à l'intérieur des habitations, différents environnements et milieux peuvent être étudiés (ANSES 2016) :

- l'air ;
- les matériaux de construction constituant les sols, les murs, les plafonds, etc. ;
- d'autres matériaux et surfaces intérieures (meubles, décoration, réseaux de ventilation, etc.).

Ainsi que le fait, d'observer et de connaître précisément la flore intérieure peut être complexe et le risque de non-détection d'une contamination existe (Simons 2018, 36-37) :

- La dissémination des contaminants (spores, métabolytes) dans l'air intérieur est irrégulière et est conditionnée par de nombreux facteurs (type de matériau contaminé, vitesse de l'air, etc.) ;
- Des champignons pathogènes peuvent ne diffuser que peu de spores dans l'air ;
- Les spores peuvent ne plus être cultivables après leur aérosolisation.

Il est aussi important de rappeler ici que la détection de spores de certaines espèces n'est pas toujours associée à des pathologies du bâti, et inversement, la non-détection d'espèces pathogènes ne signifie pas leur absence.

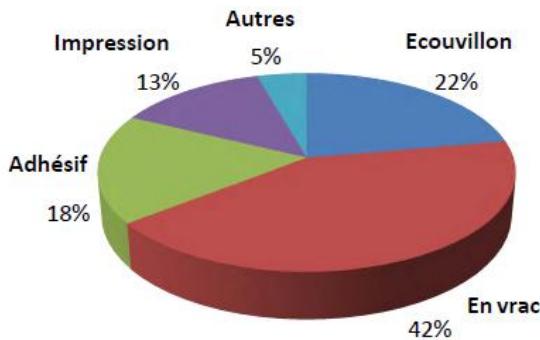
Par ailleurs nous nous concentrerons ici à lister les différents types de prélèvements et d'analyse d'échantillons concernant uniquement les matériaux de construction sans détailler chacune de leurs particularités et renvoyons à la lecture de plusieurs études les explicitant (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016 ; Simons 2018). Nous nous baserons également sur la distinction faite concernant les prélèvements entre les méthodes utilisées *in situ* et en conditions expérimentales en laboratoire.

1. Types de prélèvements

Il existe de nombreuses méthodes de prélèvement de populations microbiennes sur surfaces solides, chacune ayant ses conditions et supports privilégiés, tels que l'écouvillonnage, le prélèvement par adhésif ou par gélose de contact. Sauf mention spéciale, les informations sur les prélèvements proviennent des thèses et études suivantes : (T. Verdier *et al.* 2014 ; Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016 ; Simons 2018 ; Laborel-Préneron *et al.* 2021)

La Figure 26 montre la fréquence d'utilisation dans la littérature des différentes techniques retrouvées dans des études menées sur matériaux de construction pour 33 études analysées par Verdier dans sa thèse (Thomas Verdier 2015, 27).

Figure 26. Occurrences des techniques de prélèvement dans la littérature



Le prélèvement « **en vrac** » est une méthode destructrice, et la plus couramment utilisée. Elle consiste à gratter, racler ou carotter une petite quantité de matériau, de l'ordre du gramme (0,3-5 g), directement à partir de surfaces à analyser. Une mise en culture directe de l'échantillon ou d'une suspension résultant de dilutions successives permet l'isolement des micro-organismes.

L'**écouvillonnage** permet de récupérer des micro-organismes ou poussières par frottement sur une surface (potentiellement contaminée) à l'aide d'une tige à « brosse » cylindrique. Il s'agit d'une méthode relativement peu coûteuse et applicable en toutes circonstances. L'écouvillonnage est privilégié lorsque l'accès à la surface est difficile et que les autres techniques de contact ne peuvent être utilisées (Santucci *et al.* 2007 ; Beguin et Nolard 1994). La méthode est adoptée dans différentes études (Ellringer, Boone, et Hendrickson 2000 ; Lappalainen *et al.* 2001 ; Bellanger *et al.* 2009 ; 2009 ; De Muynck, De Belie, et Verstraete 2010), généralement pour réaliser des prélèvements dans les angles de murs ou sous les seuils de fenêtres.

Le principe de **l'impression (ou contact de gélose)** consiste à presser directement un milieu de culture contre la surface d'intérêt. Le temps de contact et la pression exercée doivent être suffisants pour permettre le transfert des micro-organismes sur la gélose (Simons 2018, 38). Par cette méthode, un milieu de culture est directement appliqué contre la surface à prélever pendant une période suffisante pour permettre le transfert des micro-organismes. (Thomas Verdier 2015, 28)

Les méthodes par **adhésion** (bande adhésive) reposent sur le principe de l'application d'un adhésif sur la surface à échantillonner, de préférence plane et non humide.

2. Prélèvements *in-situ*

Le choix de la méthode de collecte *in-situ* sur matériaux de construction se base surtout sur la notion de surface poreuse ou non poreuse, mais sans faire l'objet de procédures ou de protocoles communs de prélèvement standardisé, ce qui peut entraîner de fortes variabilités dans les résultats. D'autant plus que les propriétés physico-chimiques et structurelles (porosité, isotropie, capillarité, hygroscopie, etc.) des matériaux observés (inertes et non poreux : verre, acier, plastique ; ou plus poreux comme le béton, enduits, mortiers, plâtre,

etc.) influent fortement sur le développement, mais aussi sur le prélèvement (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016 ; Simons 2018 ; E. Vereecken, Vanoirbeek, et Roels 2015).

Ainsi, la comparaison des études implique de considérer chaque méthode de prélèvement et ses propres biais, qui influencent notamment les types de micro-organismes isolés.

Au vu de l'influence problématique de la méthode de prélèvement sur les résultats d'analyse, le groupe de travail « Moisissures dans l'habitat » du Conseil Supérieur de l'Hygiène Publique de France a établi dès 2006 un consensus sur la méthodologie des prélèvements et conseille, pour les recherches de micro-organismes sur les surfaces et matériaux à l'intérieur de constructions, d'utiliser au moins deux des techniques d'échantillonnage suivantes : écouvillon, échantillonnage en vrac, adhésif, impression (Bex *et al.* 2007 ; ANSES 2016).

B. Les analyses en laboratoire : synthèse des méthodes et protocoles

L'analyse des prélèvements de micro-organismes ou de leur croissance directement en laboratoire est un vaste domaine de recherche dans lequel de nombreux protocoles et essais ont été développés. Nous ne pourrons détailler ici la multitude des approches, mais nous en listerons néanmoins de manière très simplificatrice les principales et renvoyons aux thèses de doctorat de Verdier et Simons qui en font une présentation plus exhaustive (Thomas Verdier 2015 ; Simons 2018), ainsi qu'à (Jones et Brischke 2017a) dont les états de l'art sur ce sujet sont très riches.

De nombreux moyens d'évaluation du risque du développement de moisissures en laboratoire. Lors des tests, les matériaux étudiés placés dans des conditions favorables à la multiplication des espèces fongiques. Au préalable ils ont pu être :

- stérilisés pour éviter des contaminations pendant la manipulation ou le transport ;
- inoculés par des spores de différentes espèces (cultivées et reproduites en laboratoire) ou non. Dans ce cas, seules les espèces naturellement présentes dans le matériau sont testées ;

Il existe donc deux grandes familles d'études (Claude 2018) :

- Les études expérimentales réalisées avec des conditions variables dont résultent des cinétiques de croissance et de décroissance des moisissures. Le modèle VTT (Hukka et Viitanen 1999), initialement développé pour deux essences de bois (épicéa et pin) et récemment étendu à d'autres matériaux, cherche à reproduire cette cinétique ;
- Les études réalisées avec des conditions constantes. Avec ces conditions, l'outil d'évaluation du risque de germination le plus courant est appelé isoplèthe. Une isoplèthe est une limite qui définit les combinaisons de température et d'humidité relative en dessous de laquelle il n'y a pas germination sur un certain type de substrat. Face à la quantité de substrats et d'espèces fongiques, Sedelbauer propose (Sedelbauer 2001) une classification des matériaux pour ne garder que quatre types de substrats (milieu de culture optimal, matériaux biodégradables, matériaux contenant des éléments biodégradables, matériaux non biodégradables sans nutriment).

Les études fondamentales sur la caractérisation fongique, la reproduction et le développement des micro-organismes en contextes constructifs dresse un tableau relativement bien délimité des objets rencontrés et des mécanismes mis en œuvre. Ainsi les paramètres d'hygrométrie, de température, de qualité nutritive du substrat doivent être pris en compte dans une période qui peut s'avérer un critère déterminant dans la définition de la criticité des situations rencontrées.

Partie 2. Comportement des isolants biosourcés (IBS)

Nous avons vu dans la première partie de notre étude que quatre paramètres sont particulièrement déterminant pour le développement de micro-organismes :

- Les paramètres hygrométriques ;
- Les gammes de températures ;
- La variété de substrat, qui pourra composer une surface de développement et qui pourra être dégradé ;
- et le facteur temporel qui intervient dans les phases de contamination, de croissance et de réduction.

Nous tenterons donc d'étalonner ces paramètres dans un contexte constructif, afin de préciser les conditions d'un développement fongique pathogène pour les habitants, mais surtout pour les matériaux, voire le bâti lui-même.

La recherche dans le domaine de la caractérisation physique des matériaux et des parois peut être encore, dans certains de ses aspects, considérée comme relativement jeune. La littérature montre une évolution constante de la modélisation du comportement hygrothermique des bâtiments depuis la première crise énergétique de 1973, mais plus encore depuis le début des années 2000, car une pression sociétale croissante pour, à la fois réduire la consommation d'énergie et l'impact environnemental qu'elle induit sans toutefois dégrader le confort, a conduit à des améliorations majeures des outils utilisés pour quantifier les enveloppes et les performances des bâtiments, notamment en termes de transfert de chaleur, d'air et d'humidité (HAM) (Evrard 2008).

L'activité de l'eau détermine directement les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microbiologiques de nombreuses substances. Les conditions favorables à la formation de moisissures et à la croissance des microbes sont directement influencés par la valeur a_w (Activity water). L'activité de l'eau est un facteur critique qui détermine directement la possibilité et le taux de croissance des micro-organismes. La température, le pH et quelques autres facteurs ont une certaine influence également, mais l'activité de l'eau représente le plus important de ces facteurs (Thomas Verdier 2015).

Pour une teneur en eau identique, deux matériaux peuvent avoir des propriétés différentes : un matériau contenant de l'eau non disponible pour les réactions métaboliques se

conservera plus longtemps tandis qu'un matériau contenant davantage d'eau libre pourra plus facilement se dégrader.

La présence d'eau libre dans les matériaux est nécessaire à l'apparition des moisissures (Nielsen *et al.* 2004 ; Viel *et al.* 2019 ; Viel 2019) et celle-ci peut provenir de plusieurs origines : inondations, défauts de l'enveloppe des bâtiments (fuites d'eau en toiture, défauts d'étanchéité à l'air, ponts thermiques, etc.), mauvaise gestion de la ventilation hygiénique et de l'aération des logements (notamment des pièces humides)...

L'activité de l'eau a_w (Activity water) caractérise et quantifie la proportion d'eau libre par rapport à l'eau liée : 0 correspond à un milieu sans une seule molécule d'eau et 1 correspond à une eau liquide pure. Le calcul de a_w passe par la mesure de la pression d'équilibre du matériau avec son milieu, comparativement à la pression d'équilibre de l'eau pure, placée dans les mêmes contraintes de volume et de température. La notion de disponibilité de l'eau dans un aliment peut être définie aux moyens de : l'Humidité Relative d'Équilibre (HRE) et de l'activité de l'eau, notions présentées précédemment.

1. Mécanismes de transfert de la vapeur et de l'eau, et de fixation dans les milieux poreux

La teneur en eau des matériaux influence leur masse volumique mais aussi l'ensemble de leurs paramètres hygrothermiques comme la capacité thermique, la conductivité thermique, la capacité d'absorption des cellules végétales, etc. Les phénomènes impliqués sont complexes et dépassent l'objectif de cette présentation orientée sur les problématiques des IBS. Cependant, il nous a paru essentiel de développer suffisamment la dimension méthodologique de cette question avant d'aborder ses implications concrètes.

Pour décrire les mécanismes de transfert et de fixation de l'eau dans différents états et sur divers supports, nous retiendrons trois aspects fondamentaux de sa caractérisation dynamique que sont :

- Le stockage, la caractérisation de la présence de l'eau ;
- Les transferts d'humidité qui revient sur les causes de la présence d'eau ;
- Le séchage, son corolaire très important pour l'analyse du développement fongique prenant en compte le facteur temporel.

A. Stockage d'humidité. Hygroscopicité et isotherme de sorption

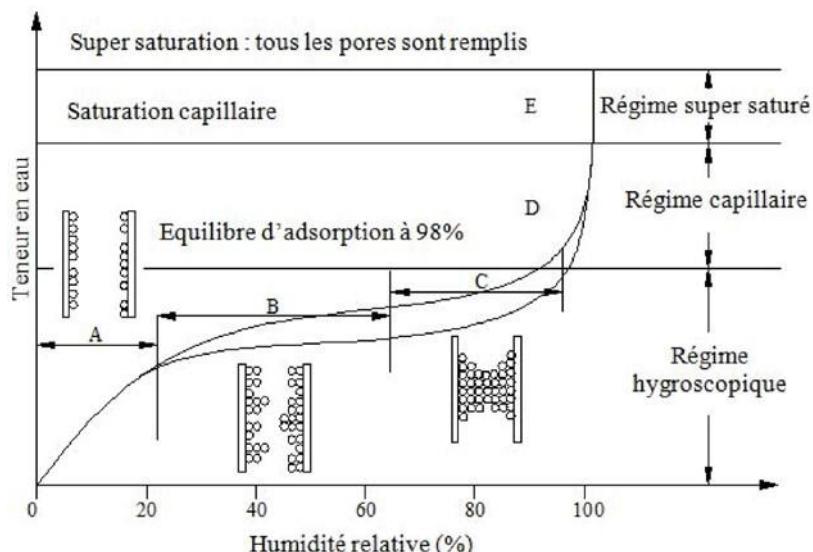
La capacité des isolants biosourcés à stocker de l'humidité et à échanger celle-ci à travers leurs pores avec l'air environnant (son humidité relative), se traduit par la dimension triphasique du matériau (solide, liquide, gazeuse).

Cette propriété du matériau à stocker l'humidité en lui et à la restituer à l'environnement extérieur lorsqu'il est mis en contact avec l'humidité ambiante de l'air caractérise sa capacité hydrique ou son hygroscopicité. Celle-ci est illustrée et s'évalue par l'isotherme de **sorption**, qui est fonction de l'humidité relative de l'air et de la teneur en eau du matériau à une température donnée. Plus l'aire sous la courbe de sorption est grande et plus le matériau est hygroscopique (Héberlé 2016 : 10).

Trois types de régimes sont distingués selon la gamme d'humidité relative à laquelle est soumis un matériau ou une paroi (Figure 28 et Figure 29) (Qin 2007 cité dans HUMIBATEX (Garnier 2017)) :

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

Figure 27. Illustration des différents mécanismes de transfert et de rétention de l'humidité dans les matériaux poreux du bâtiment



La Figure 28 détaille les phénomènes d'absorption dans un pore utilisés dans la description des mécanismes de transferts et rétentions ci-dessus.

Figure 28. Schéma des phénomènes d'adsorption physique dans un pore (Claude 2018 : 32)

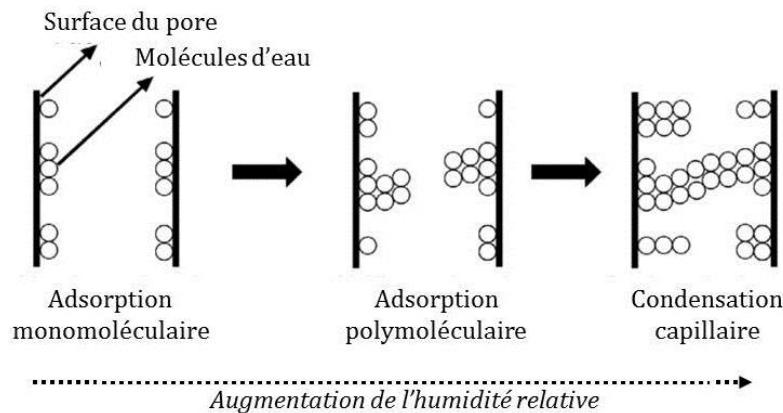
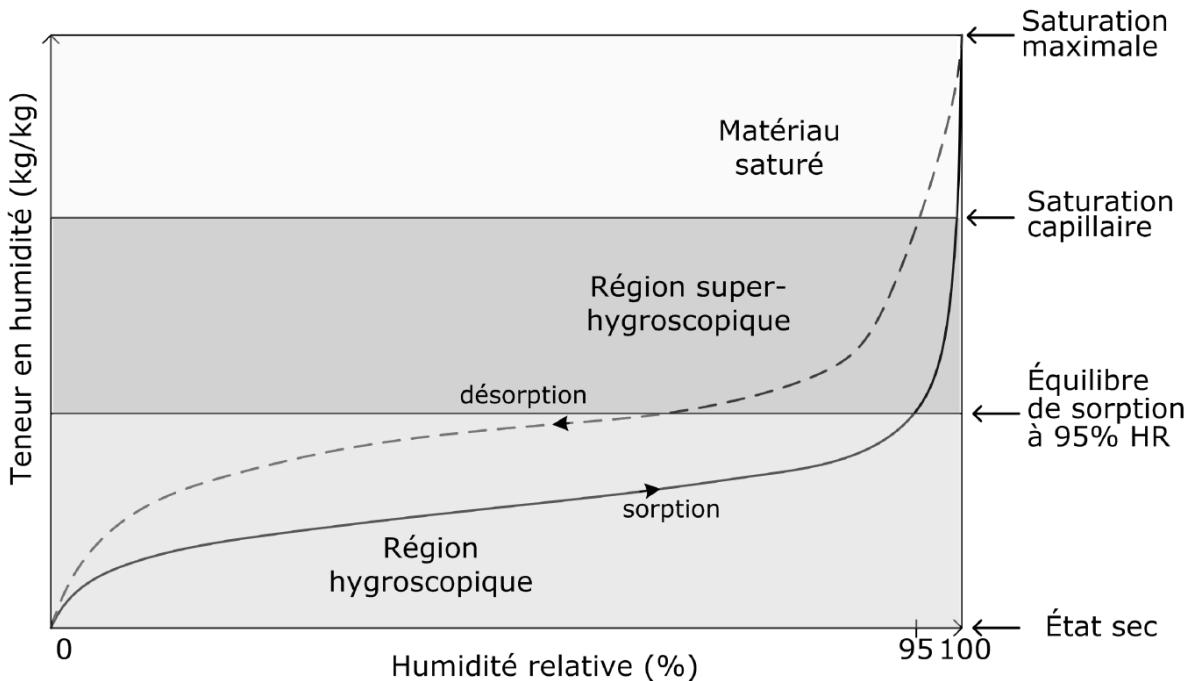
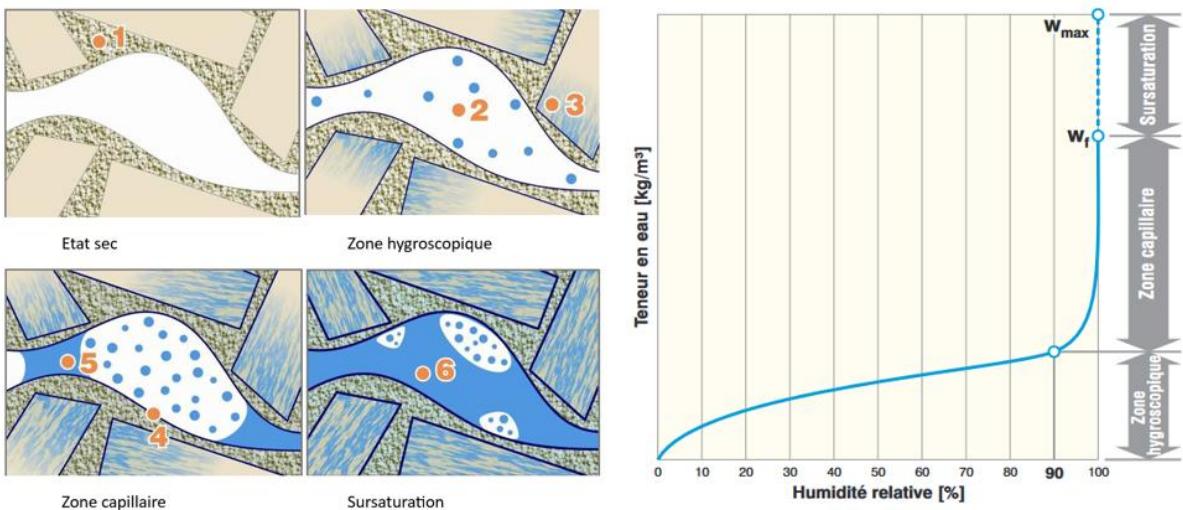


Figure 29. Forme générale de la courbe de sorption d'un matériau hygroscopique (Piot 2009)



Selon A. Evrard (Evrard 2008) : « Les matériaux à structure poreuse ouverte, comme les matériaux à base de chaux-chanvre, sont perméables au gaz et au liquide en fonction de leur structure poreuse spécifique. L'humidité peut être stockée temporairement pendant le transfert » (Figure 30).

Figure 30. Représentation des différents états de perméabilité à l'humidité des matériaux poreux



- À l'état sec, l'eau a été complètement évacuée. Certaines molécules H_2O peuvent être « piégées » en raison de réactions chimiques à l'intérieur du matériau (1). (Dans les conditions naturelles européennes, l'humidité relative dans les conditions de construction n'atteint jamais 0 %.) La teneur en eau est notée w , et est exprimée en [$kg.m^{-3}$] ou en [%masse].

- Dans la zone hygroscopique : en cas de faible humidité relative, le transfert d'humidité dans le matériau (2) est progressivement adsorbé à la surface des pores (théorie BET), d'abord dans les grands pores puis à travers toute la structure poreuse (3). Ce phénomène est appelé adsorption hygroscopique.

- La zone capillaire montre qu'en cas d'humidité relative plus élevée et jusqu'à saturation libre, généralement de 80 ou 90 % à 100 % de l'HR, deux autres phénomènes se produisent simultanément à l'adsorption : la diffusion de surface (4) et la condensation capillaire (5).

- Le dernier schéma fait référence à la région de sursaturation qui suit la saturation libre. La teneur en eau peut encore augmenter, théoriquement jusqu'à ce que tous les pores soient remplis d'eau non liée (6). La teneur maximale en eau w_{max} [$kg.m^{-3}$] est calculée par des mesures sur la porosité totale.

(Branders, Evrard, et De Herde 2010)

La teneur en eau w s'adapte constamment aux nouvelles conditions hygrothermiques et l'équilibre est généralement long à atteindre.

La Zone hygroscopique s'arrête lorsque les condensations capillaires (condensation dans les petits pores) et la diffusion de surface (le film d'eau adsorbé est suffisamment épais pour permettre le mouvement de l'eau) dans la structure poreuse du matériau commencent à être significatives par rapport à la sorption hygroscopique. Pour le béton de chanvre testé, ces deux phénomènes sont considérés comme commençant autour de 93 % HR. La Zone capillaire s'étend ainsi de 93 % jusqu'à saturation libre (100 % de l'HR). Sur saturation libre, la teneur en eau peut encore augmenter, mais sa valeur n'est pas unique pour un niveau d'HR donné et dépend fortement de la pression et du temps. (Evrard 2008, 57)

B. Transfert d'humidité

Un matériau capillaire actif en contact avec l'eau absorbera cette eau jusqu'à ce qu'elle atteigne sa saturation libre w_f (teneur en eau à saturation libre). Cette teneur en eau w_f correspond à la fonction de stockage de l'humidité à une humidité relative de 1 (= 100 %). En raison des poches d'air piégées dans la structure des pores, cependant, la saturation libre est inférieure à la teneur maximale en eau w_{max} qui est déterminée par la porosité. Des

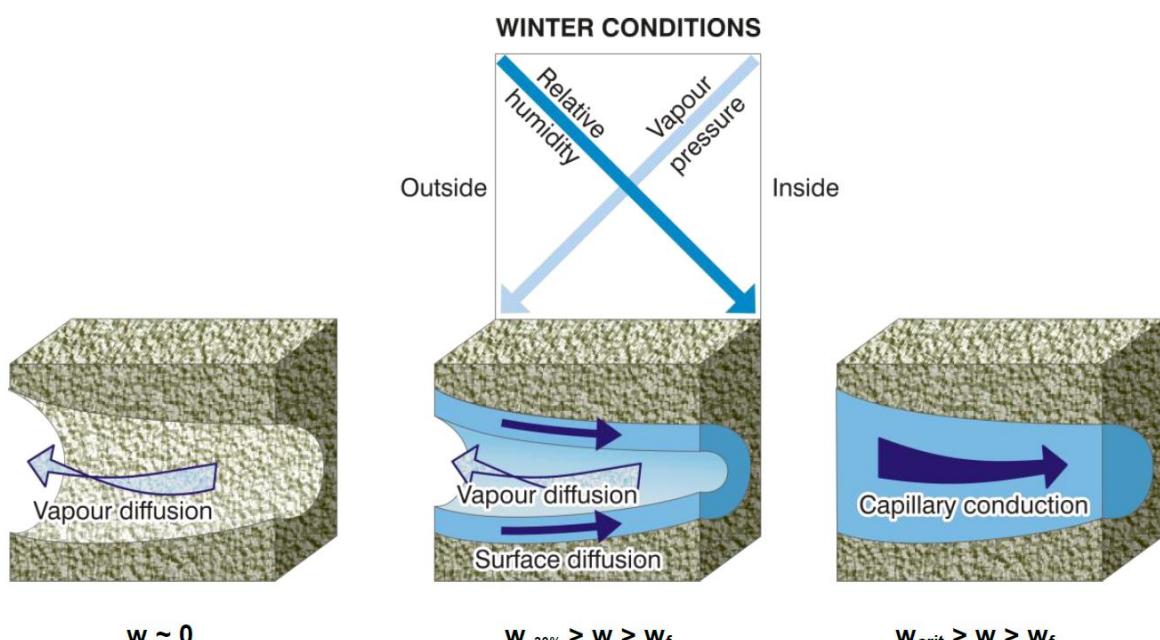
teneurs en humidité supérieures à w_f peuvent par exemple résulter de condensation dans un gradient de température (en particulier dans les matériaux isolants ; ceux-ci ne sont souvent pas capillaires-actifs et ont donc $w_f \sim 0$).

La saturation libre w_f se classe parmi les données de matériaux standard et est connue pour la plupart des matériaux. La » teneur en humidité pratique » w_{80} qui correspond à l'humidité d'équilibre à une HR de 0,8 est une autre quantité standard.

Toutes les phases de l'eau (liquide, vapeur et glace) sont regroupées sous les termes « humidité » et le transfert de vapeur peut être diffusif ou convectif. Lorsqu'il est convectif, il est lié au flux d'air et sera donc négligé à l'échelle du matériau. Le transfert d'eau liquide peut également être divisé en deux phénomènes différents : la diffusion de surface et la conduction capillaire (considérés comme des phénomènes diffusifs même si un déplacement de matière (écoulements convectifs) existe (Evrard 2008).

Du point de vue des transferts d'humidité, il est donc important de distinguer ces phénomènes : d'une part, le transfert de vapeur, et de l'autre, le transfert d'eau liquide, soit par adsorption, soit par redistribution. La force motrice de ces phénomènes est différente, et, bien qu'ils soient interdépendants, ces transferts peuvent parfois avoir des directions opposées. (Evrard et De Herde 2010)

Figure 31. Transferts d'humidité



(Evrard 2008)

1. Résistance à la diffusion de vapeur

La résistance à la diffusion de vapeur est caractérisée par deux grandeurs (Héberlé 2016) :

- « **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 s'oppose à la diffusion de vapeur d'eau, plus le μ est élevé.

Par convention, on considère que l'air immobile possède un coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau $\mu = 1$. [On parle de perméabilité ou de perméance, ou de son contraire, de résistance à la diffusion à la vapeur d'eau] ;

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

2. Capillarité

D'après (Evrard 2008), « la capillarité des matériaux dépend essentiellement de la géométrie interne à l'échelle des pores. » Ainsi :

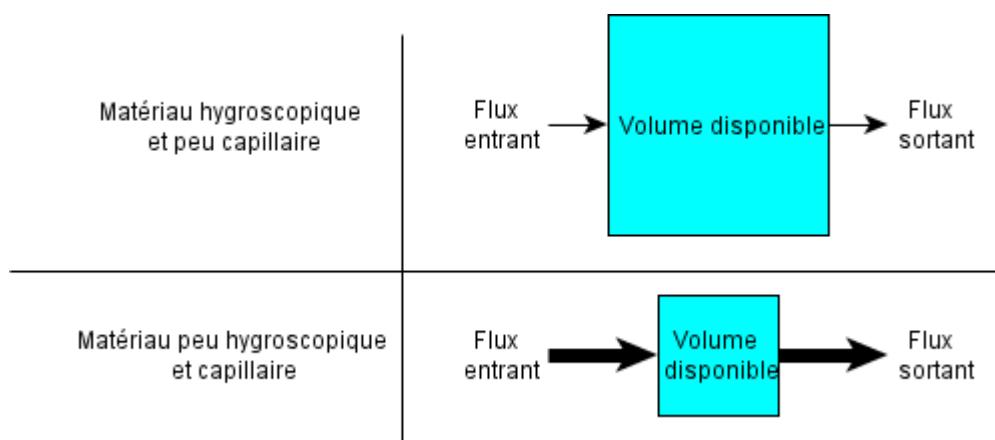
« Pour le transfert de liquide, la détermination expérimentale (mesure du profil de teneur en eau) ne peut pas distinguer la diffusion de surface de la conduction capillaire. La force motrice réelle de la diffusion de surface est le gradient de la teneur en eau (épaisseur différente dans le film d'eau adsorbé). Pour la conduction capillaire, c'est le gradient en pression de capillaire.

Sur la base de la loi de Thomson (lien entre la pression capillaire et l'humidité relative) et de la définition de la courbe de rétention d'humidité (relation univaleure entre la teneur en eau et l'humidité relative), les deux phénomènes peuvent être exprimés comme des phénomènes diffusifs (très faible débit) avec une seule relation. »

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.

Il est notable qu'un matériau peut être à la fois très capillaire et hygroscopique ou peu capillaire et très hygroscopique, comme le montre la Figure 32.

Figure 32. Hygroscopicité et capillarité



source : [cahiers HYGROBA, 2013]

La dépendance entre les propriétés structurelles et fonctionnelles des isolants, entre leurs performances et leur teneur en eau, est essentielle pour des isolants biosourcés qui, en raison de leur structure complexe et variée de *milieux poreux* présentent des capacités diverses concernant :

- la chaleur :

- pour la transmettre (*conductivité*) de la chaleur⁶⁵ ;
- pour la stocker (*capacité thermique, diffusivité thermique, effusivité thermique*) ;
- la vapeur d'eau⁶⁶ :
 - pour se laisser traverser par elle (*perméance et résistance à la diffusion de vapeur d'eau, épaisseur d'air équivalente, libre parcours moyen : diffusion moléculaire et effusion*), être donc plus ou moins ouvert ou fermé à ce transfert ;
 - pour la stocker (*adsorption, condensation capillaire*) ;
- l'eau liquide⁶⁷ :
 - pour se laisser traverser par elle (*perméabilité liquide et coefficient de transfert capillaire, pression capillaire ou succion*), et être donc plus ou moins capillaire ;
 - pour la stocker et être donc plus ou moins hygroscopique et/ou plus ou moins poreux.

3. Tampon hydrique

Le modèle de **tampon hygrique**, peu utilisé jusqu'alors sur les matériaux de construction courants, permet de valoriser le caractère hygroscopique des matériaux biosourcés et donc leur performance hygrothermique (Claude 2018, 54).

La capacité de tampon hygrique, qui consiste à adsorber et désorber la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant selon les variations des conditions environnantes permet une régulation de l'humidité globale de la paroi et de l'espace intérieur, et tend à améliorer la sensation de confort ainsi que la qualité de l'air (Padfield 1998).

Le test de la capacité de tampon hygrique (Moisture Buffer Value, MBS) est un test réalisé sous sollicitations dynamiques⁶⁸ ; sa grandeur tient compte de la capacité du matériau à stocker l'humidité (isotherme de sorption) et à se laisser traverser par la vapeur (perméabilité à la vapeur d'eau) (Construction & Bioressources 2012). Ce protocole d'essai a été proposé à l'issue du NordTest (Rode 2005) impliquant plusieurs laboratoires européens de Génie Civil sur différents matériaux : béton, brique, béton cellulaire, plâtre, bois, etc.

⁶⁵ Pour les matériaux isolants, nous ignorons ici les autres modes de transfert de chaleur que sont la *convection* et le *rayonnement*.

⁶⁶ Le transport de la vapeur d'eau dans un milieu se fait sous une différence de pression partielle de vapeur d'eau par diffusion et proportionnellement à la *perméabilité à la vapeur* du milieu (Garnier 2017), laquelle caractérise le matériau vis-à-vis des transferts de vapeur par diffusion.

⁶⁷ Le déplacement d'eau liquide dans un milieu poreux se fait par capillarité, à une zone proche de la saturation, où la vitesse d'écoulement, exprimée par la loi de Darcy, est proportionnelle au gradient de pression capillaire et à la conductivité hydraulique. La capillarité dépend directement de l'état hydrique du matériau ou de la paroi. La gravité terrestre peut ajouter une composante verticale au flux d'eau liquide (pour des pores de grande dimension) et peut être négligée par rapport à la pression de succion pour les pores de petites dimensions. Dans les pores de plus grandes dimensions, l'apparition d'eau sous forme liquide a lieu à des niveaux d'humidité relative très élevés (Garnier 2017 : 24).

⁶⁸ Sa caractérisation expérimentale se fait par le biais d'un essai détaillé dans le projet Nordtest de l'Université Technique du Danemark (Rode 2005). Les échantillons sont soumis à une variation d'humidité relative (HR) : 8 heures à 75 %, suivies de 16 heures à 33 %. Le même cycle de 24 heures est répété jusqu'à l'état d'équilibre. La température de l'essai est maintenue constante à 23 °C.

La valeur de tampon hydrique s'exprime en g/(m². %HR), et est définie par :

$$MBV_{expérimental} = \frac{\Delta m}{A (HR_{max} - HR_{min})}$$

Avec :

- Δm correspond à la variation de masse durant la phase d'adsorption ou de désorption
(g) A : Surface d'échange (m²)
- HRhigh (haute) / HRlow (basse) : Humidités relatives haute et basse au cours du cycle (%). Le MBV est exprimé en g / m² % HR.

Les matériaux sont classés comme plus ou moins bons régulateurs d'humidité en fonction de la valeur de leur MBV. Des matériaux comme les bétons de chanvre sont perçus comme d'excellents régulateurs hydriques dans la mesure où leur MBV est compris en moyenne entre 1,99 et 2,53 g/(m². %HR) (Construction & Bioressources 2012).

Cette adsorption s'accompagne d'une réaction exothermique (production de chaleur) liée au changement de phase opérant dans le matériau : la vapeur d'eau est stockée sous forme liquide par condensation. À l'inverse, l'eau pourra être libérée dans la masse d'air de la pièce lorsque la température augmentera. Cette désorption s'accompagne d'une réaction endothermique (consommation de chaleur) liée au changement de phase opérant dans le matériau : l'eau liquide est déstockée sous forme de vapeur d'eau par son évaporation (Construction & Bioressources 2012).

Une classification des matériaux a été proposée à la suite de cette campagne de caractérisation (Figure 33). La littérature décrit qu'un matériau dont la valeur de MBV est supérieure à 2 est considérée comme étant un excellent régulateur (par exemple, le béton de chanvre possède un MBV max de 2,5 g / m² % HR, voir Figure 34).

Figure 33. Classification des valeurs de MBV proposées selon le Nordtest Project (Collet et al. 2013)

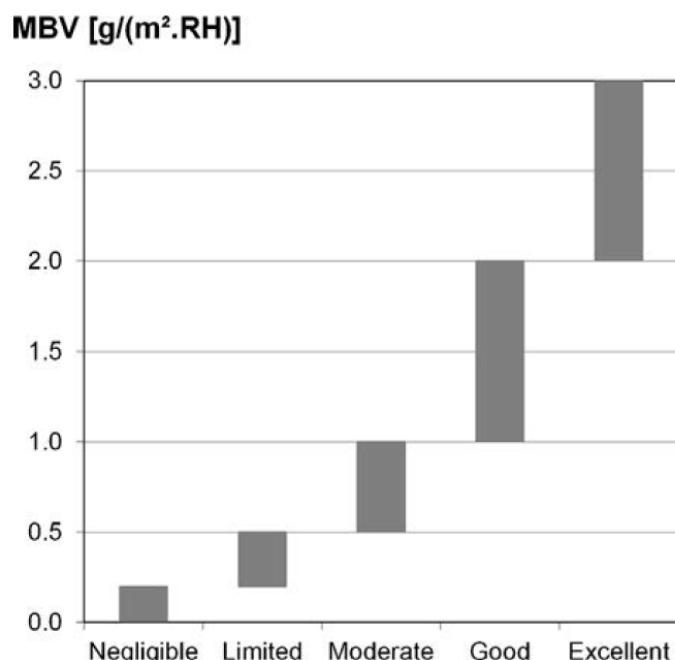
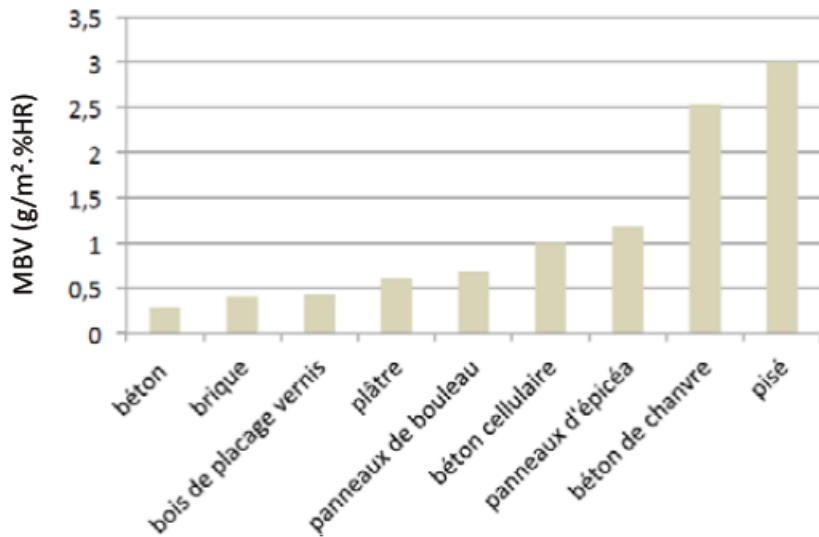


Figure 34. Différentes valeurs de MBV selon les matériaux



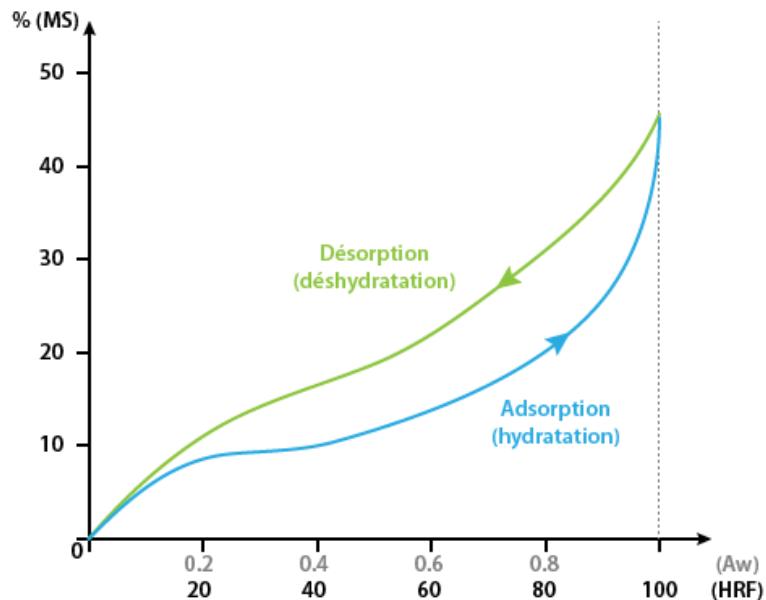
Source illustration : Couvreur, 2014, cité par (Samin 2016)

C. Séchage

1. Principes

L'analyse de l'isotherme d'adsorption et de désorption montre que les 2 courbes ne sont pas superposées (Figure 35) : l'équilibre ascendant (absorption en partant d'un matériau sec) est légèrement différent de l'équilibre descendant (désorption depuis un matériau saturé en eau). Cette hystérésis (cf. Figure 29) peut être relativement importante avec une géométrie de pores spécifique, en particulier dans les matières organiques (Evrard 2008). Cette hystérésis d'un matériau provient du fait que le séchage d'un produit (passage d' $a_w = 1$ à $a_w < 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité qui peuvent, à terme, devenir irréversibles.

Figure 35. Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau



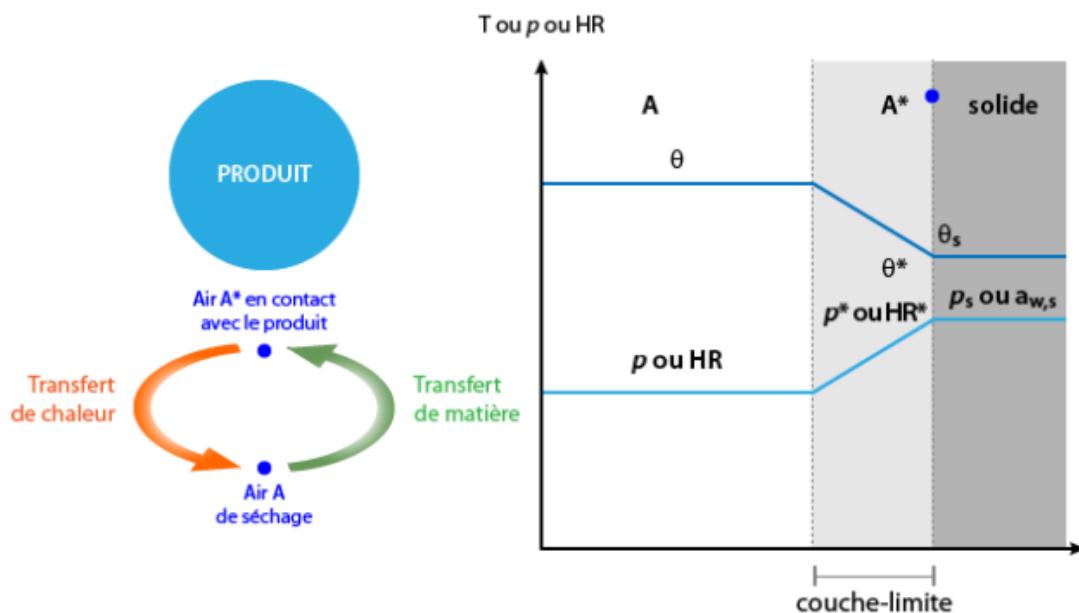
(Karoui 2015) https://tech-alim.univ-lille.fr/sechage/co/Chapitre1_2.html

Pour une teneur en eau donnée, l'équilibre de la désorption s'établit pour des a_w plus faibles que l'équilibre de l'adsorption. C'est le **phénomène d'hystérésis**, qui ne se manifeste que pour des valeurs d' $a_w > 0,2$. L'hystérésis s'explique par deux observations : les pores des aliments sont en général plus petits en surface qu'en profondeur, et la pression de vapeur d'eau nécessaire au remplissage est plus élevée que celle à laquelle les pores se vident (Karoui 2015).

Le séchage se produit lorsque le matériau humide se situe dans un d'air suffisamment chaud et sec. Dans ces conditions, il s'établit spontanément entre le corps et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tel que :

- un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit, sous l'effet de la température ;
- un transfert d'eau s'effectue en sens inverse du fait de la pression partielle d'eau entre l'air et la surface du produit (Figure 36)

Figure 36. Transfert entre l'air et la surface du produit



Source : https://tech-alim.univ-lille.fr/sechage/res/figure_5.png

2. Phénomènes limitant

La vitesse à laquelle s'effectue le séchage est liée à l'allure des transferts internes et externes de matière et de chaleur. Ces transferts correspondent à des mécanismes qui peuvent s'effectuer de manière simultanée et en parallèle, ou de manière consécutive et en série. Dans ce dernier cas, c'est le mécanisme le plus lent qui constitue l'étape limitante, et qui détermine la vitesse du procédé (Karoui 2015).

D. Les mécanismes de transport de chaleur et d'humidité

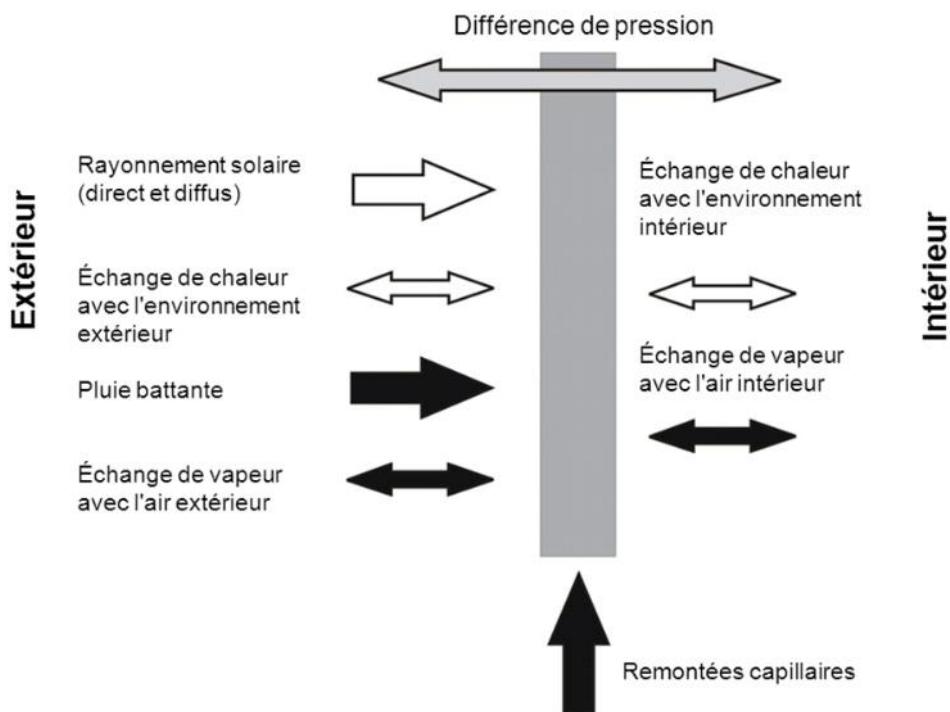
En simplifiant, il est possible de résumer les caractéristiques hygrométriques principales des matériaux au nombre de trois :

- la résistance à la diffusion de vapeur d'eau ;
- l'hygroscopicité ;
- la capillarité.

Or, ces phénomènes ne sont pas séparés, d'où la notion de « transferts couplés de masse et de chaleur », où la chaleur, l'air (la vapeur d'eau) et l'eau liquide sont considérées à travers leur transport dans le matériau, à travers une paroi et à l'interface entre ses couches.

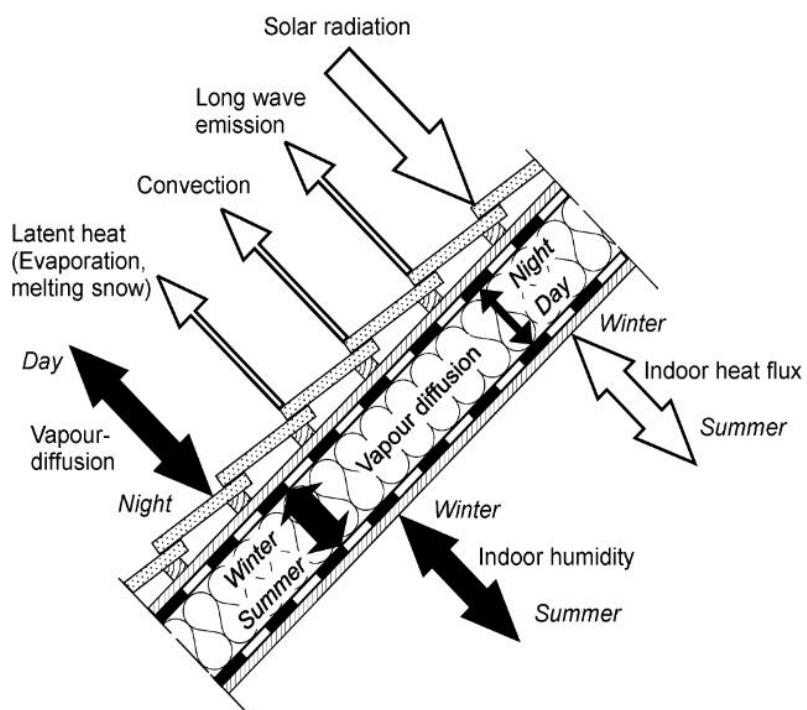
Les transferts **de masse et de chaleur** sont concomitants, mais n'ont pas les mêmes échelles temporelles. Par ailleurs, le stockage-déstockage de chaleur et d'humidité peut être déployés sur des durées de temps relativement longues. Nous pensons ici à l'inertie saisonnière, annuelle, voire davantage pour l'équilibre hydrique d'une paroi après travaux (Figure 37 et Figure 38).

Figure 37. Représentation schématique des phénomènes hygrothermiques agissant sur l'enveloppe et de leur alternance diurne ou saisonnière



Source : (Helmut et al. 2012)

Figure 38. Charges et flux hygrothermiques transitoires dans et autour d'une toiture isolée (Künzel 2000)



Le Tableau 19 regroupe les mécanismes de transport qui peuvent s'opérer. Parmi ces transferts, certains peuvent être négligés et ne seront retenus que le transport de chaleur par

conduction, la chaleur latente d'évaporation {flux d'enthalpie}, le transport liquide moléculaire {Knüdsen} et le flux hydraulique.

Tableau 19. Liste des mécanismes de transport de chaleur et d'humidité, leurs causes et potentiels de transport

Mécanisme de transport	Cause et potentiel de transport
transport de chaleur	conduction de chaleur
	échanges radiatifs
	flux d'air
	flux d'enthalpie dus au mouvement d'humidité
transport de vapeur	diffusion de gaz
	transport moléculaire (effusion)
	diffusion en solution
	convection
transport liquide	conduction capillaire
	diffusion de surface
	flux du aux infiltrations
	flux hydraulique
	électrocinétique
	osmose

(Künzel 1995), trad par Mühlsteff 2013 : 29

2. Les isolants biosourcés (IBS)

Dans ce paragraphe nous exposons simplement quelques éléments d'informations et de questionnement spécifiques aux IBS concernant certains constats et détection de contaminations fongiques considérées comme plus importantes sur les IBS. L'étude de la durabilité de certains IBS est présentée plus loin.

Rappelons au préalable qu'il est établi dans la littérature que d'un point de vue biologique et chimique, les isolants biosourcés sont potentiellement plus sensibles au développement fongique que des matériaux minéraux ou synthétiques. Ceci, pour les raisons suivantes :

- leur composition chimique, constituée de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et de protéines, etc. ;
- et le fait que la plupart des espèces de moisissures synthétisent des enzymes cellulolytiques et ligninolytiques.

Mais notons que lignine et cellulose ne sont pas atteintes de la même manière par les micro-organismes : tout d'abord, selon les espèces (nous avons vu précédemment la spécificité des espèces microbiennes selon les substrats), puis selon la composition des IBS.

A. Composition chimique

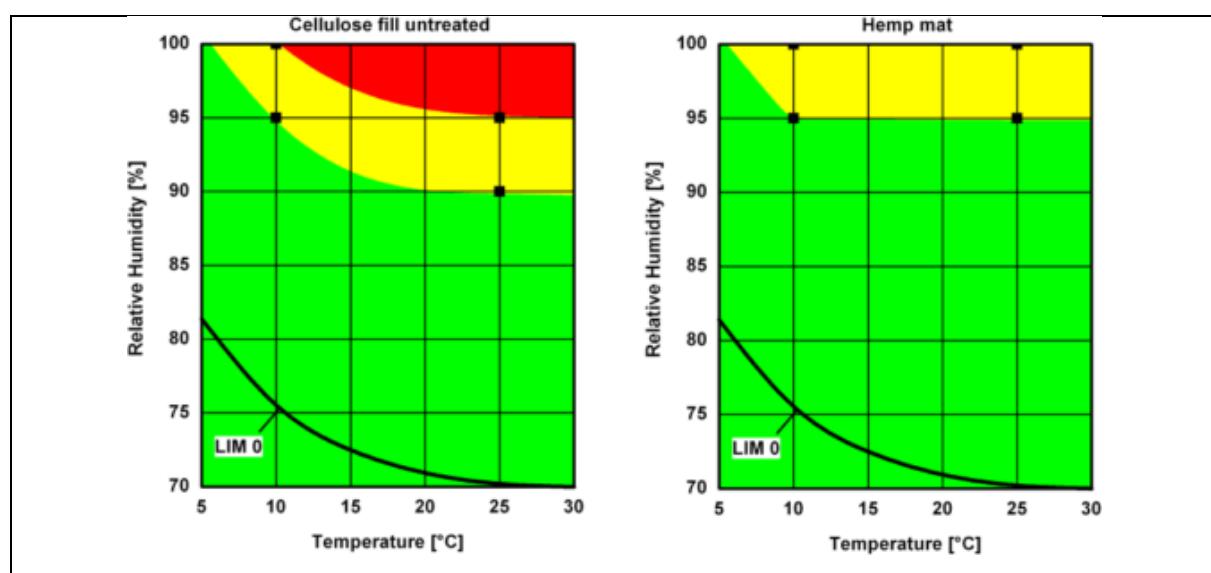
L'étude de (A. Laborel-Préneron 2018) montre que la croissance fongique d'échantillons inoculés avec des souches *d'Aspergillus brassiliensis* (anciennement *Aspergillus niger*) dans des conditions variables de température et d'humidité⁶⁹ de chènevotte de chanvre était moins prononcée sur les échantillons de chanvre que sur ceux de paille céréalière. L'auteur l'explique en raison de :

- la différence de leur composition chimique et de leurs teneurs en lignine et cellulose : une teneur en lignine de 17,2 % a été déterminée pour le chanvre shiv, alors qu'elle n'était que de 5,5 % pour la paille d'orge (Laborel-Preneron 2017)
- de la résistance plus importante de la lignine aux attaques microbiennes par rapport à la cellulose (Harper et Lynch 1981) ;
- et en conséquence de la résistance supérieure du chanvre à la croissance fongique.

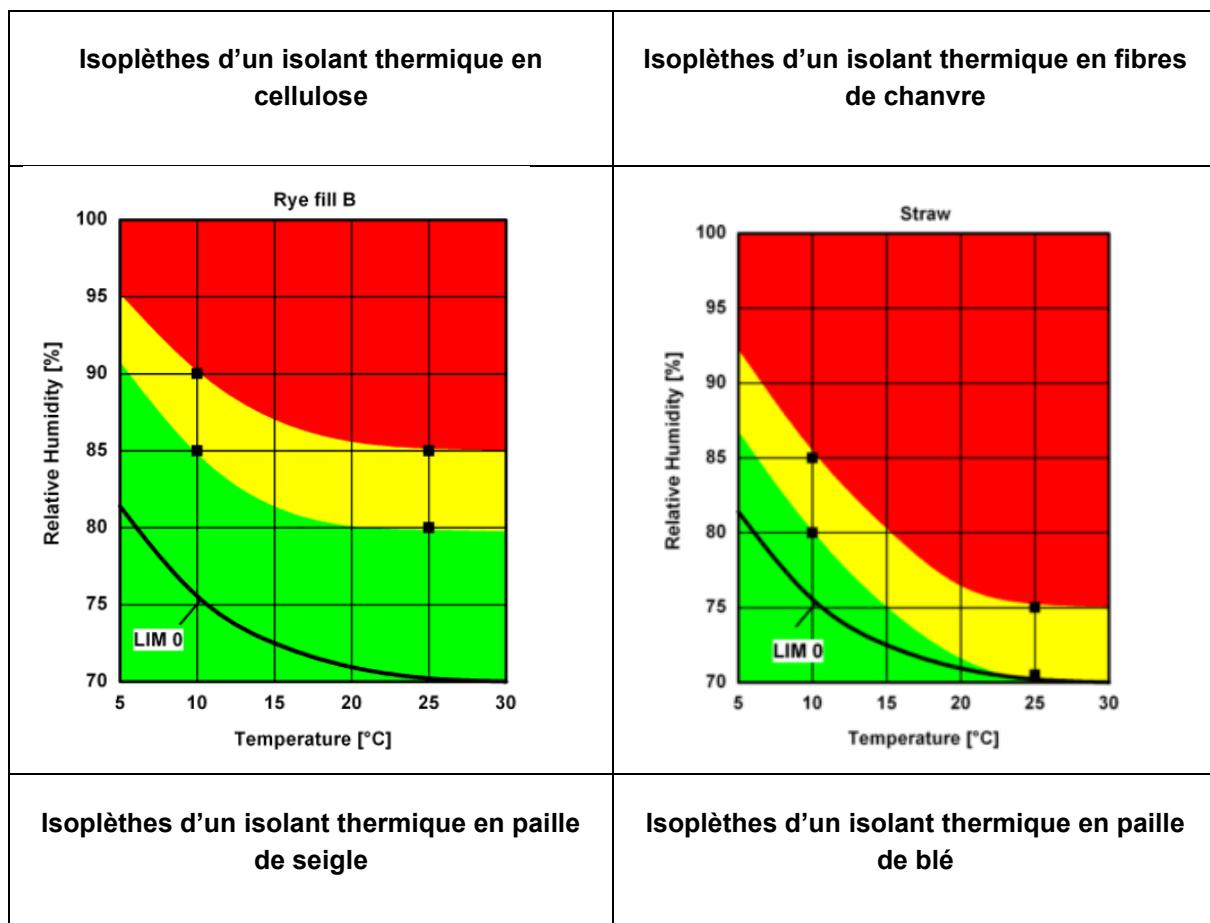
Cette haute résistance à la prolifération microbienne du chanvre a été en outre observée par de nombreuses autres études (Delannoy 2018 ; Sedlbauer *et al.* 2011 ; Viel 2019 ; Viel *et al.* 2019 ; Viel 2018 ; S. Marceau *et al.* 2015 ; Sandrine Marceau, Caré, et Lesage 2016).

La Figure 39 suivante présente un exemple d'isoplèthe de différents matériaux biosourcés. Il s'agit d'une approche pratique, les diagrammes d'isoplèthes présentés peuvent être utilisés comme un système d'indicateur de résistance de moisissure analogue à un feu de circulation. Dans la zone centrale du diagramme, la croissance fongique est possible (« jaune », signifie attention). Dans la gamme supérieure, la croissance fongique se produira (« rouge ») et le matériau n'est absolument pas adapté à ces conditions climatiques. Dans la zone inférieure, il n'y a pas de croissance de moisissure à prévoir (« vert »).

Figure 39. Isoplèthes de quatre matériaux utilisés comme isolant thermique : la cellulose, le chanvre, la paille de seigle et la paille de blé (K. Sedlbauer *et al.* 2011)



⁶⁹ Des échantillons ont été placés à 75 % HR, 84 % HR et 93 % HR pendant douze semaines sur deux groupes, l'un à 20 °C et l'autre à 30 °C.



Le LIM 0 (Lowest Isopleth for Mould) renseigne la valeur de teneur en eau critique nécessaire à la germination des spores selon le type de support. Sedlbauer a également développé un modèle dynamique de croissance de moisissures basé sur les isoplèthes. Ce modèle, Bio-hygrothermal est aujourd'hui largement utilisé et implanté dans le logiciel WUFI-Bio.

Les matériaux à base minérale à très faible teneur en nutriments présentent une résistance assez élevée aux moisissures. D'autres études sur différents matériaux de construction à forte teneur en matière organique n'ont révélé qu'en partie une résistance plus faible à la croissance des moisissures (K. Sedlbauer *et al.* 2011).

Dans cette même étude, on observe que certains IBS, la fibre de chanvre et la cellulose, bien qu'organiques, ont présenté des profils indiquant une résistance élevée à la moisissure. Avec les données mesurées, différents profils peuvent être attribués aux trois classes de substrats mentionnées. Le matériau chanvre présente l'isoplète la plus basse pour la moisissure.

Les mesures présentées sont toutes effectuées dans des conditions stables. Avec la configuration expérimentale, des tests dynamiques peuvent également être effectués.

Sedlbauer & al. ont montré lors de la constitution de leurs courbes isoplèthes en testant différents MBS, que le chanvre n'avait donc aucun risque de développer une moisissure inférieure à 95 % de l'HR, quelle que soit la température, tandis que la prolifération de moisissures sur la paille était susceptible de se produire à partir de 70 % HR. (K. Sedlbauer *et al.* 2011)

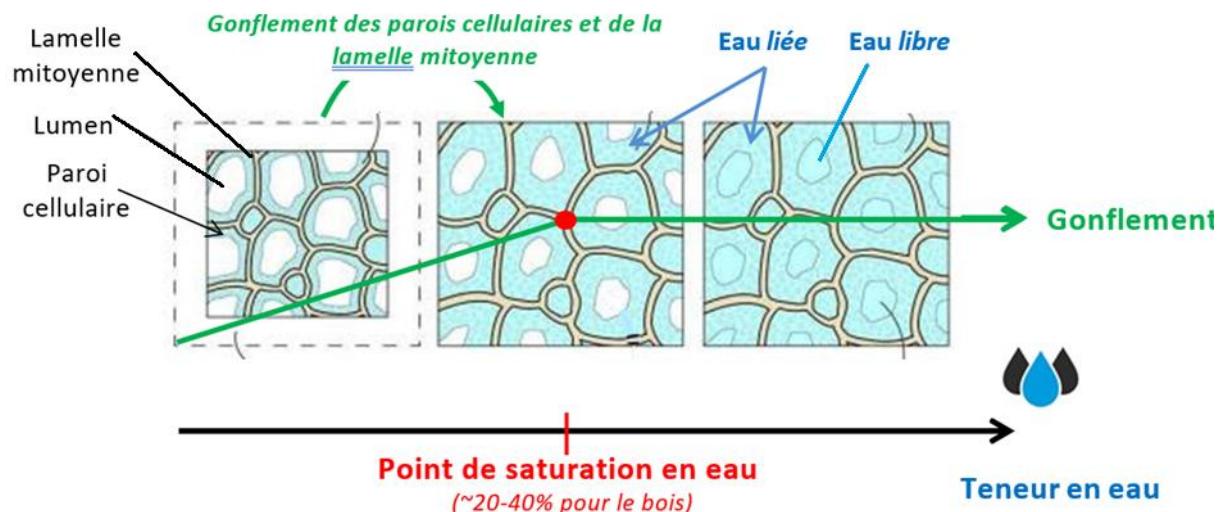
B. Comportement à l'humidité des fibres

En outre, concernant leur strict comportement à l'humidité, les capacités hygroscopiques et capillaires très diverses et variables des IBS ne permettent pas – au regard de nos lectures – de fixer ou de définir un niveau de vulnérabilité fongique *a priori*. Comme nous l'avons vu en début de ce chapitre, les propriétés hygroscopiques (sorption d'eau) sont une caractéristique propre des matériaux qui affectent leur usage mais aussi leur résistance microbiologique (Stefanowski, Curling, et Ormondroyd 2017).

Les fibres naturelles sont hygroscopiques notamment car elles peuvent contenir de l'eau sous deux formes (Garat, Pucci, et al. 2021 ; Garat, Le Moigne, et al. 2021) :

- tout d'abord, les parois et la lamelle mitoyenne de leurs cellules contiennent de nombreux sites de sorption d'eau via la formation de liaisons hydrogènes avec les groupes hydroxyles -OH des différents biopolymères des parois : dans ce cas, il s'agit de l'eau liée retenue aux parois cellulaires ;
- ensuite, la spécificité de leur structure constituée de micropores (parois cellulaires) et de vides (lumens) : dans ce cas, ce sont les forces capillaires qui retiendront l'eau libre.

Figure 40. Processus de gonflement des cellules du bois (Garat et al. 2019)



Ces caractéristiques leur permet de gonfler avec l'humidité pour s'accommoder d'une augmentation de la teneur en eau, influençant en retour la teneur en eau et les propriétés de transfert du matériau (Latif et al. 2014 ; Garat, Le Moigne, et al. 2021). Les molécules d'eau se lient aux groupements hydroxyles par des liaisons hydrogène jusqu'à ce que l'humidité atteigne le PSF (Damay 2014). Le point de saturation en eau des cellules végétales est atteint lorsque l'eau liée sature les parois cellulaires et la lamelle mitoyenne. Les cavités cellulaires (lumens et porosités) sont remplies par l'eau libre jusqu'à saturation totale (Garat, Pucci, et al. 2021 ; Xie et al. 2011).

Les parois cellulaires sont à l'origine des propriétés hygroscopiques des fibres végétales, car les polymères qui en constituent les parois possèdent une importante capacité d'absorption

de la vapeur d'eau par l'intermédiaire de leurs groupements hydroxyles, comme abordé précédemment.

Nous venons d'aborder le fait que des variations fortes existent entre les différentes variétés de fibres végétales en raison de leurs teneurs différentes en cellulose et en lignine, cette dernière étant plus résistante à la croissance fongique. Mais un autre point semble crucial pour comprendre la complexité des phénomènes impliqués et la difficulté de statuer sur ces constats sans les remettre dans la perspective d'études plus approfondies, notamment *in-situ*.

Nous venons de voir que la première explication était due à la localisation à la fois des groupes de fixation de l'eau liée (dans les parois et membranes cellulaires), et des zones de stockage de l'eau libre (dans les vides des cellules par les forces capillaire).

Au demeurant, selon l'étude (Damay 2014), les pouvoirs hygroscopiques diffèrent également selon les composés des variétés de fibres végétales :

- les hémicelluloses sont plus hygroscopiques que la cellulose, elle-même plus hygroscopique que les lignines ;
- la partie non cristalline de la cellulose (environ 40 %) et la surface des cristallites sont accessibles à l'humidité, mais pas la partie cristalline (environ 60 %).

Ceci explique pourquoi, selon leurs proportions en cellulose et en lignine des cellules, certaines matières premières végétales sont plus ou moins sensibles à l'eau et que la teneur en eau maximale permettant d'atteindre leur point de saturation en eau peut varier. La teneur en eau à laquelle ce processus survient dépend ainsi de :

- l'espèce végétale considérée,
- des transferts d'eau, lesquels dépendent directement :
 - de la température ;
 - de l'humidité relative de l'air ambiant ;
 - de la circulation de l'air.

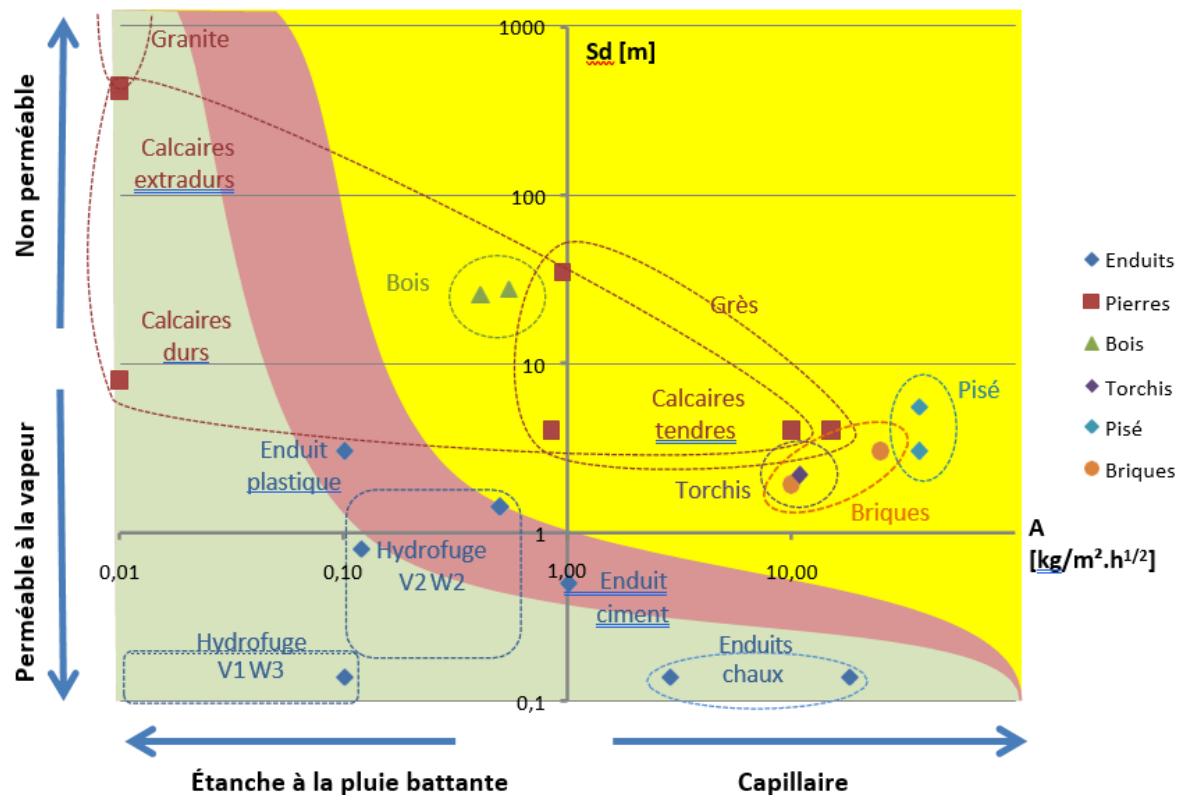
En conséquence, si comme nous l'avons vu la porosité et la rugosité favorisent le dépôt et la fixation de micro-organismes, la complexité des caractéristiques hygroscopiques des matériaux biosourcés priviliege également une capacité de tampon hygrothermique et un potentiel de séchage (redistribution hygroscopique et capillaire par exemple), lesquels pourraient constituer des facteurs de durabilité, en ce sens qu'ils peuvent moduler voire éviter les excès en humidité (cf. ci-dessus : Partie 2. 1.3B.3. Tampon hydrique).

C. Effets de la protection à l'eau de pluie

Différentes familles de matériaux potentiellement exposés à la pluie sont positionnés sur le graphique de la Figure 41. Ces matériaux sont caractérisés par leur absorption d'eau liquide (A), qui traduit également leur capillarité sur l'axe horizontal et la résistance à la migration de vapeur (Sd) d'une épaisseur classique sur l'axe vertical⁷⁰.

⁷⁰ Les épaisseurs prises en compte sont : 50 cm pour le pisé ; de 20 à 50 cm pour les pierres ; 20 cm pour les bois, torchis, briques ; 2 à 3 cm pour les enduits chaux et ciment

Figure 41. Comparaison de différents matériaux de façade sur les deux critères de l'absorption de la pluie battante A en abscisse et la résistance à la migration de vapeur Sd pour une épaisseur classique en ordonnée



(Reiser, Boissonneau, et Moteau 2018)

Ce schéma permet d'identifier :

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

Il est important de relier le croisement de ces propriétés de « capillarité » pour l'eau liquide et de « perméabilité » à la diffusion de vapeur d'eau pour appréhender le potentiel de risque fongique dans un système de paroi comprenant plusieurs couches. Le comportement de chaque couche vis-à-vis de celles adjacentes et/ou des environnements intérieur et extérieur pour les revêtements, conditionne les différents types de transfert mentionnés auparavant et la probabilité d'occurrence d'un excès d'eau pouvant éventuellement entraîner un développement fongique.

3. Comparaisons de propriétés physiques et hygrothermiques des matériaux isolants

La performance thermique des isolants est caractérisée par le coefficient de conductivité thermique (W/mK) qui traduit la capacité des matériaux à résister au passage de la chaleur. La faible conductivité thermique d'un matériau isolant est liée à sa faible densité, qui est elle-même peut être une conséquence de la dimension poreuse du matériau. Un milieu poreux est constitué d'une matrice solide et d'un espace poreux remplis par un ou plusieurs fluides, liquides ou gazeux. Il existe une grande variété de porosité au sein des IBS en raison de la variété des fibres végétales utilisées, elles-mêmes dotées de structures anatomiques très diverses, tant d'un point de vue botanique qu'en raison des transformations ou des traitements qu'elles auront subit.

Les réglementations thermiques successives visaient principalement à accroître la résistance thermique de l'enveloppe des bâtiments afin d'améliorer leur performance thermique et de réduire leur consommation. Les isolants devaient présenter une conductivité thermique basse ou une épaisseur plus élevée, ou bien les deux à la fois (Tobon Monroy 2020). Ainsi, les matériaux isolants (conventionnels ou biosourcés) sont souvent comparés entre eux uniquement en fonction de leurs performances thermiques, or, excepté pour les laines de bois dont la conductivité est proche de celles des fibres minérales ($\lambda \sim 0,036$ à $0,039$ W/mK), les matériaux biosourcés présentent souvent des valeurs de conductivité thermique légèrement supérieure aux isolants conventionnels, particulièrement celles des mousses expansées ($\lambda \sim 0,04$ W/mK) (Claude 2018). La conductivité thermique augmente aussi quand la quantité d'eau contenue dans le matériau augmente (Héberlé 2016). Mais cette caractéristique entraîne également une capacité thermique plus élevée qui peut être recherchée dans certaines configurations de parois.

A. Bases de données de matériaux de référence

Effectuant une recherche sur l'isolation par l'intérieur des murs existants en briques (Guide ISOLIN : Branders, Evrard, et De Herde 2010), la cellule de recherche Architecture et Climat de l'Université catholique de Louvain (Belgique) a réalisé un tableau recensant la plupart des propriétés⁷¹ hygrothermiques de matériaux isolants (Evrard et De Herde 2010). En 2016, le CEREMA (Héberlé 2016) a complété ce tableau et le résultats avec quelques amendements issus d'autres ouvrages (notamment : Reiser, Boissonneau, et Moteau 2018 ; Oliva et Courgey 2010) est présenté ci-dessous :

⁷¹ Les valeurs des différents paramètres hygrothermiques sont issues d'une analyse effectuée par les auteurs du guide sur les propriétés de différents produits existants, des certificats des matériaux d'isolation existants (ACERMI), de document existants 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 le rapport du CEREMA (Héberlé 2016) avec celles de la base de données des matériaux de WUFI pour des matériaux équivalents.

	Massé volumique ρ (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique λ (W.m ^{-1.K⁻¹)}	Capacité th [°] massique Cp (J·kg ^{-1.K⁻¹)}	Capacité th [°] volumique ρC_p (kJ.m ^{-3.K⁻¹)}	Diffusivité thermique D (*10-6 m ^{2.s⁻¹)}	Déphasage ϕ (h) pour 20 cm de paroi	Effusivité thermique E (J.m ^{-2.K^{-1.s^{-1/2})}}	Hygroscopicité – teneur en eau de référence w ₈₀ (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 coef. 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

Légende : Précisions et légende données par le CEREMA et reprises pour ce tableau :

- 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 aux plus petites valeurs recensées ;
- une case dont le fond est bleu correspond aux plus grandes valeurs recensées.

Dans le rapport du CEREMA, les éléments suivants sont soulignés :

- 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**).
- 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.

D'autre part, le CEREMA note que ce tableau comparatif met en évidence d'autres singularités peut-être moins attendues, notamment que :

- le mélange chaux-chanvre se distingue des autres matériaux isolants par son effusivité thermique élevée et 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.

Parmi les particularités des matériaux biosourcés, on peut retrouver que ceux-ci possèdent une perméabilité à la vapeur importante et une capillarité qui n'existe pas dans les isolants hydrophobes type polystyrène expansé, ainsi que (Claude 2018 : 33) le présentait.

Nous retrouvons l'idée qu'un matériau peut être à la fois très capillaire et hygroscopique ou peu capillaire et très hygroscopique.

Tableau 20. Données générales liées à la migration de vapeur de divers matériaux (sources diverses)

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

La sensibilité à l'humidité dépendra du type constructif et d'éléments tels que la présence d'éléments en bois (Garnier 2017). Selon Garnier, il est possible de s'interroger sur la différence entre un produit isolant « étanche » à la vapeur d'eau et un produit isolant fibreux. Ainsi, parmi les isolants thermiques du bâtiment, on peut distinguer notamment deux grandes catégories (voir ci-dessous Figure 42 et Figure 43) :

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

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

Figure 42. A gauche : isolants en plastiques alvéolaires. A droite : isolants fibreux (source : CSTB)

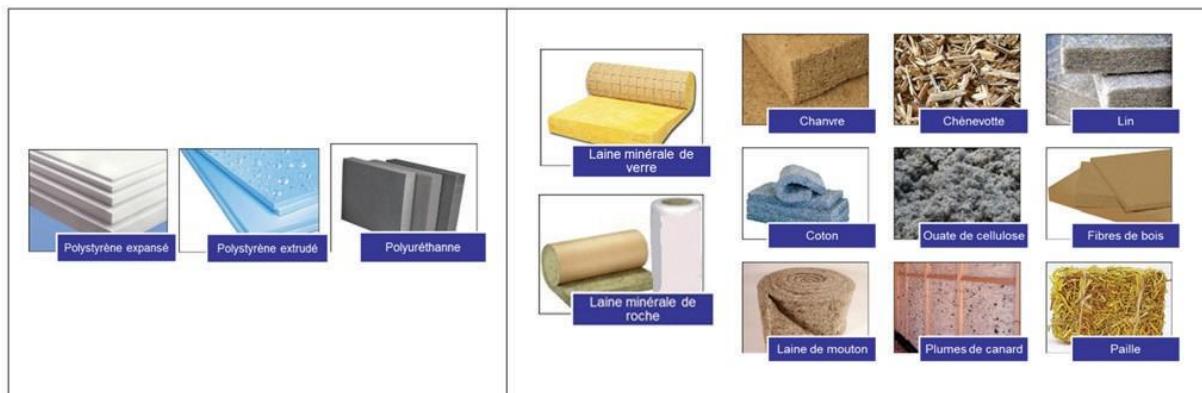
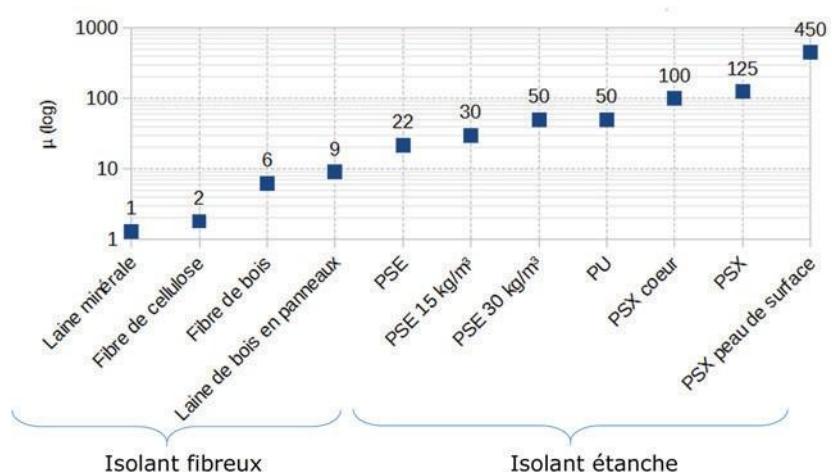


Figure 43. Comparaison des coefficients de résistance à la diffusion de vapeur (μ en échelle logarithmique)



Fraunhofer-Gesellschaft et Ecole polytechnique de l'université de Lund

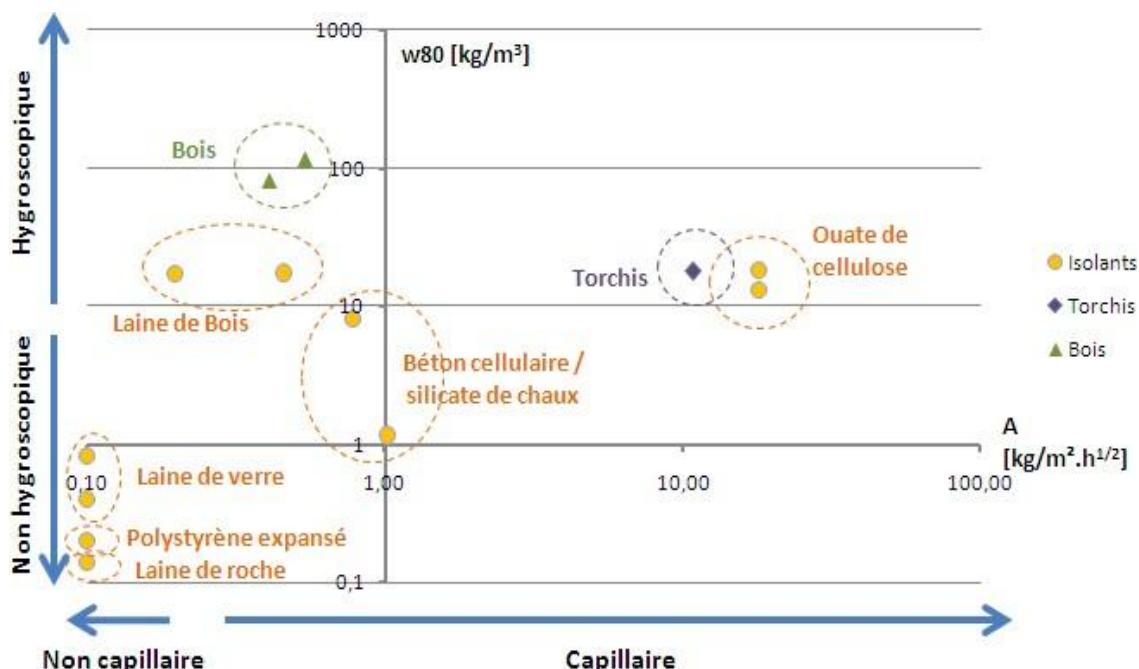
G. Garnier dans le *Guide Humibatex* (Garnier 2017) en conclut

que « la mise en œuvre entre ces deux familles est différente puisque les plaques d'isolant "étanche" se posent seules en assurant une continuité de la couche isolante, tandis que les isolants fibreux devront être associés à une membrane de la famille des pare-vapeurs qui va limiter la migration de vapeur de l'ambiance intérieure vers la paroi et qui va assurer l'étanchéité à l'air. L'utilisation de la famille des isolants étanches comporte des limites pour éviter des pathologies. L'accumulation de l'humidité dans la partie froide du mur est à proscrire. Attention ce phénomène est fréquent sur le bâti ancien. »

B. Analyse des isolants et matériaux capillaires et/ou hygroscopiques

Sur le graphique ci-dessous (Figure 44), Reiser *et al.* positionnent plusieurs isolants courants et certains matériaux particulièrement hygroscopiques. L'axe horizontal présente le facteur A, qui caractérise la capillarité du matériau, et l'axe vertical indique le w80, c'est à dire la teneur en eau du matériau exposé à une humidité relative de 80 % :

Figure 44. Positionnement d'isolants selon leur hygroscopicité et leur capillarité. A : capillarité / absorption de l'eau de pluie battante, en $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$; w80 : teneur en eau en kg/m^3 à 80 % d'HR



(Reiser, Boissonneau, et Moteau 2018)

Ils y montrent que les isolants biosourcés, mais aussi le bois et le torchis sont à la fois plus ou moins capillaires et plus ou moins hygroscopiques. Les laines minérales et le polystyrène ne sont ni capillaires ni hygroscopiques. Le béton cellulaire ou silicate de chaux est capillaire, mais selon les produits plus ou moins hygroscopique (Reiser, Boissonneau, et Moteau 2018).

Or, la sensibilité des isolants biosourcés à l'humidité est souvent mise en avant, comme une mesure de précaution. De fait, les isolants biosourcés ont la réputation d'être moins pérennes et peuvent être écartés par doute ou méconnaissance. Un système isolant peut réagir de différentes manières au transfert de vapeur d'eau (selon son niveau de résistance à sa diffusion de vapeur), ainsi qu'au transport d'eau liquide (capillarité), et être plus ou moins

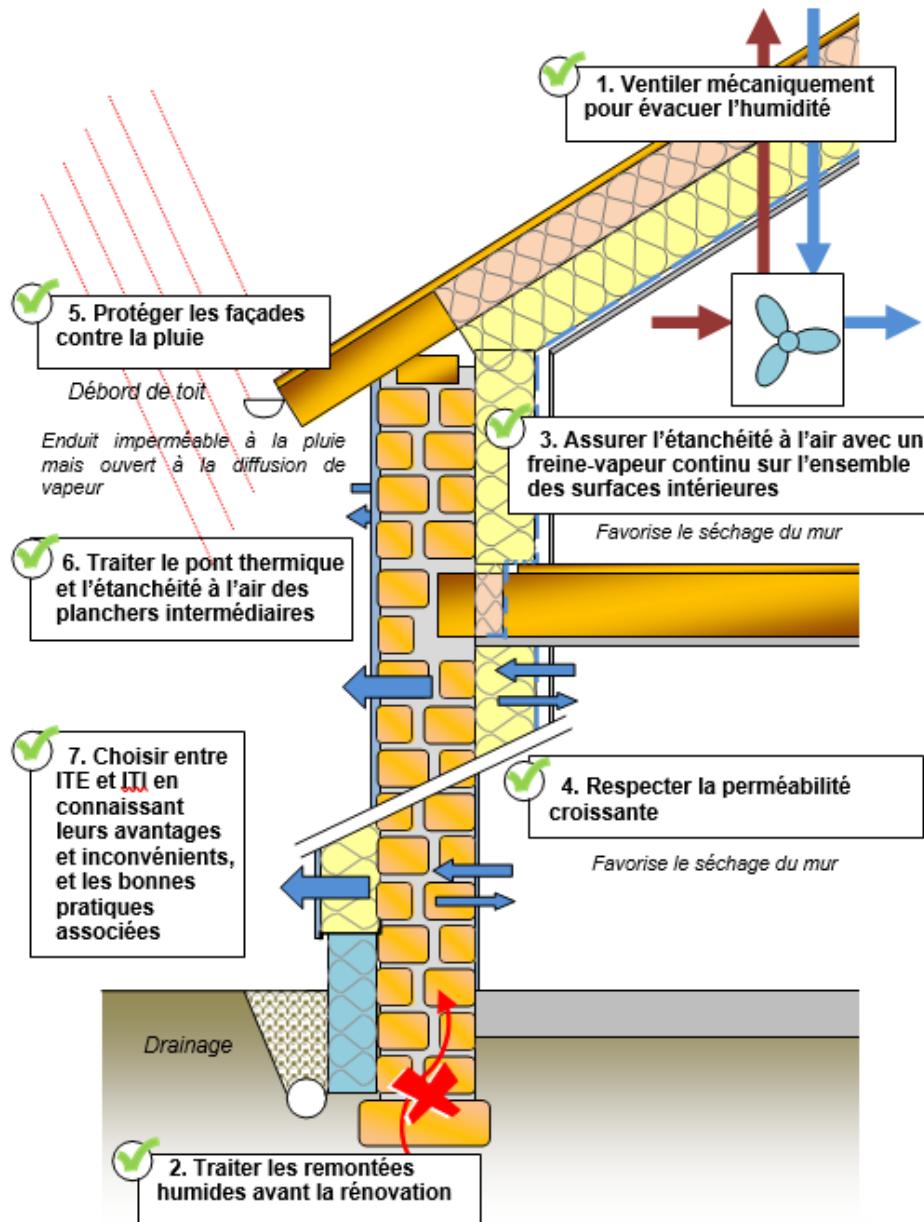
hygroscopique. Lors de l'étude à l'échelle d'une paroi, d'un bâtiment, la sensibilité des matériaux biosourcés à l'humidité implique effectivement une attention particulière concernant les risques d'un contact prolongé à de hautes humidités. En effet, des conditions défavorables entraînent des risques de condensation superficielle et interstitielle qui pourraient provoquer une dégradation microbienne progressive ainsi qu'une dégradation des propriétés mécaniques des tissus végétaux si celle-ci s'effectue dans des conditions spécifiques de températures, de Ph, de durée, etc.

Les effets relatifs aux isolants hygroscopiques végétaux sont variés. Par exemple, ils adsorbent davantage d'eau que les laines minérales pour une même HR (8 kg pour la cellulose contre 0,8 pour la laine de verre à 80 % HR (Reiser, Boissonneau, et Moteau 2018 : 58). La plupart des IBS va avoir globalement la capacité de stocker de l'eau à chaque fois que la vapeur d'eau va les traverser et ce, même à des humidités relatives inférieures à 80 % HR (50-70 %). On qualifie ce comportement de « tampon hydrique », qui ne se produit que si l'isolant est réellement hygroscopique (cf. Figure 41 et Figure 44(Reiser, Boissonneau, et Moteau 2018 p. 51 et 52)), particulièrement s'il est l'objet d'une accumulation d'humidité au sein d'une paroi à la fois plutôt fermée à la migration de vapeur d'eau (Reiser, Boissonneau, et Moteau 2018 : 58) et à faible activité capillaire (en raison par exemple d'une discontinuité de la capillarité créée par un matériau peu capillaire : film, parement, etc.).

Pour caractériser grossièrement la différence de comportement entre une fibre biosourcée hygroscopique et une laine minérale, il est possible de retenir que la première fixe en son sein, et sans risque de dégradation due à l'eau (il s'agit d'eau liée), une partie de la vapeur d'eau cherchant à traverser la paroi. De fait, dans le cas d'une ITI par exemple, cela limite la quantité de vapeur atteignant le mur, et donc les risques de condensation / humidification du mur.

La condensation capillaire, phénomène qui provoque dans les matériaux hygroscopiques le stockage d'eau avec l'augmentation de l'humidité relative constitue un second avantage en raison même de cette capacité de « tampon hydrique » et de régulation des variations d'humidité en relation avec l'environnement proche du matériau. De plus, la redistribution capillaire, qui les aide à sécher, appelle ici un deuxième avantage majeur dont dispose un grand nombre d'isolants biosourcés (Figure 45).

Figure 45. Sept règles de bonne conception relatives à l'humidité dans les bâtiments anciens



(modifié d'après ENERTECH, 2017 : 7)

Il est crucial de rester modeste et humble face à ces phénomènes, car même si elles sont en grande partie comprises, leur prédiction et leur quantification le sont beaucoup moins. À ce titre, la capacité de redistribution de l'humidité (diffusion vapeur d'eau et conduction capillaire) constitue un point récurrent de questionnement ressortant dans la littérature. Des études expérimentales récentes de cet aspect et effectuées sur des IBS sont présentées dans les paragraphes suivants.

4. Caractérisation hygrothermique d'IBS : exemples de l'enjeu de la redistribution et du séchage des phases hygroscopique et capillaire sur plusieurs études et isolants

Le comportement de sorption de différents IBS a fait l'objet de recherches récentes dans le cadre de deux vastes projets :

- le premier « *More than just insulation – added value by insulation materials made from renewable resources* » (« Davantage qu'une simple isolation – valeur ajoutée par des matériaux d'isolation fabriqués à partir de ressources renouvelables »), a été réalisé par le Centre universitaire pour les bâtiments économies en énergie de l'Université technique de Prague (voir plus bas) ;
- le deuxième projet sur le comportement de sorption des IBS a été réalisé par Lisiecka, Ewa (Fraunhofer WKI et Université des sciences de la vie de Varsovie).

Les résultats étaient disponibles à la fin de ces travaux et pouvaient être pris en compte dans l'interprétation.

En Allemagne, le Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe⁷² (FNR), l'Agence des Ressources Renouvelables est un sponsor du projet du ministère fédéral de l'Alimentation et de l'Agriculture a cofinancé un projet conséquent pour le développement des matériaux biosourcés et de leur marché.

L'Istitut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige (IHD) est un centre de recherche privé de pointe qui opère dans le monde entier au sein du secteur de l'industrie du bois et de ses dérivés dans l'innovation et les activités de R&D orientées vers l'industrie et axées sur les applications. Dans le cadre du *FNR project* « *More than just insulation – added value by insulation materials made from renewable resources* », l'IHD a réalisé une étude sur les différents protocoles d'évaluation de la résistance aux moisissures et leur pertinence. Ils ont soulevé un problème lié à ces protocoles.

A. Redistribution hygroscopique

1. Dans une paroi fermée à partir d'un élément en bois stocké dans des conditions de quasi saturation

Dans le cadre d'un projet pluriannuel ambitieux porté par le FNR, coopération avec l'Université de Prague (Tywoniak, Staněk, et Richter 2019b, 2090). L'objectif était l'étude de la redistribution de l'humidité dans un environnement fermé assemblant du bois humide et une

⁷² Le FNR (*Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.*) fonde et supervise des projets se concentrant sur des éléments de la bioéconomie. Il a contribué à la coordination et au transfert de connaissances nécessaires au sein du secteur et participe activement à divers projets transnationaux et partenariats internationaux depuis plusieurs années. FNR agit aussi en tant que conseiller auprès du gouvernement fédéral allemand, des États fédéraux, de l'industrie, des secteurs agricole et forestier - ainsi que d'autres parties. Source : <https://international.fnr.de/> (en anglais) ; <https://www.fnr.de/> (en allemand). Consulté le 16.06.2022.

isolation thermique sèche. Elle a permis d'observer le séchage de quatre assemblages côté-à-côte (Figure 46).

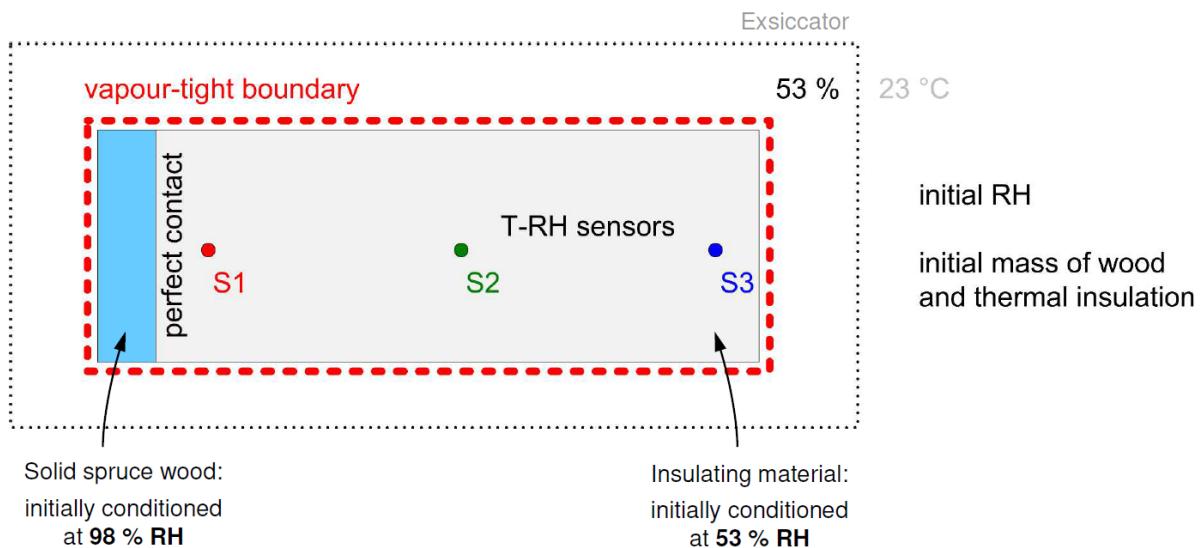
Figure 46. Dispositif d'expérimentation



Les conditions initiales sont décrites comme suit (Figure 47) :

- Planches en bois stockées à 98 % HR et 23 °C pendant 2 mois
- Isolants stockés à 53 % HR et 23 °C pendant 2 mois

Figure 47. Début de l'expérimentation



(Tywoniak, Staněk, et Richter 2019b, 2090)

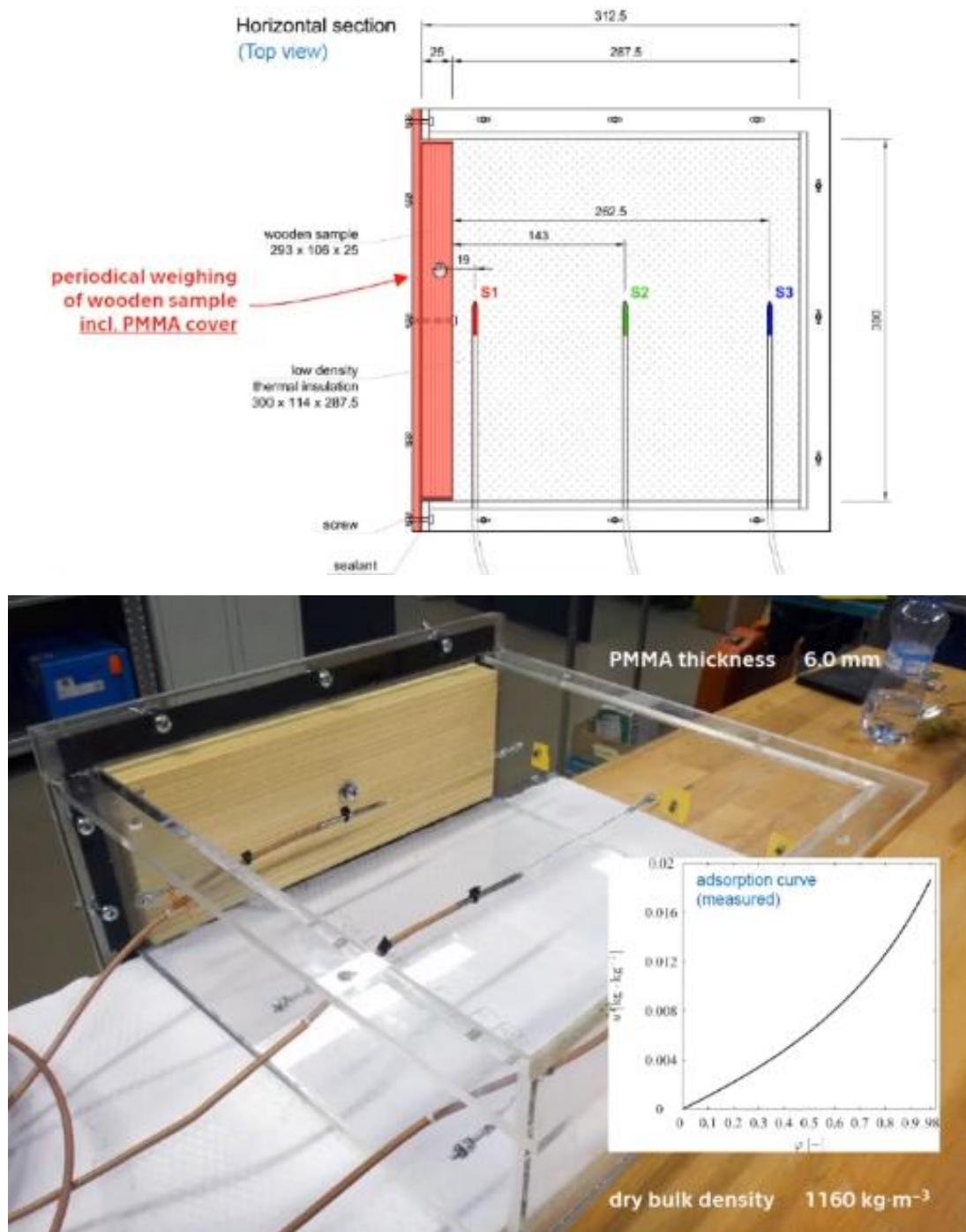
Ces planches ont ensuite été confinées avec un type d'isolant en assurant un contact « parfait » entre planches et isolant, et une étanchéité « parfaite » entre ce complexe et l'ambiance extérieure (sorte de petite chambre climatique)

Des capteurs d'humidité ont été positionnés en 3 points de l'isolant (Figure 48) :

- à proximité de la planche (S1)

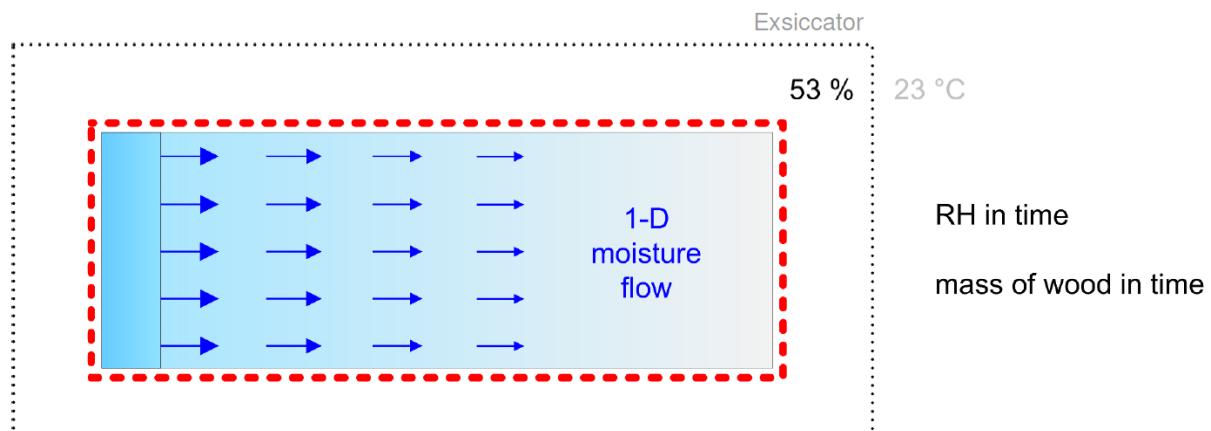
- au milieu (S2)
- à l'extrême opposé de la planche (S3).

Figure 48. Système de mesure sur 3 points



L'objectif était de simuler la réaction de l'ensemble planche/isolant à une source d'eau provenant de la planche (ex. : scénario où une fuite surviendrait sur une volige en toiture, ou bien dans une ossature ou un caisson en bois), afin de mesurer la vitesse de migration de l'humidité depuis la planche vers l'isolant en fonction du temps, et de mesurer comment cette humidité se répartie pendant cette phase de redistribution (delta de pression et quantité d'eau entre les deux matériaux) jusqu'à l'équilibre (Figure 49).

Figure 49. Phase de redistribution



(Tywoniak, Staněk, et Richter 2019b, 2090)

Figure 50. Propriété des 4 matériaux isolants, dont de la fibre de verre

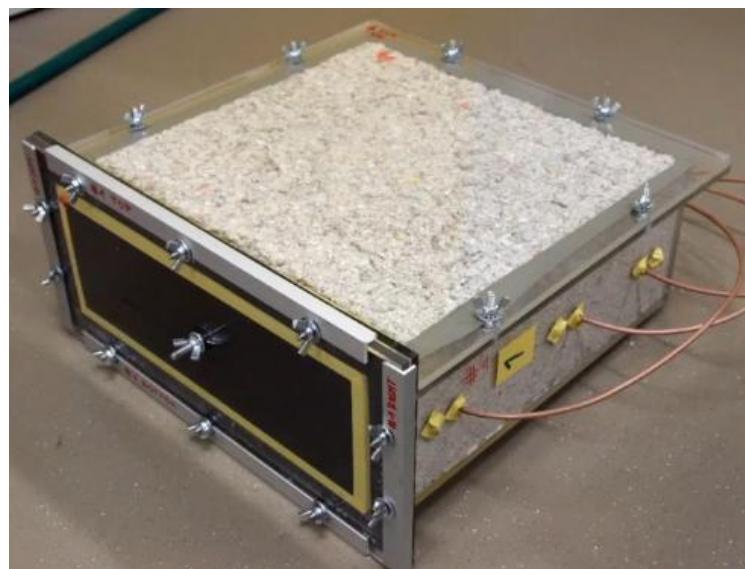
Property	Loose Cellulose	Loose Wood Fibres	Mineral Fibre Board	Wood Fibre Board
Manufacturer	Steico	Steico	Rockwool	Steico
Commercial name	STEICOfloc	STEICOzell	Rockton	STEICOflex
Nominal thickness, in mm	–	–	120	120
Bulk density, in kg·m ⁻³	open blown: 27–39 closed cavities: 40–60	open blown: 32–38 closed cavities: 35–45	49.1	50
Thermal conductivity, declared value, in W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	0.038	0.038	0.035	0.038
Specific heat capacity, in J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	2100	2100	840	2100
Water vapour diffusion resistance factor, non-dimensional	1–2	1–2	1	1/2
Fire class according to EN 13501-1	E	E	A1	E

(Tywoniak, Staněk, et Richter 2019b, 2090)

Le système permettait d'effectuer des pesées intermédiaires des planches en bois pour mesurer le transfert réel de la masse d'humidité depuis celle-ci vers l'isolant (donc la capacité de séchage de celle-ci selon les isolants en contact). Les capteurs d'humidité permettant eux d'illustrer le mouvement (donc la vitesse) de variation d'HR en leur sein.

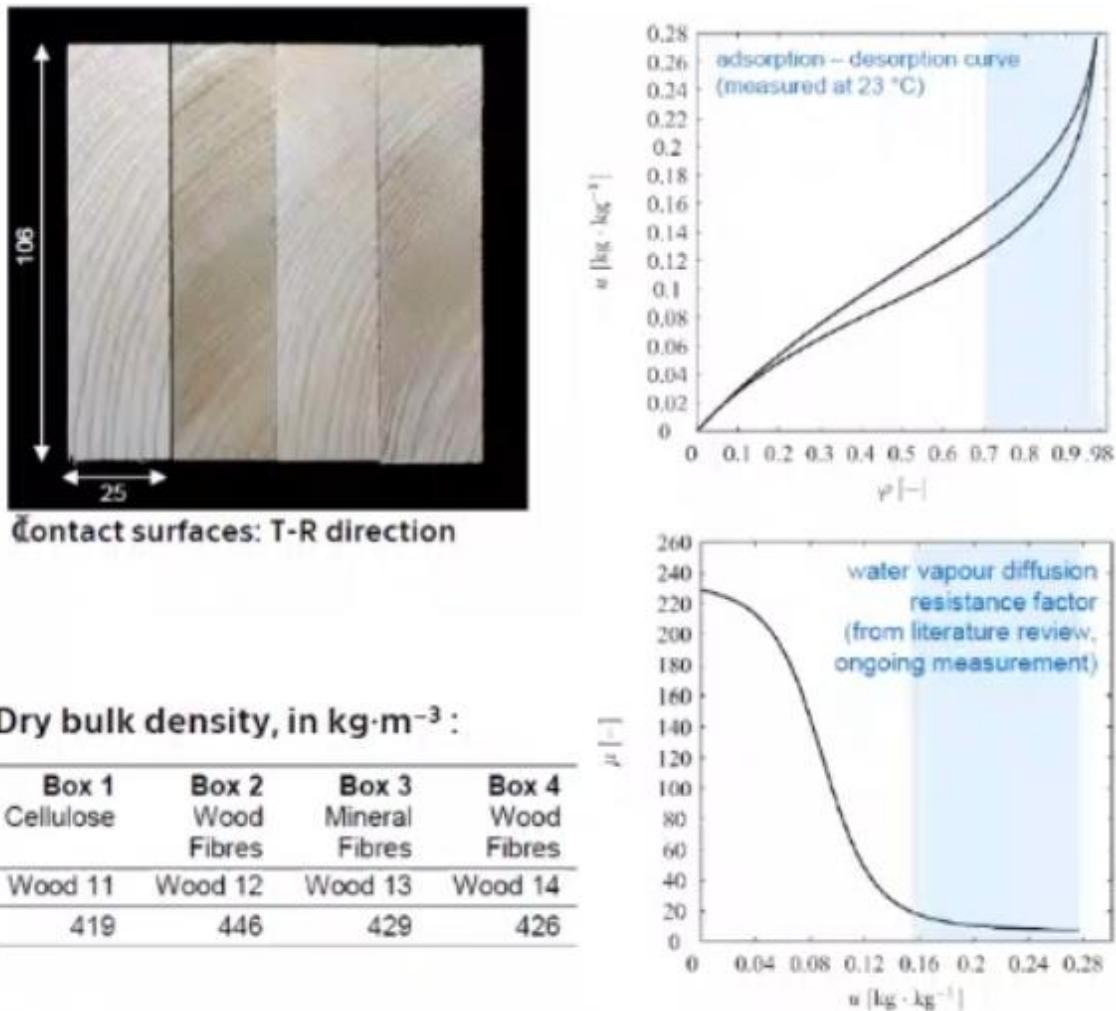
Figure 51. Aperçu du dispositif





On observe dans les résultats que la résistance à la diffusion de la vapeur du bois diminue très fortement avec l'augmentation de son taux d'humidité. (Figure 52).

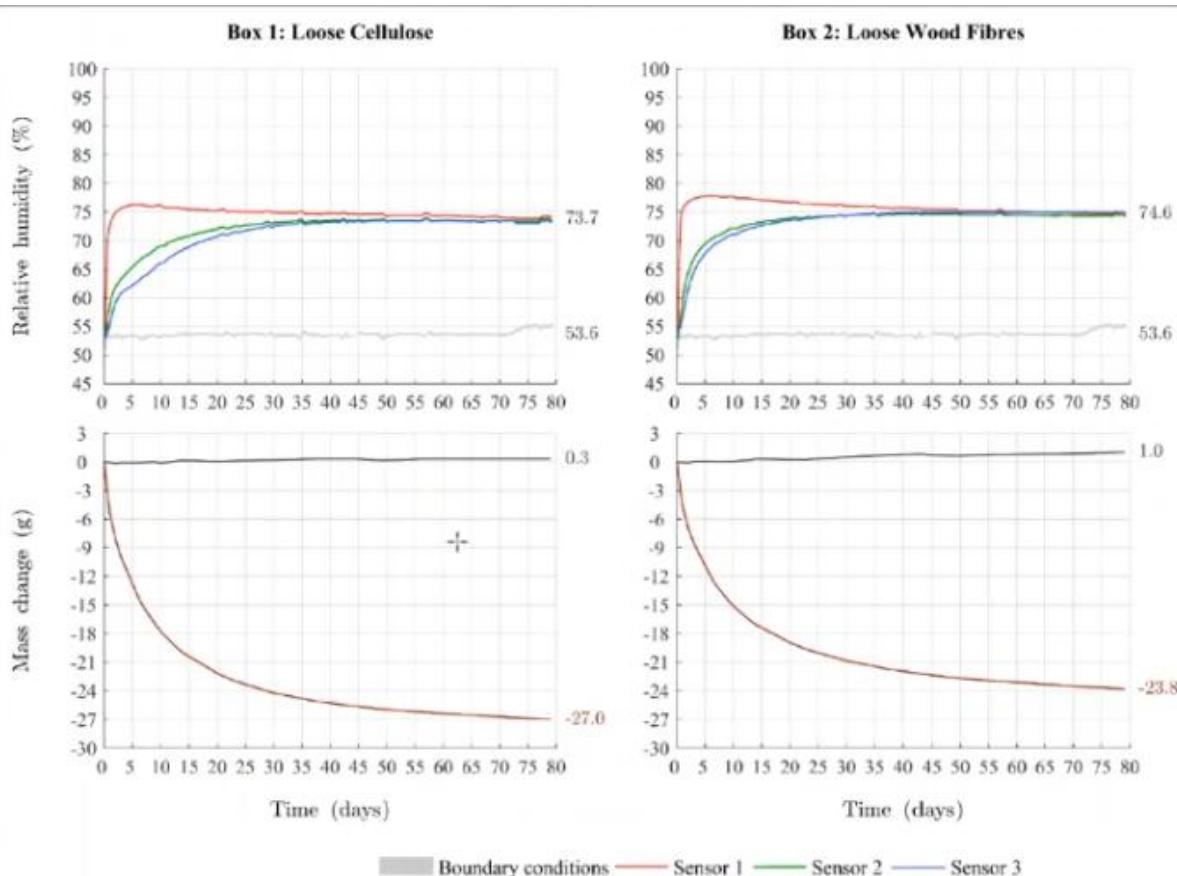
Figure 52. Aperçu synthétique des résultats : bois



CONCLUSION ET VARIATIONS SELON LES TYPES D'ISOLANTS

Les travaux ont permis de comparer l'évolution de l'HR au premier jour sur les 3 points de contrôle, puis au bout de 80 jours pour des isolants en vrac : ouate de cellulose et fibre de bois (Figure 53), et pour des isolants en panneaux : laine minérale et fibre de bois (Figure 54).

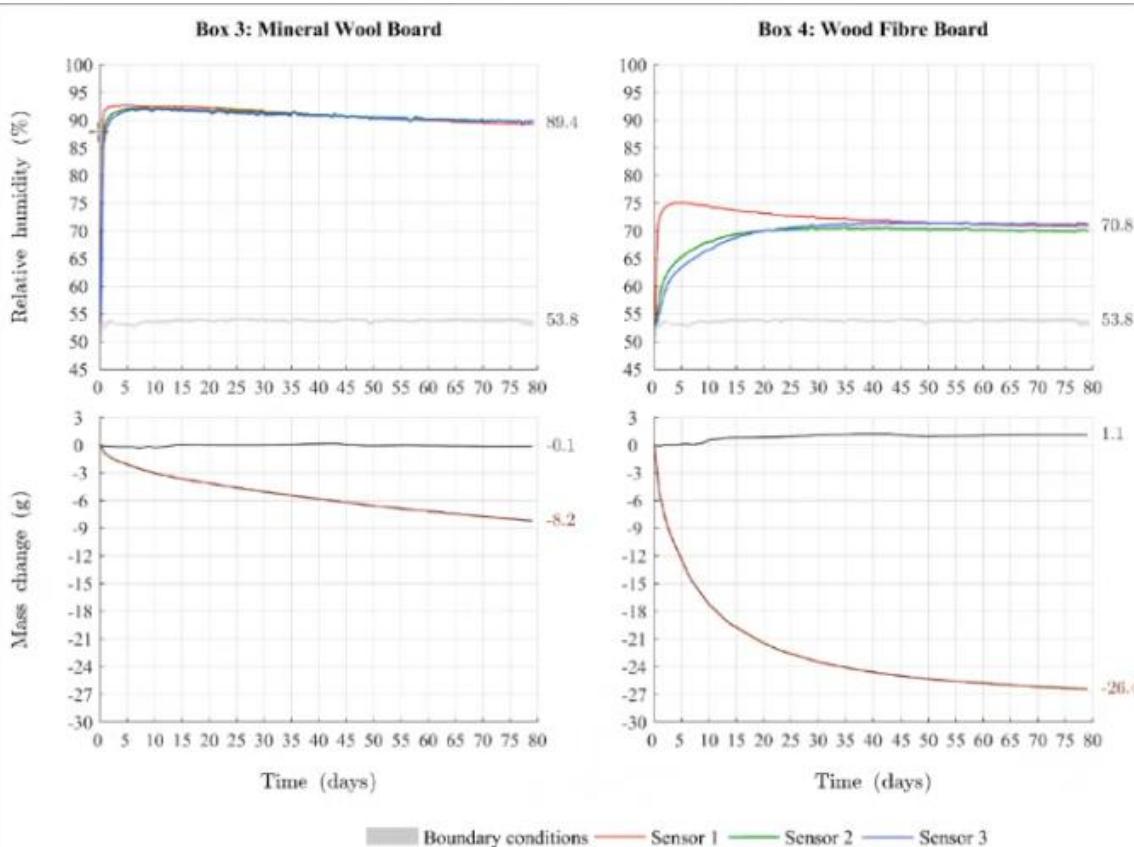
Figure 53. Relevés comparés des isolants en ouate de cellulose et fibres de bois en vrac



Dès le premier jour, l'isolant en **ouate de cellulose** passe de 53 % HR à près de 76 % HR au contact du bois (courbe rouge, capteur 1). L'HR au milieu (courbe verte, capteur 2) et à l'extrémité (courbe bleue, capteur 3) croit progressivement. Au bout de 80 jours l'HR se stabilise à 73,7 %. Le bois a perdu 27 g d'eau.

Dès le premier jour, l'isolant en **fibres de bois en vrac** passe de 53 % HR à près de 77,5 % HR au contact du bois (courbe rouge, capteur 1). L'HR au milieu (courbe verte, capteur 2) et à l'extrémité (courbe bleue, capteur 3) croit progressivement. Au bout de 80 jours l'HR se stabilise à 74,6 %. Le bois a perdu un peu moins d'eau : 23,8 g.

Figure 54. Relevés comparés des isolants en panneaux : laine minérale et fibre de bois



Dès le premier jour, l'isolant en **laine minérale** passe de 53 % HR à près de 92.5 % HR au contact du bois (courbe rouge, capteur 1). L'HR au milieu (courbe verte, capteur 2) et à l'extrémité (courbe bleue, capteur 3) atteignent tous les deux plus de 90 % HR également dès le premier jour. Les trois courbes décroissent très légèrement et de manière similaire (superposition quasi parfaite des courbes). Au bout de 80 jours l'HR se stabilise à 89.4 %. Le bois n'a perdu que 8.2 g d'eau.

Le premier jour, l'isolant **panneau en fibres de bois** passe de 53 % HR à 75 % HR au contact du bois (courbe rouge, capteur 1). L'HR au milieu (courbe verte, capteur 2) et à l'extrémité (courbe bleue, capteur 3) croît progressivement et de manière quasi similaire, les deux courbes se croisant au 25^e jour. Au bout de 80 jours l'HR se stabilise à 70,8 %. Le bois a perdu 26,4 g d'eau.

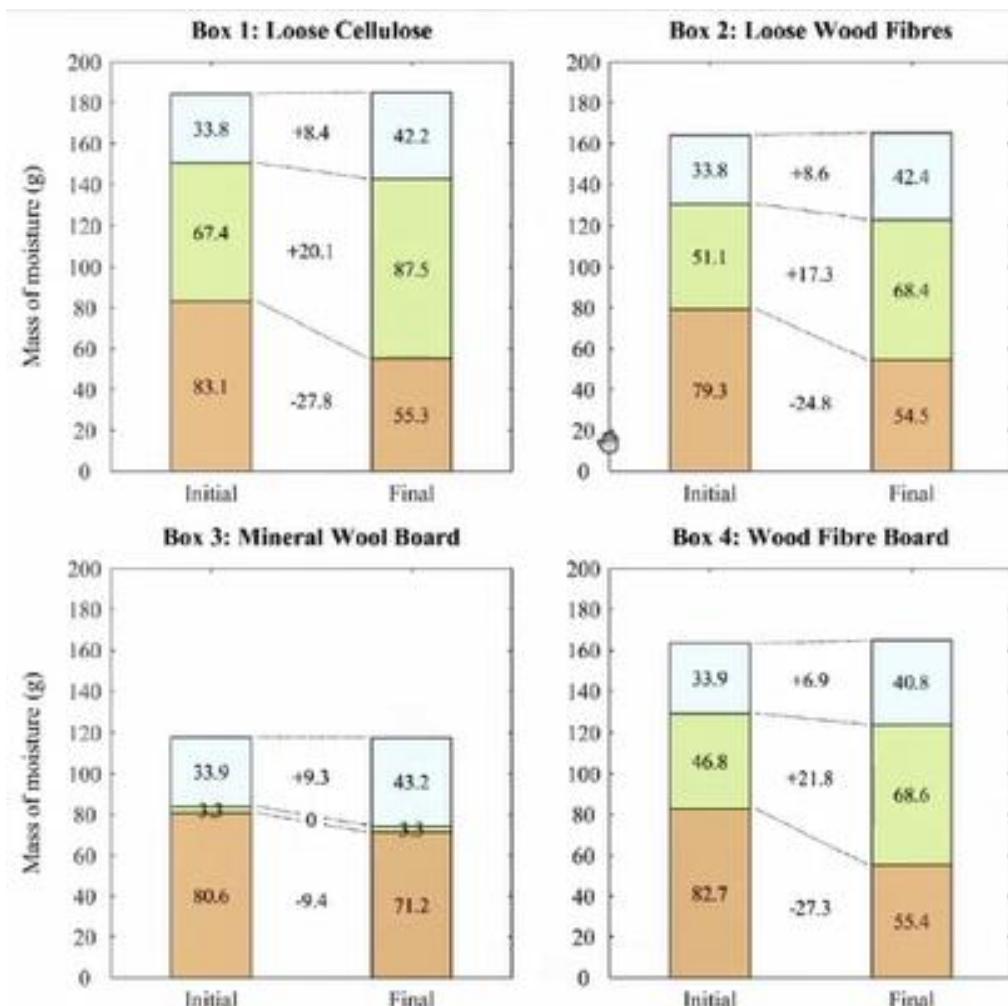
En conclusion, il est possible de constater (Figure 55) que l'humidité s'est répandue rapidement dans le système.

On n'observe aucun effet de tampon hydrique de la part de la laine minérale, cette dernière n'absorbant quasiment aucune humidité. La diminution de la quantité d'eau dans le bois varie très peu. Le taux d'humidité ne varie pas non plus de manière significative et le taux final atteint est critique. Le taux d'HR au niveau de tous les capteurs, mais surtout celui à proximité du bois, est donc à risque car il demeure supérieur à 85 % (80 % étant une limite générique donnée pour le début de croissance fongique pour les bois les plus courants).

Dans le cas d'un système constructif où un élément de structure en bois aurait subi un excès d'humidité et serait en contact avec de la laine de verre dans un environnement peu

perméable à l'air, le risque de développement fongique semble accru avec un isolant en laine minérale. Ce test est effectué dans une enveloppe étanche (donc pas de variation de masse mais uniquement un déplacement) et à température fixe (23 °C). Il est donc à considérer qu'un parement favorisant le séchage modifierait certainement très nettement ces résultats. Néanmoins, dans ce contexte très défavorable, à l'inverse, avec les isolants biosourcés, le taux d'HR à proximité du bois reste inférieur à 75 % (entre 70,8 et 74,6 % HR).

Figure 55. Bilan de l'évolution de l'humidité en masse



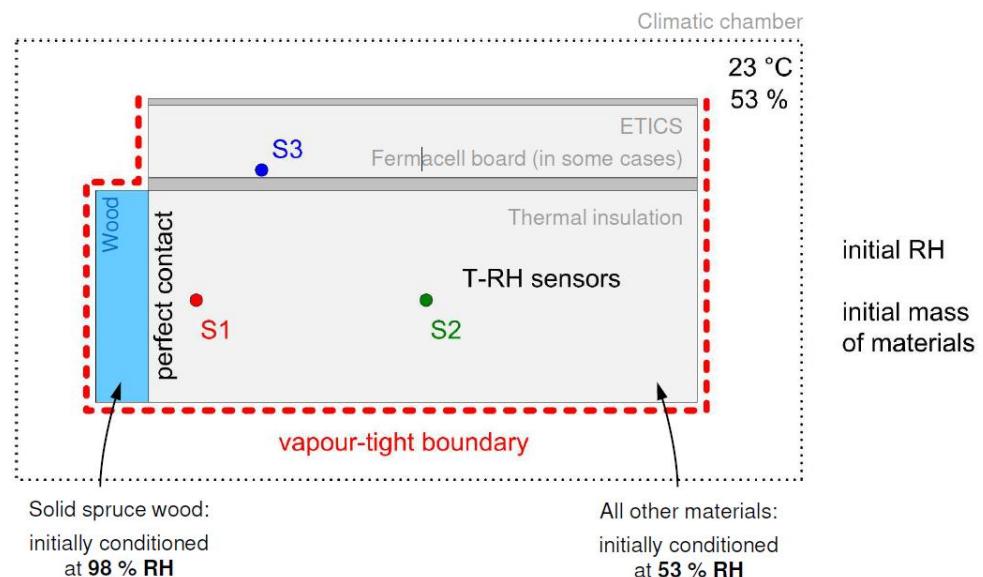
En outre, les chercheurs concluent qu'il est possible d'affirmer que les matériaux isolants à base de bois ont une capacité de stockage environ 100 fois supérieure au matériaux conventionnels basé sur des laines minérales ou des polymères. La capacité de stockage d'eau des matériaux en fibres de bois ou de cellulose est généralement inférieure à celle du bois d'épicéa massif, probablement en raison des traitements durant les phases de production, ainsi que le montre un comportement similaire observé pour le bois modifié thermiquement.

D'autre part, certains produits chimiques de conservation ajoutés pendant la production (retardateurs de flamme à base de bore) peuvent fortement augmenter la capacité de stockage de l'humidité dans une plage d'humidité relative plus élevée, mais des expérimentations plus poussées sont nécessaires pour conclure sur des effets négatifs ou positifs. Enfin, en général, en présence d'une source d'humidité limitée dans le temps, la

grande capacité de stockage de l'humidité des matériaux isolants hygroscopiques maintient l'humidité relative à l'intérieur de la structure à un faible niveau.

Pour compléter ces résultats, une **deuxième expérimentation** a été conduite mettant en œuvre un dispositif moins étanche (Figure 56), car ouvert sur un côté afin d'observer le séchage (Tywoniak, Staněk, et Richter 2019a, 2120).

Figure 56. Conditions au début de l'expérience : ouverture d'un côté et disposition différente des capteurs



Les phénomènes de transferts observés montrent que l'humidité de déplace du bois initialement plus humide vers des matériaux plus secs et dans l'air ambiant par diffusion.

Figure 57. Schéma des transferts d'humidité observés

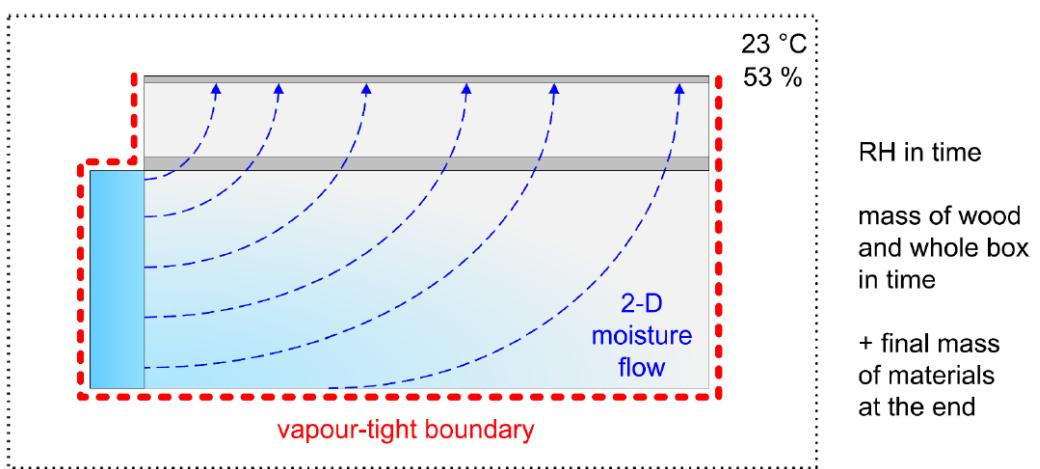


Figure 58. Synthèse des différents matériaux combinés

Material layer		Box 1	Box 2	Box 3	Box 4
ETICS	Finishing coat	Baumit NanoporTop			
	Primer	Baumit PremiumPrimer			
	Base coat	Baumit ProContact inc. glass fibre mesh			
	Thermal insulation diffusion resistance sorption properties	Mineral fibres Knauf FKD RS low low	Wood fibres STEICOpredict dry low high	Polystyrene Isover EPS 70F high low	Mineral fibres Knauf FKD RS low low
Sheeting		Fermacell	–	Fermacell	
Thermal insulation diffusion resistance sorption properties		Loose cellulose STEICOfloc low high		Mineral fibres Rockwool Rockton low low	

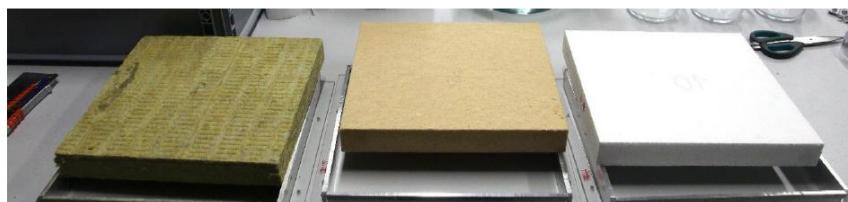
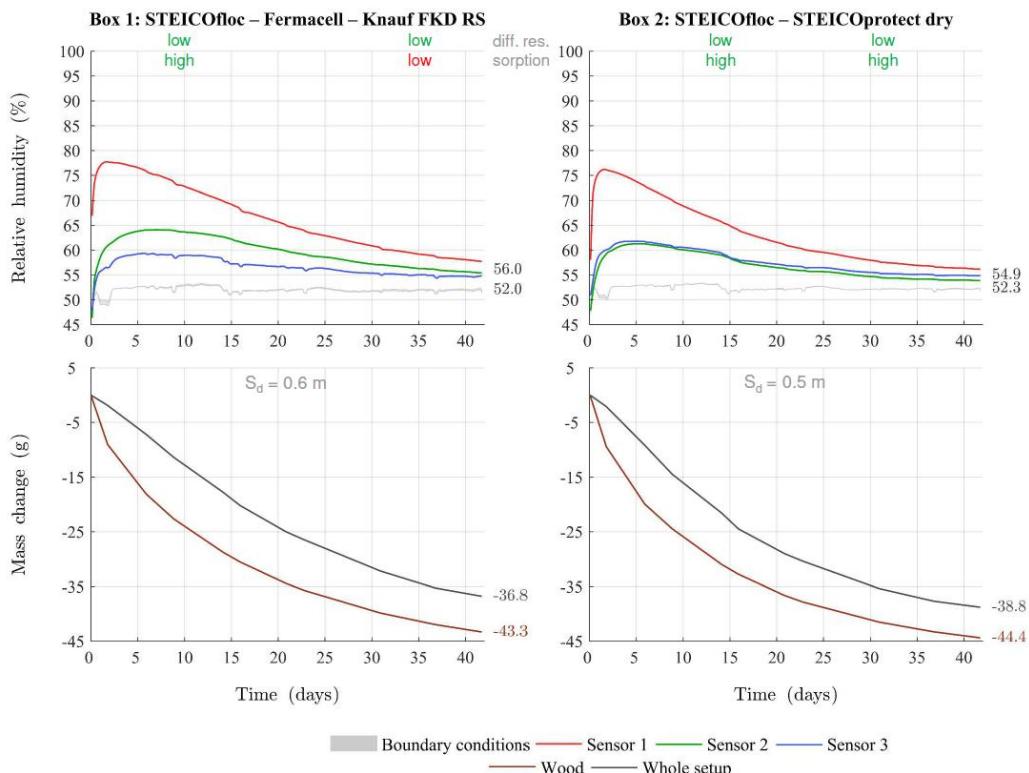


Figure 59. Observation du séchage sur 40 jours (courbes d'HR en haut et d'évolution de masse en bas)



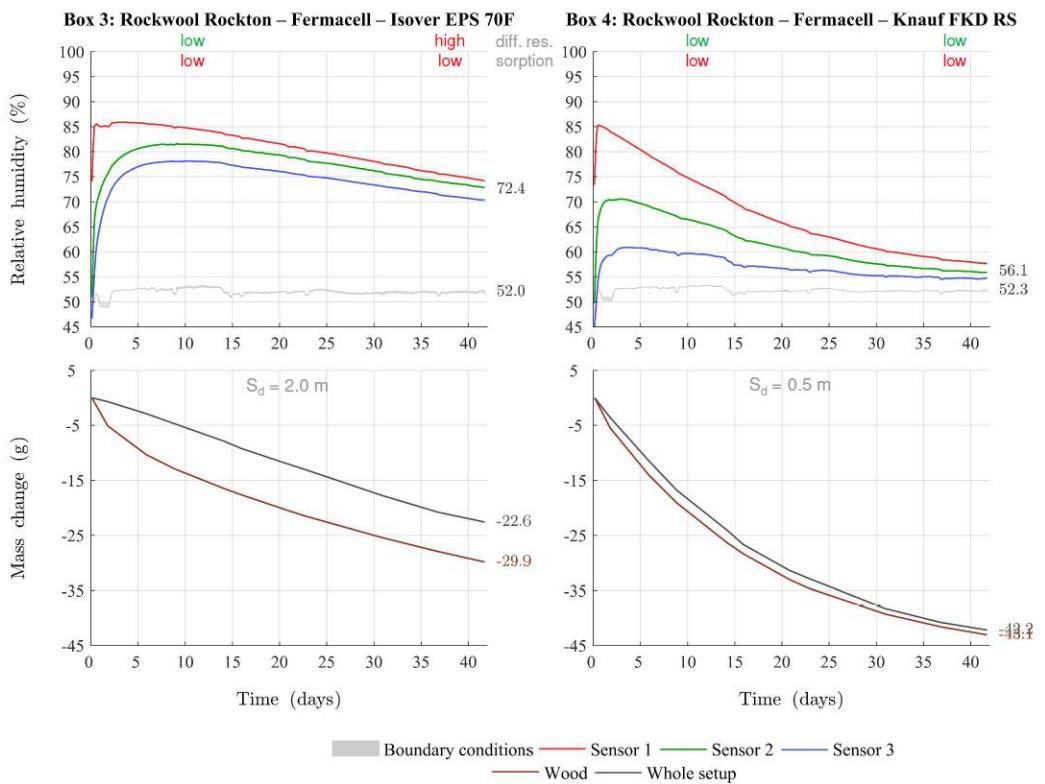
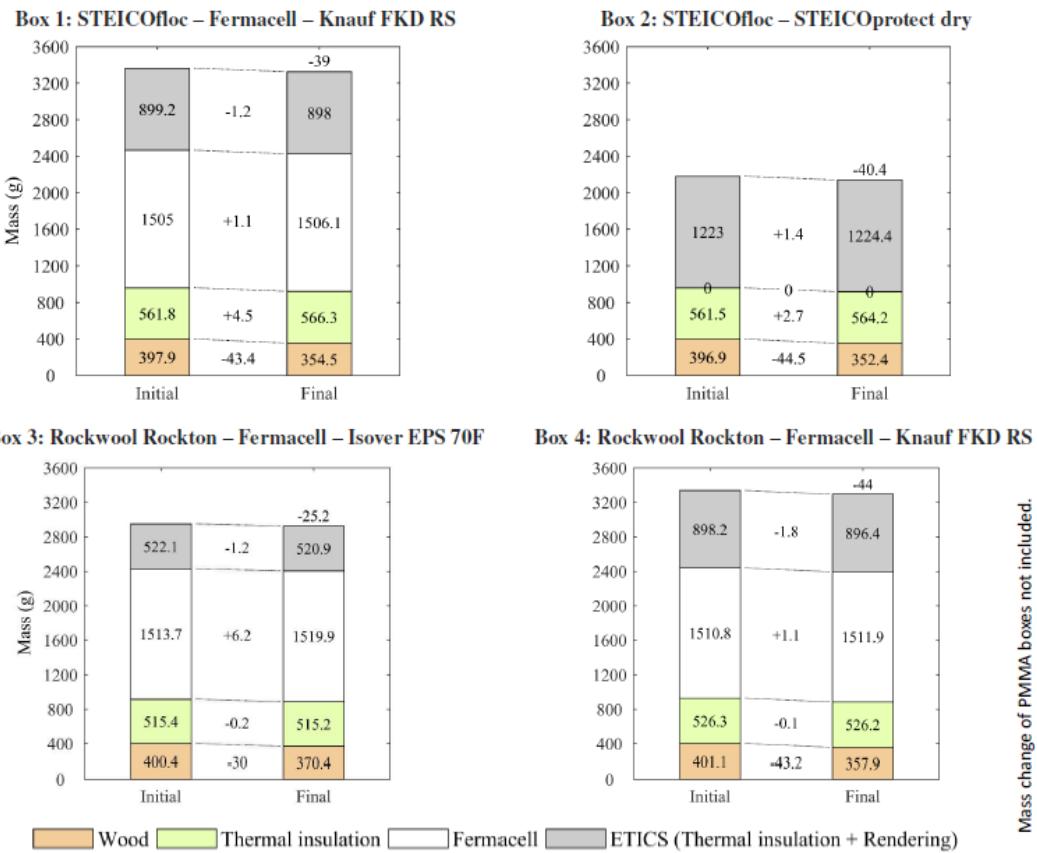


Figure 60. Bilan de l'évolution de l'humidité en système ouvert



A l'inverse de la situation précédente, lorsque le système est ouvert à la vapeur d'eau, nous réalisons que l'aspect hygroscopique est secondaire, contrairement au fait d'être ouvert ou fermé à la vapeur d'eau. Le séchage est donc le plus rapide (conditions : 30 % HR) avec les systèmes « ouate de cellulose en vrac + panneau fibres de bois » (HR=54,9 %), « ouate de cellulose en vrac + Fermacell® + panneau de fibres minérales » (56 %), et « Laine de Roche + Fermacell® + fibres minérales » (56,1 %). Et loin derrière, la solution isolée avec du polystyrène, soit un matériau fermé à la vapeur d'eau (72 %).

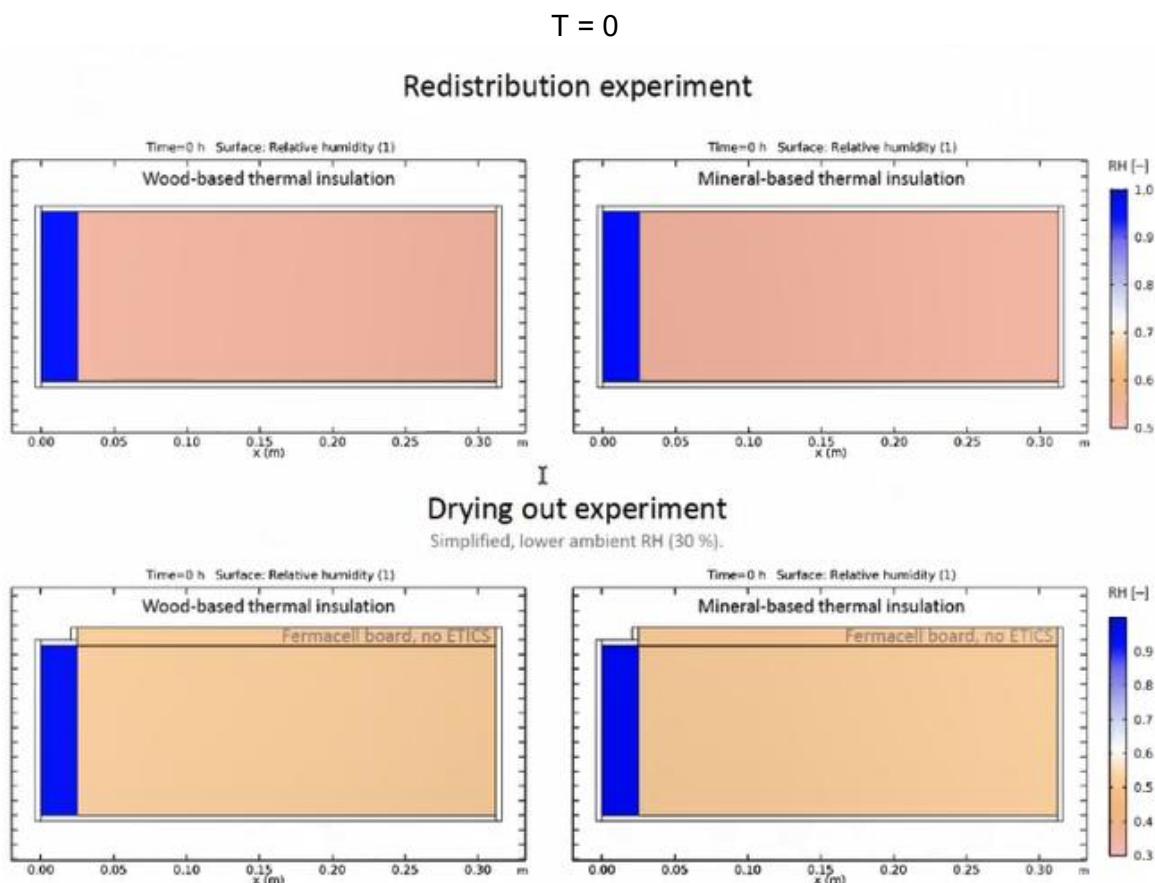
Pareillement, on réalise que le bois comme l'ensemble du système a plus séché avec les trois solutions ouvertes à la vapeur d'eau (entre -43 à -44 g pour le bois, entre -37 à -43 g pour l'ensemble), qu'avec la solution utilisant du polystyrène (-30 et -22,6 g).

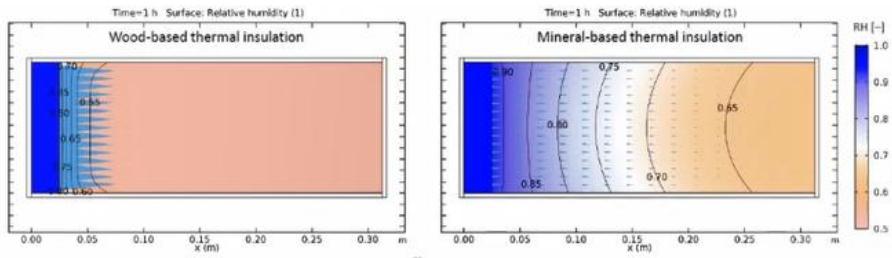
La même étude nous permet de comprendre plus précisément encore, pour des systèmes ouverts ou fermés comme précédemment approchés, l'incidence des comportements hygroscopique et capillaire en comparant 4 complexes, de gauche à droite et haut en bas :

- système fermé, isolation en fibres de bois ;
- système fermé, isolation en laine minérale ;
- système ouvert (Fermacell® sur une face), isolation en fibres de bois ;
- système ouvert (Fermacell® sur une face), isolation en fibres de bois.

L'expérimentation permet de visualiser finement la redistribution d'humidité, par transfert d'eau et/ou de vapeur (Figure 61). Les résultats nous montrent des comportements assez différents entre fibres de bois et laine minérale, et confirme l'inadaptation des laines minérales pour le système fermé.

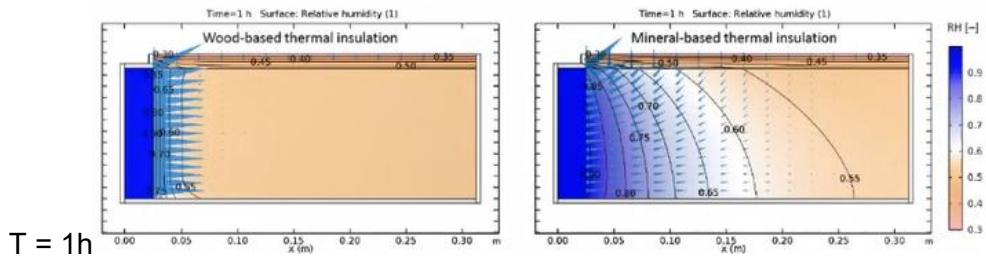
Figure 61. Séquençage temporel de la redistribution capillaire et du séchage comparé entre isolant végétal et minéral





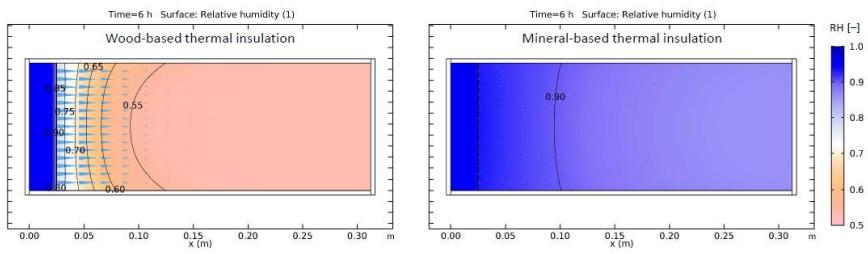
Drying out experiment

Simplified, lower ambient RH (30 %).



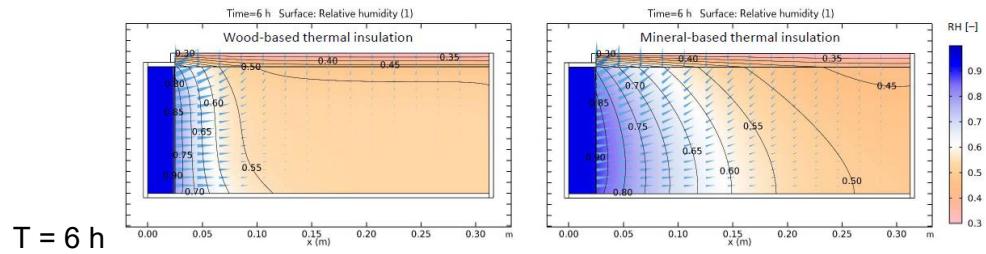
T = 1 h

Redistribution experiment

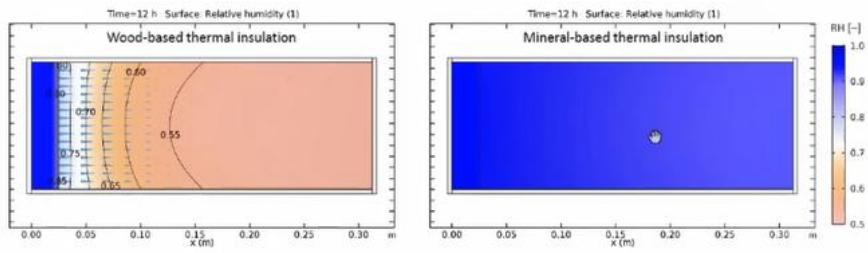


Drying out experiment

Simplified, lower ambient RH (30 %).

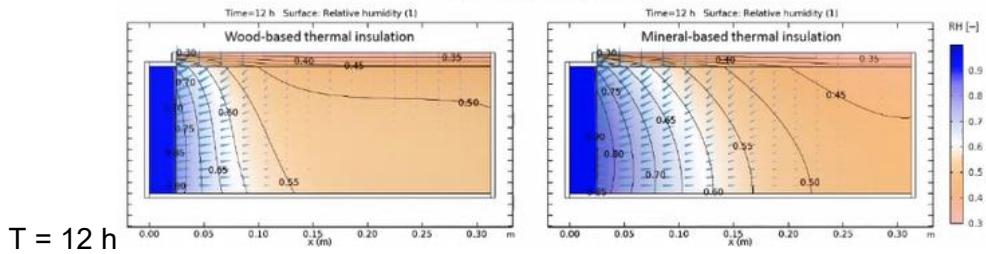


T = 6 h

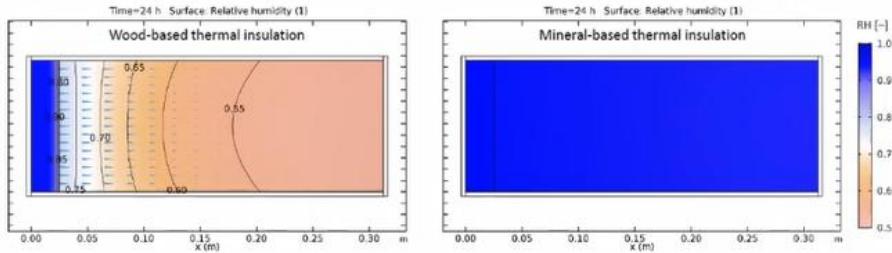


Drying out experiment

Simplified, lower ambient RH (30 %).

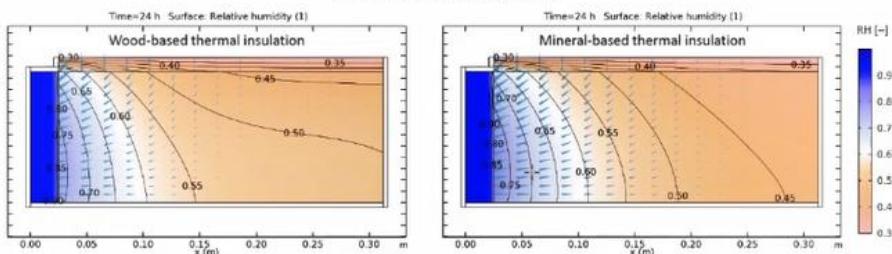


T = 12 h

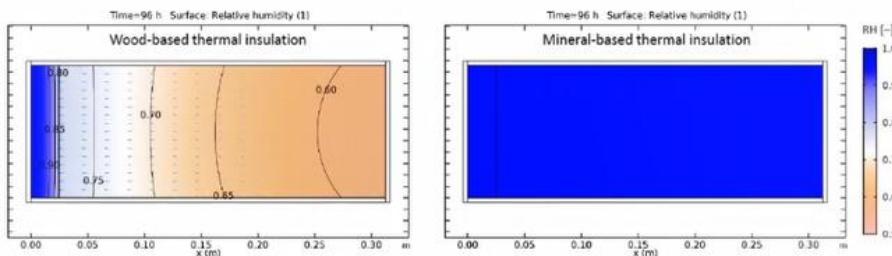


Drying out experiment

Simplified, lower ambient RH (30 %).

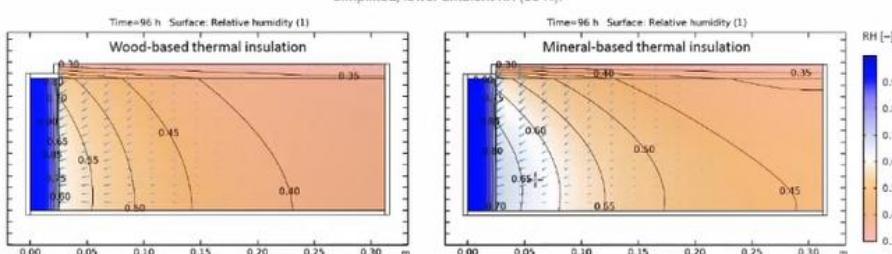


T = 24 h

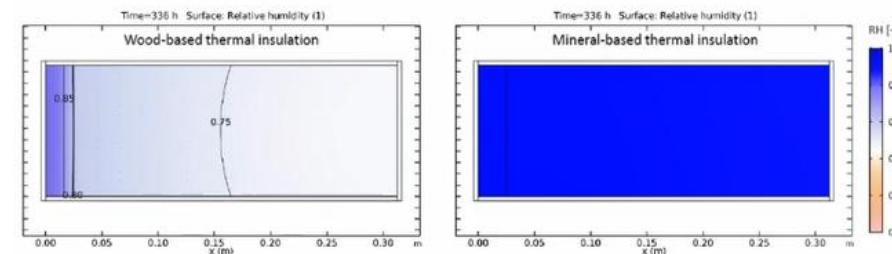


Drying out experiment

Simplified, lower ambient RH (30 %).

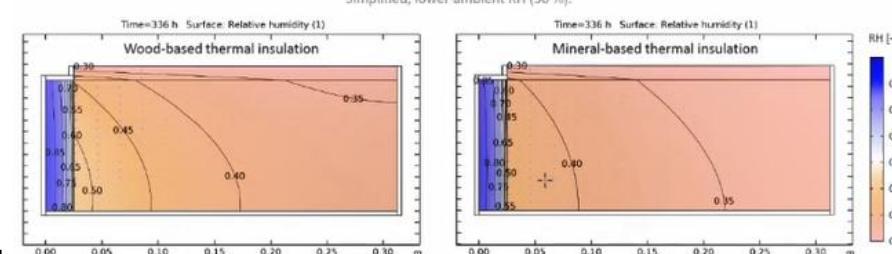


T = 96 h



Drying out experiment

Simplified, lower ambient RH (30 %).

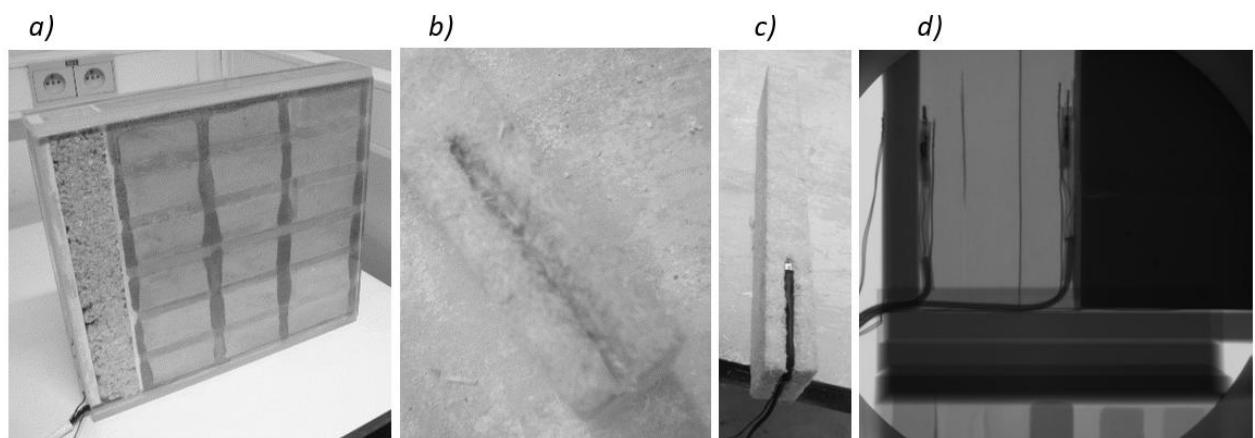


T = 336 h

2. Dans un ensemble de murs d'essai avec différents isolants disposés en ITI

Dans leur article (Evy Vereecken et Roels 2014) comparent les performances hygrométriques de différents systèmes d'ITI exposés à des conditions hivernales. Pour ce faire, de petits murs de test sont placés dans une enceinte climatique (boîte chaude – boîte froide). Environ toutes les trois semaines, les murs sont sortis de l'enceinte pour étudier la distribution de l'humidité qui opère à l'intérieur de ceux-ci grâce à la tomographie aux rayons X. Les murs ont été également pesés pour suivre l'augmentation totale de l'humidité. La composition des différentes parois d'essai est résumée dans le Tableau 21. Pour obtenir un bon contact entre le mur de maçonnerie et l'isolation (lorsqu'il s'agit d'un matériau capillaire actif), un enduit assurant une couche de redistribution a été utilisé (le cas du mur G est une exception qui rend possible d'analyser l'effet du mortier seul). Le mur d'essai L est construit avec une isolation extérieure afin de comparer la résistance à la vapeur de la maçonnerie seule (obtenue avec l'essai de la coupelle pour la brique et le mortier séparément).

Figure 62. a) L'une des parois d'essai, b, c, d) les capteurs RH et T sont intégrés dans le matériau



(Evy Vereecken et Roels 2014)

Tableau 21. Vue d'ensemble des différentes compositions de parois d'essai. L'épaisseur de l'isolant était de 5 cm, sauf pour verre cellulaire et la fibre de bois (Pavadentro®) (6 cm)

A	EXTÉ Mur de maçonnerie	Mortier de colle		Plaque de plâtre (1,25 cm)	INTÉ		
B		Laine minérale					
C		Laine minérale					
D		Mortier de colle	Le XPS				
E		Mortier de colle	Foamglas ®				

F	(+/- 29 cm)	Mortier de colle	Multipor®			
G		Multipor®				
H		Mortier de colle	Silicate de calcium			
I		Mortier de colle	Pavadentro® (EP 1 900 884 A1)			
J		Mortier de colle	Cellulose			
K		Mortier de colle	Cellulose	Freine-vapeur		
L	Plexiglas	Silicate de calcium		Laine minérale	Mur de maçonnerie	

(Evy Vereecken et Roels 2014)

Les différentes parois d'essai ont été placées dans une enceinte avec des solutions salines saturées pour contrôler l'humidité relative.

- L'humidité relative
 - boîte chaude : +/- 85 %
 - boîte froide : +/- 45 %.
- Température :
 - boîte froide : +/- 2 °C ;
 - boîte chaude : 35 °C.

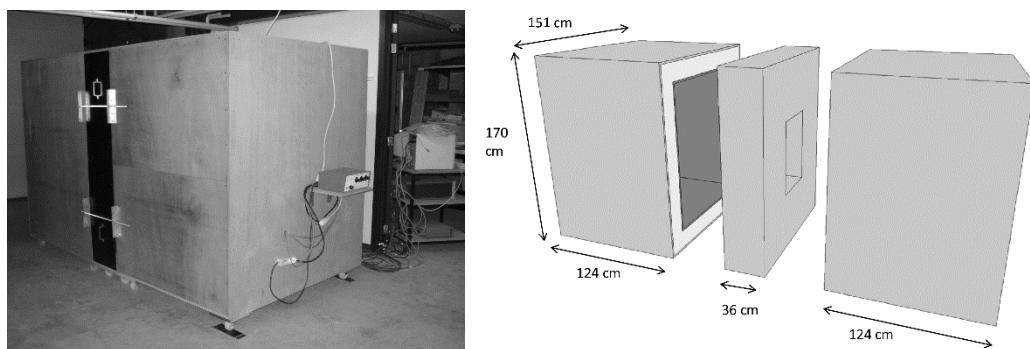
Ces conditions ne constituent pas des conditions aux limites réalistes, mais ont été choisies pour obtenir en peu de temps une augmentation significative de la teneur en humidité pour utiliser la méthode de projection de rayons X.

Entre la boîte chaude et la boîte froide a été fixée une pièce intermédiaire de raccordement (Figure 63), dans laquelle les parois d'essai ont été positionnées :

- avec la plaque de plâtre orientée vers la boîte chaude
- et la paroi en brique côté boîte froide.

Afin d'obtenir un transport de chaleur simplifié en 1D et d'éviter des incohérences de mesures, un isolant PSX a été placée entre chacun des différents murs d'essai. Les fuites d'air, et par conséquent les fuites de chaleur et de vapeur, ont été minimisées en utilisant un ruban adhésif sur tous les bords entre les murs d'essai, les panneaux d'isolation PSX et la pièce de connexion centrale.

Figure 63. Vue réelle et vue schématique de la boîte chaude - boîte froide (Evy Vereecken et Roels 2014)



La distribution de la teneur en humidité dans un échantillon a pu être déterminée en fonction de la projection de rayons X d'un échantillon de référence (sec) comparée à celle de l'échantillon examiné (humide).

Répartition de l'humidité

La figure ci-dessous (Figure 64) montre les profils de teneur en humidité, obtenus à l'aide de la méthode de projection de rayons X, pour les parois A, B, F, H, I et J.

De gauche à droite, on observe des panneaux de gypse, de l'isolation (sauf dans le cas A) et une partie du mur de maçonnerie.

Dans le cas des murs A, F, H, I et J, un mortier a été utilisé pour coller le matériau isolant ou le panneau de gypse au mur de maçonnerie. La teneur en humidité de ce mortier a fortement augmenté. Le joint de mortier horizontal dans la partie du mur de maçonnerie montre une humidité plus élevée que celle trouvée dans les briques.

La figure 65a montre une augmentation importante de l'humidité dans la plaque de plâtre de la paroi non isolée, en raison d'une température plus basse. (Condensation par saturation de vapeur d'eau dès le parement intérieur).

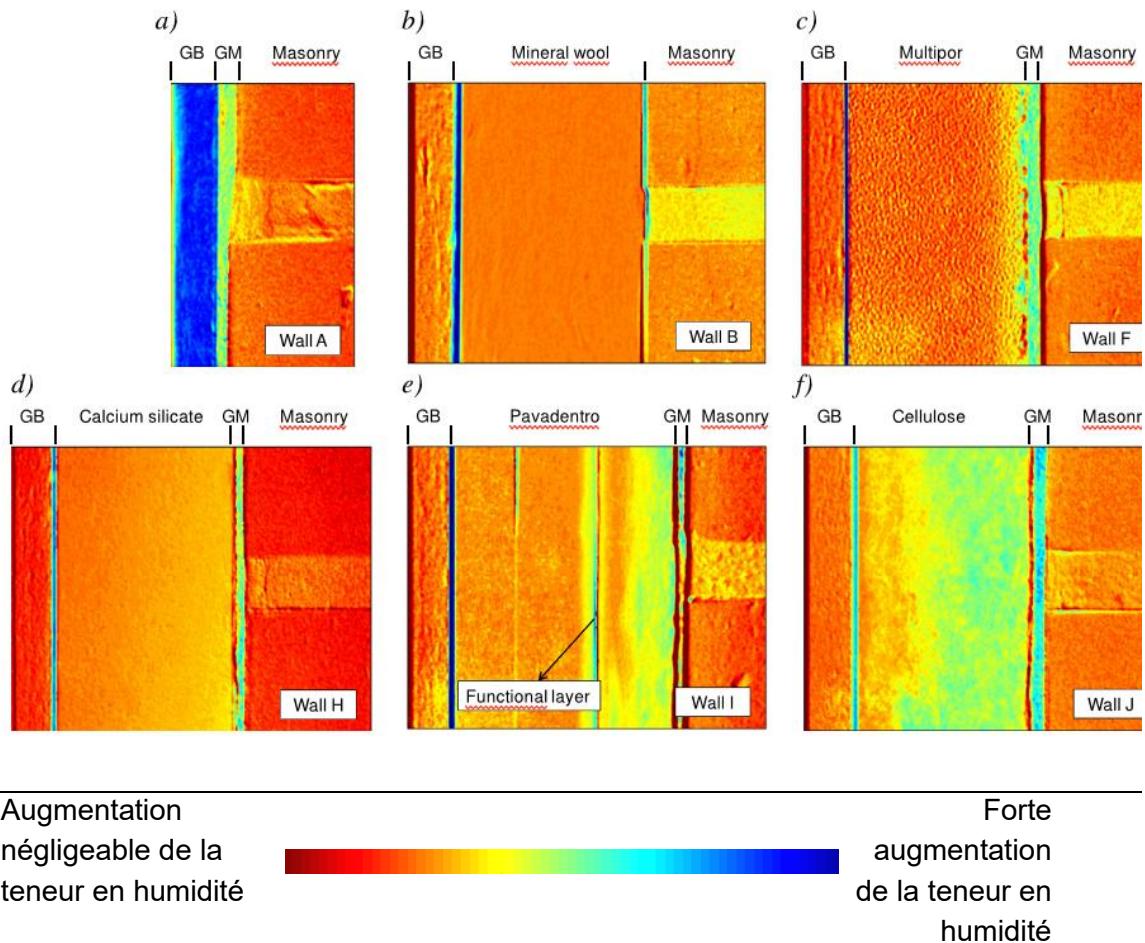
Dans le cas du mur avec de la laine minérale (b), la teneur en humidité de la laine minérale reste négligeable et aucun profil de teneur en humidité n'est trouvé.

Dans l'isolant Multipor (c), une légère augmentation de la teneur en humidité à proximité du mortier est observée (en partie due à la présence de certains pores Multipor® remplis de mortier ?). Une augmentation plus nette du niveau d'humidité se trouve dans le silicate de calcium (d), Pavadentro® (fibre de bois) (e) et la cellulose (f). Le Pavadentro® existe à partir de trois couches de panneaux de fibres de bois de 2 cm. Les deux couches de fibres de bois vers l'intérieur sont collées l'une à l'autre et séparées de la troisième par un pare-vapeur, appelé couche fonctionnelle. La teneur en humidité de la couche fonctionnelle a été augmentée et l'humidité est partiellement redistribuée vers le côté de la pièce. Le panneau de fibres de bois à droite de la couche fonctionnelle montre des profils de teneur en humidité sur le côté de la colle de mortier.

Dans le cas des quatre systèmes capillaires et actifs (c, d, e, f), l'humidité à l'interface entre la brique et l'isolation est absorbée par le mortier de colle.

Ces résultats indiquent également une possible redistribution vers le mur de maçonnerie.

Figure 64. Radiographies de la teneur en humidité dans les assemblages muraux (voir Tableau 21 pour les différentes compositions de parois d'essai) après six semaines dans la boîte chaude – boîte froide



Augmentation
négligeable de la
teneur en humidité

Forte
augmentation
de la teneur en
humidité

Légende : Panneau de gypse (GB) – Isolation – Mortier colle (GM) - Mur de maçonnerie

(d'après (Evy Vereecken et Roels 2014)

Evy Vereecken émet les remarques suivantes :

- Une correspondance correcte des propriétés du matériau (en particulier la perméabilité à l'eau liquide) du mortier et de l'isolation sera d'une importance cruciale pour obtenir un système d'isolation sécurisé ;
- Dans certains cas, aux interfaces (par exemple entre l'isolation et les panneaux de plâtre), une ligne inattendue indiquant une augmentation ou une diminution apparente de la teneur en humidité peut être trouvée. Cela peut être dû à un petit déplacement de l'image humide par rapport à l'image sèche causée par une expansion des matériaux au cours de l'expérience.

Augmentation de masse

L'augmentation de l'humidité mesurée par la pesée dans l'ensemble du mur est représentée dans la Figure 65a ci-dessous. De manière très visible, les différents systèmes se subdivisent.

L'augmentation de poids la plus élevée s'observe pour les murs :

- sans isolation (X) ;
- avec la laine minérale ouverte à la vapeur d'eau et non capillaire (■).

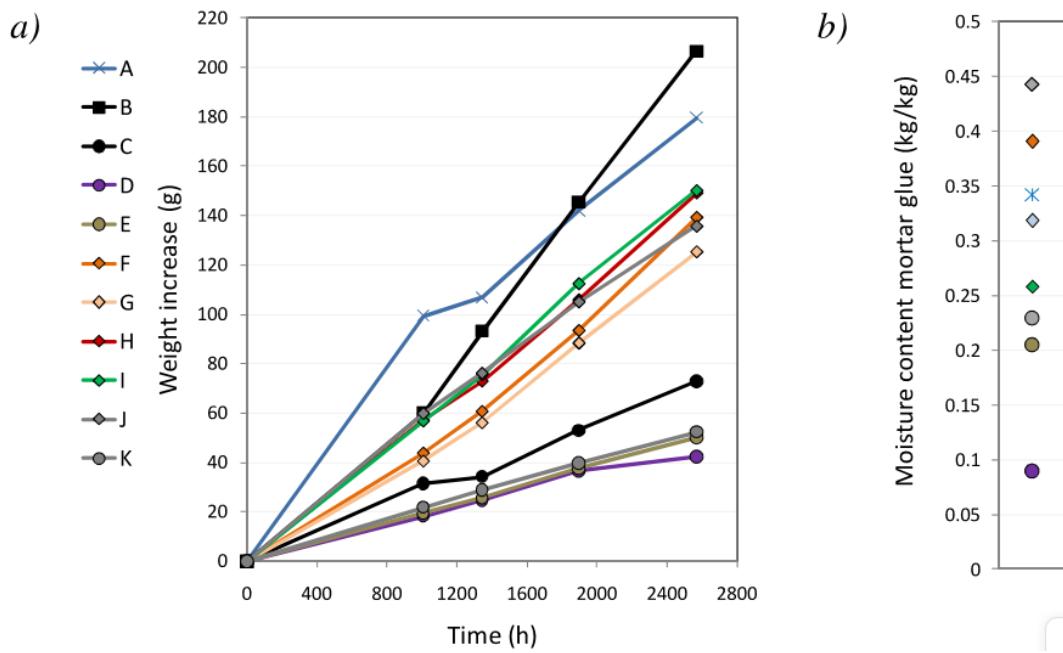
Une augmentation plus faible de l'humidité peut être trouvée dans les cas des systèmes avec des isolants à capillarité active (capillaires) (◊). Mais cette augmentation est supérieure à l'augmentation de l'humidité observée pour les systèmes plus fermés à la vapeur (O) (XPS, Foamglas (verre expansé), systèmes avec un freine-vapeur « intelligent »), qui démontrent globalement une plus faible augmentation de leur masse en eau.

Au début de l'expérience, les effets de tampon hygrique des différents matériaux peuvent jouer un rôle majeur sur les résultats.

À la fin de la mesure, les différentes couches de matériaux ont été pesées séparément. La teneur en humidité des différentes couches de mortier à la fin de la mesure est indiquée à la Figure 65 b.

Teneur en humidité du mortier de colle est plus élevée dans les cas des murs avec un système d'isolation capillaire que dans le cas des systèmes fermés à la vapeur.

Figure 65. a) Augmentation du poids total des différentes parois, b) teneur en humidité du mortier de colle à l'expérience (voir Tableau 21 pour les différentes compositions de parois d'essai)



(Evy Vereecken et Roels 2014)

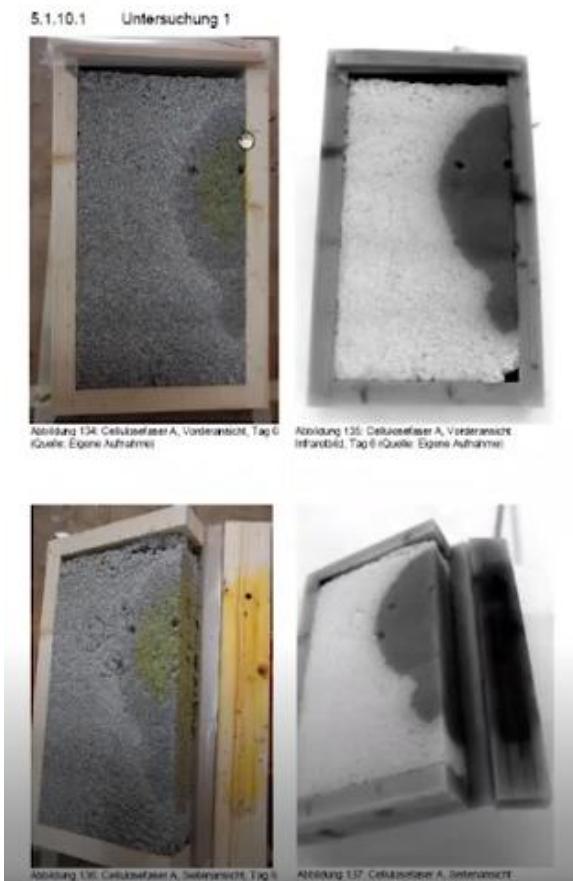
Conclusions

Les phénomènes de condensation interstitielle se produisant dans ces systèmes de parois composées ont été étudiés sur la base d'une expérience de boîte chaude - boîte froide. La distribution de l'humidité a été analysée à l'aide de la méthode de projection des rayons X, qui s'est avérée être une technique utile pour étudier le principe de fonctionnement des systèmes d'isolation. Dans le cas des systèmes capillaires actifs, des profils de teneur en humidité dans l'isolant ont été trouvés. Le mortier de colle, qui a été utilisé pour coller l'isolant au mur de maçonnerie, s'est avéré humide. Dans cette étude, la distribution de l'humidité est étudiée qualitativement. Cependant, une analyse quantitative est également possible. En outre, l'augmentation de poids des murs avec un système d'isolation active capillaire s'avère plus faible que dans le cas d'un système actif non capillaire ouvert à la vapeur ou du mur sans isolation. Cependant, une augmentation plus importante de l'humidité de l'ensemble du mur et du mortier de colle a été obtenue par rapport aux systèmes d'isolation fermés à la vapeur. Ces derniers résultats indiquent la nécessité d'une étude plus approfondie du comportement des systèmes d'isolation capillaire active. Dans une étude plus approfondie, les résultats des rayons X seront combinés avec l'évolution de la température et de l'humidité relative obtenue par les capteurs.

B. Redistribution capillaire après simulation d'une fuite eau liquide

Lucas Van der Meer (van der Meer 2018) a étudié comment l'eau liquide dans une structure en bois se comporte avec différents isolants comme la paille de blé, les fibres de bois, de chanvre, de cellulose, d'herbes, d'algues et des fibres minérales ("Feuchtespeicherung von Dämmstoffen. Feuchteverteilung von flüssigem Wasser in Dämmstoffen einer Holzkonstruktion"). En partant du présupposé réglementaire que la pratique normale de l'isolation n'implique pas de risque supérieur en matière de gestion de l'humidité en défaveur des IBS par comparaison des isolants conventionnels, l'auteur a testé la redistribution capillaire au sein des différents isolants en cas d'apport massif et ponctuel, simulant un dégât des eaux ou le renversement d'une bouteille d'eau. Ses travaux mettent en œuvre des dispositifs d'essais concrets de construction, planifiés et réalisés suivant un protocole scientifique.

Figure 66. Dispositif expérimental d'analyse de répartition de l'humidité



(van der Meer 2018)

Chaque matériau isolant a montré une répartition différente de l'humidité. Les propriétés caractéristiques des matériaux isolants ont pu être identifiées. Cependant, les méthodes choisies pour documenter la répartition tridimensionnelle de l'humidité n'ont pas été fonctionnelles, lors de la réalisation des essais, et n'ont pas permis d'obtenir des données précises pour la représentation des calculs. Les méthodes choisies pour analyser l'évolution de l'humidité n'étaient pas techniquement adaptées pour suivre précisément le phénomène.

Cependant, il est notable que parmi les comportements des différents matériaux testés, la laine de verre n'opposait qu'une barrière extrêmement faible à la redistribution de l'humidité et que l'eau atteignait directement les parties en bois. À l'opposé, avec la ouate, l'eau n'atteignait pas le bois. L'eau a été entièrement retenue dans l'isolant. En conséquence, si un isolant en ouate peut sécher ensuite par redistribution et diffusion de vapeur d'eau, l'ossature ou la structure en bois a un risque moindre d'être impactée. Outre les questions de protocole expérimental limitant l'enregistrement des résultats, l'auteur souligne l'intérêt pour un renouvellement de l'étude de prendre en compte les transformations structurelles du matériaux isolant face à l'apport massif d'humidité (tassement, etc.). Il semble que dans le cas de ouate soufflée, il peut y avoir tassement, contrairement à la ouate compactée ou projetée.

Partie 3. Évaluation du risque fongique des IBS en ITI

Nous avons développé (voir Partie 1. Études de la prolifération des micro-organismes sur les matériaux de construction) à quel point la présence d'humidité et de nutriments font des bâtiments humides un contexte favorable à la croissance microbienne en général en présentant de nombreuses études sur la prolifération des micro-organismes et plus particulièrement celle des moisissures sur les matériaux de construction. Nous avons examiné les spécificités physico-chimiques des matériaux biosourcés et de leur emploi en isolation par l'intérieur dans le contexte de l'observation du développement des micro-organismes, principalement fongiques.

Nous souhaitons revenir plus en détail sur les études et analyses des contaminations et de la prolifération des micro-organismes dans l'environnement intérieur. Afin de prendre en considération les particularités et la complexité de l'exposition microbienne, la diversité des matériaux et leur résistance aux contaminations fongiques, des dynamiques hygrothermiques internes et surfaciques représentant des contraintes majeures à la standardisation (ou l'homogénéisation) et la validation des méthodes d'analyse. Une grande diversité de méthodes et de protocoles d'analyse coexiste, fournissant des résultats pertinents, mais trop souvent hétérogènes pour composer un tableau cohérent à même de répondre aux enjeux.

1. Le risque fongique sur des MBS : simulation et modèles de prédiction

Dans son Annexe 15, le Rapport de l'ANSES relatif aux moisissures dans le bâti (ANSES 2016) propose la synthèse suivante des « différents modèles d'estimation de croissance des moisissures » :

« Dans le cadre d'une approche prédictive du développement des moisissures sur les matériaux, les scientifiques ont étudié et validé plusieurs modèles de cette croissance. Le modèle le plus simple de prédiction de croissance des moisissures se retrouve dans les isoplèthes.

La modélisation de la croissance de moisissures et de leur développement en fonction de l'humidité, de la température, du temps et du matériau est un paramètre important permettant d'évaluer la durabilité des différents matériaux de construction face à ce risque. Les modèles permettent d'évaluer le risque de présence et le développement des

moisissures, mais aussi une analyse des conditions essentielles nécessaires pour le début de la croissance de celles-ci. Le modèle est aussi un outil pour simuler l'état d'avancement de la moisissure dans des conditions différentes sur les surfaces du matériau. Cela exige que les propriétés telles que la capacité hydrique, les propriétés liées au transport de l'humidité dans le matériau et à la surface soient prises en compte dans les simulations. Dans la pratique, on rencontre plusieurs paramètres affectant la croissance de moisissures, par exemple l'épaisseur des couches de matériaux combinées avec les coefficients surfaciques de transferts thermiques et de masse locaux. Issu des travaux présentés dans "Modélisation de la croissance de moisissures" (Hannu Viitanen *et al.* 2010), le Mould Index est un outil mathématique complet. »

La synthèse proposée dans les paragraphes suivants est basée sur plusieurs revues exhaustives et consécutives effectuées par (ANSES 2016 ; E. Vereecken, Saelens, et Roels 2011 ; Evy Vereecken et Roels 2012 ; Evy Vereecken, Janssen, et Roels 2013 ; E. Vereecken, Vanoorbeek, et Roels 2015b ; 2015a) sur les différents modèles existants.

A. Les différents modèles de prédition du risque fongique

E. Vereecken présente plusieurs travaux faisant la synthèse et l'évaluation critique d'une part importante des modèles existants de développement des moisissures sur une paroi. On pourra consulter notamment (E. Vereecken, Saelens, et Roels 2011 ; Evy Vereecken et Roels 2012) qui ont été repris et synthétisés par J. Berger dans son travail de thèse. Lequel en prolonge la critique en constatant que si de tels outils permettant de modéliser l'apparition de certaines altérations existent, ils ne concernent en général qu'un type d'altération et ne sont pas couplés avec des modèles à l'échelle du bâtiment, permettant par exemple de prédire le confort hygrothermique des occupants. (Berger 2014). En conséquence, chacun de ces modèles rencontre ses propres limites et ses lacunes, qui aboutissent à des conclusions très variables.

Dans une revue de l'état de l'art sur les modèles de prédition des dégradations biologiques (Evy Vereecken et Roels 2012) distinguent **deux types d'approches : les statiques et les dynamiques**. Les modèles statiques indiquent si le processus de dégradation a été initié, alors que les modèles dynamiques permettent de simuler la croissance microbienne en fonction des données hygrothermiques.

Dans son mémoire de thèse, (Berger 2014) propose une synthèse des différents modèles recensés par Vereecken & Roels (Evy Vereecken et Roels 2012).

Tableau 22. Synthèse des modèles de développement biologique recensés par (Berger 2014)

Nom du modèle	AIE Annexe 14 et 41	Time of wetness	Modèle VTT	Modèle Isopletche	Modèle Bio
Influence de la température	oui	non	oui	oui	oui
Influence de l'humidité relative	indirectement	oui	oui	oui	oui
Prise en compte des propriétés des matériaux	non	non	oui	oui	oui
Modélisation dynamique (D) ou statique (S)	S	S	D	D (modéré)	D
Données d'entrées	$T_{int}, T_{ext}, T_{s,int}$	φ_a	T_a, φ_a	T_a, φ_a	T_a, φ_a
Critère de pathologie	$\frac{\min T_{s,int} - T_{ext}}{T_{int} - T_{ext}} > 0.7$	$\int_0^T \frac{\max(0, \varphi_{in} - 0.8)}{\varphi_{in} - 0.8} dt$	Index de moisissure M	graphiques isoplèthes	Teneur en eau des spores

En 2015, Vereecken (E. Vereecken, Vanhoirbeek, et Roels 2015b) propose une nouvelle approche critique pour une utilisation plus réfléchie des modèles de prédiction du risque fongique. Elle expose une synthèse des défis et problèmes majeurs rencontrés lors de leur utilisation et propose des pistes d'amélioration pour l'élaboration de modèles nouveaux ou de leur amélioration en vue d'une évaluation des risques plus fiable. L'ensemble des modèles répertoriés considèrent la température et l'humidité relative / température sèche comme données d'entrées. Le modèle statique de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) considère également l'écart entre température intérieure et température extérieure comme donnée d'entrée.

La présentation détaillée de ces méthodes ci-dessous est extraite de la synthèse proposée par l'ANSES (ANSES 2016) :

- **IEA Annex 14**

Ce critère, le plus élémentaire, est issu des travaux de l'Annexe 14 de l'Agence Internationale de l'Energie dans les années 1990. La consigne en humidité relative est basée sur l'isopletche le plus faible pour *Aspergillus versicolor*. Une température de surface minimum est définie, indépendamment du matériau, de l'état de surface... La consigne peut être de 80 %, 89 % ou 100 % pour une exposition de 1 mois, 1 semaine et 1 jour.

- **Time-of-wetness (TOW)**

La prise en compte de l'aspect dynamique peut se faire de manière plus simplifiée au moyen de l'indice TOW (temps nécessaire pour que l'humidité relative soit supérieure à 80 % avec une température de l'air de 0 °C). Une valeur de TOW inférieure à 0,5 réduit substantiellement les risques de moisissures. Toutefois, les études permettant de travailler sur le TOW se limitent à peu d'espèces de moisissures et peu de matériaux.

- **Johansson's mould growth indices : le modèle PJ base sur l'humidité relative critique**

A partir de mesures sur différents types de matériaux (inertie, couleurs,...), Johansson *et al.* (2014) proposent plusieurs indices basés encore une fois sur l'humidité relative.

- **Fungal index**

L'indice fongique indique la capacité qu'a l'environnement à engendrer la croissance de moisissures. Étant donné que la base de données - donnant la relation entre les conditions de température et d'humidité relative et l'indice fongique - n'est pas disponible, l'indice fongique ne paraît pas intéressant dans le cadre de ce rapport.

- **Modèle VTT**

Le modèle VTT (*VTT Technical Research Centre of Finland, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy*) est un modèle de prédiction empirique développé par (Hannu Viitanen *et al.* 2010), dans lequel le développement de la croissance est défini par le *Mould Index* (cf. 6.2.2.2). Le modèle est basé sur une régression linéaire d'un ensemble de données mesurées. Il a été amélioré récemment par les membres du VTT (Ojanen *et al.* 2010 ; 2011). Les intervalles sont compris entre 0 (aucun développement) et 6 (moisissures très développées et couvrant la totalité du matériau) et peuvent être utilisés comme un critère de conception. Ainsi un *Mould Index* égal à 1 est défini comme la valeur maximum tolérable : moment à partir duquel le processus de germination est supposé commencer (voir Tableau 23).

Berger (Berger 2014), puis Claude (Claude 2018) suggèrent de retenir ce modèle pour proposer un indicateur de développement des moisissures (qu'ils appellent indicateur de pathologies).

- **Isopleth models**

Etant donné que l'humidité, la température et le temps d'exposition sont les principaux facteurs liés à la croissance des moisissures, les relations entre ces facteurs et le risque de moisissures sont souvent exprimées par des courbes isoplèthes. Ces courbes séparent les conditions favorables et défavorables de T-RH pour la croissance de moisissures. Les modèles les plus simples fournissent uniquement la courbe d'état limite, les modèles plus avancés d'isoplèthes subdivisent en temps de la germination et jusqu'au taux de croissance.

Les courbes isoplèthes sont la base de l'étude du développement de modèles de moisissures que nous avons détaillée précédemment. On peut noter que cette analyse est utilisée dans le code ESP-r, utilisé au Royaume-Uni pour les calculs de thermique des bâtiments.

- **Biohygrothermal model**

Dans ce modèle, le bilan en humidité d'une spore, qui a un certain potentiel osmotique et qui peut donc par conséquent absorber l'eau selon des conditions aux limites transitoires, est calculé. Cela signifie aussi que même un séchage intermédiaire sur les spores du champignon peut être calculé.

La plupart des moisissures sont observées dans les logements mal isolés, mais il n'est pas rare de trouver ces moisissures dans les logements récents, notamment lors de la phase de construction (humidité liée au séchage des matériaux et ventilation inexistant). Pour prédire cette croissance, des modèles ont été intégrés dans des logiciels de calcul thermique des bâtiments. Des chercheurs ont contribué au développement d'un modèle de croissance en régime non permanent (M. Krus et Sedlbauer 2007). L'intérêt de ce modèle est de prendre en

compte des conditions micro-climatiques telles qu'un séchage ponctuel qui peut ralentir la croissance des spores. Le modèle s'appelle « Biohygrothermal model » et est intégré dans le logiciel WUFI®. Ce logiciel est couramment utilisé dans les bureaux d'études qui souhaitent étudier la propagation dynamique de l'humidité au sein des parois de bâtiments.

Le modèle Biohygrothermique IBP modélise la croissance fongique des hyphes en millimètres, comme une fonction des conditions environnementales dynamiques. Mais comme la croissance de l'hyphé est souvent invisible à l'œil nu, il n'est pas aisément de savoir à partir de quelle longueur elle deviendra une nuisance, ni si elle sera d'une souche destructrice ou non.

En complément de cette présentation, nous pourrons noter chez Viitanen et son Mould index, une plus large prise en compte de l'évolution des vitesses de développement selon le type de champignons, ainsi que des profils appliqués aux matériaux, aboutissant au développement de courbes isoplèthes pour différents types de champignons, dans différentes de conditions de T°C et d'HR, et à une modélisation de profils appliqués à différentes natures de matériaux.

Tableau 23. Tableau d'indice fongique (Ritschkoff, Viitanen, et Koskela 2000)

Index fongique	Surface couverte (en %)	Eléments caractéristiques
0	0	Aucun développement
1	≤ 1	Petit développement visible uniquement sous microscope
2	≤ 10	Développement modéré visible uniquement sous microscope
3	≤ 30	
4	≤ 70	
5	> 70	Développement visible
6	100	

Ainsi que le développe le rapport de l'ANSES (ANSES 2016) :

« Il existe des méthodes d'essai en laboratoire pour évaluer la résistance des matériaux de construction aux moisissures comme celles définies dans les normes internationales, américaines et européenne suivantes : ISO 846, ASTM C1338 et EN 15101-1 Annexe F. Il s'agit de méthodes standardisées, généralement basées sur des principes équivalents. Ces essais sont réalisés à 95 % d'humidité relative, valeur retenue ici pour la croissance de moisissures. Il n'y a aucun lien avec les conditions hygrothermiques habituellement mesurées *in situ*. En outre, le champ d'application de ces méthodes d'essai ne concerne pas spécifiquement les matériaux biosourcés, sauf pour l'EN 15101-1 qui traite de la cellulose en vrac. Les produits sont inoculés avec des spores de champignons et exposés pendant un certain laps de temps à des conditions favorables à la croissance de moisissures (90 à 95 % d'humidité relative et 20 °C). Après cela, la croissance des moisissures est évaluée en utilisant des moyens différents, comme l'inspection visuelle ou la gravimétrie. Une comparaison complète entre plusieurs méthodes est proposée par (Pär Johansson *et al.* 2014). Elle a également proposé une étude comparative de 21 matériaux différents. Les méthodes mentionnées ci-dessus sont généralement destinées à la comparaison entre les matériaux, tous placés dans les conditions les plus défavorables, mais ne fournissent pas d'informations sur la façon dont un matériau se

comportera dans un bâtiment, où les conditions d'humidité ne sont pas aussi sévères que dans les tests de laboratoire (P. Johansson 2014). Afin d'évaluer la résistance des matériaux de construction à la prolifération des moisissures, le niveau d'humidité critique, défini comme les conditions d'environnement constituant la limite à partir de laquelle la croissance de la moisissure sur un matériau spécifique, doit être déterminé.

Johansson *et al.* (Pär Johansson *et al.* 2014) ont ainsi comparé une méthode développée en laboratoire pour déterminer ce niveau d'humidité critique de différents matériaux avec des mesures *in situ*. Il est constaté qu'en général, les résultats peuvent être extrapolés. Cependant, l'ampleur et la fréquence des variations d'humidité relative et les changements de température dans des conditions réelles doivent être pris en considération pour des prévisions précises de croissance de moisissures. Les autres causes de discordances entre résultats de laboratoire et sur site sont les espèces fongiques utilisées pour les essais (P. Johansson *et al.* 2012). Lors d'un test en laboratoire, quelques espèces de champignons seulement sont présentes, à des doses contrôlées, tandis que dans les conditions réelles un plus grand nombre d'espèces fongiques est présent, et ce à des concentrations inconnues. Afin de reproduire plus fidèlement une situation d'exposition réelle, l'utilisation de spores d'origine naturelle non-stérilisés ou de substrats inoculés a été proposée par Thomson & Walker (Thomson et Walker 2014). »

B. Limites et analyses critiques

Nous avons vu que le développement et la prolifération de micro-organismes (moisissures, bactéries, champignons) à l'intérieur d'un bâtiment nécessitent à la fois :

- Des niveaux d'humidité élevés ;
- Des substrats contenant des nutriments adéquats (Hens 1999) ;
- Un besoin d'oxygène, pour la plupart ;
- Une température (optimale), souvent comprise entre 22 °C et 35 °C ;
- Une humidité relative intérieure (optimale) comprise entre 71 % et 95 % (Ayerst 1969 ; Baughman et Arens 1996), tout en sachant que certaines espèces peuvent croître à des niveaux inférieurs.

D'autres facteurs dits secondaires sont la valeur du pH et la rugosité du substrat sur lequel les moisissures se développent, la lumière, les interactions ou compétitions entre différentes souches, le temps d'exposition et la vitesse de l'air intérieur (Adan 1994 ; Gorny 2004 ; Krus *et al.* 2001).

La relation entre les matériaux de construction et la croissance des moisissures a été ainsi étudiée par plusieurs auteurs, mais les résultats disponibles ne sont pas faciles à résumer en raison de la grande variété de matériaux, des protocoles d'essai et de divers autres facteurs qui influencent le développement fongique.

Cette étape sur l'étude et la caractérisation de la prolifération fongique montre déjà une extrême complexité et la littérature montre une grande variabilité, tant dans les outils et les protocoles, que dans l'analyse de leurs résultats, constituant ainsi un premier niveau de biais⁷³.

⁷³ Nous verrons plus loin que de nombreux biais (positifs ou négatifs) peuvent s'accumuler dans l'étude de la résistance des matériaux face au risque fongique : nous l'avons vu au moment des prélèvements, des protocoles d'évaluation (inoculation, culture, analyse), mais aussi dans les modèles de prédiction.

1. Les modèles

Verrecken et Roels (Evy Vereecken et Roels 2012) concluent que malgré les efforts de recherche consacrés pour améliorer la robustesse et la précision des modèles prédictifs, il reste de nombreux verrous et hypothèses simplificatrices qui conduisent à des réponses physiques/thermodynamiques non représentatives et de ce fait à des prédictions différentes voire contradictoires d'un modèle à l'autre en terme de risque fongique ainsi que d'intensité et de dynamique de croissance fongique. A titre d'exemple, (Sedlbauer 2001 ; Sedlbauer *et al.* 2011) proposent une comparaison des facteurs et approches considérées dans les 2 modèles dynamiques Isopleth et Biohygrothermal (Tableau 24).

Tableau 24. Comparaison des modèles dynamiques Isopleth et Biohygrothermal (K. Sedlbauer 2001)

Facteur d'influence	Evaluation	Examen des facteurs dans le :		
		Modèle Isopleth	<i>Biohygrothermal model</i>	
Humidité	Condition de développement la plus importante	Combinaison de température et humidité relative au moyen d'isoplèthes	Diffusion cinétiques i.e : fonction de stockage de l'humidité, valeur S_d ,...	
Température	Influence forte	Données temporelles contenues dans les isoplèthes	Niveau transitoire de la teneur en humidité dans les spores	
Temps				
Disponibilité des nutriments		Catégorie de substrat	Considération indirecte en utilisant les catégories de substrat pour déterminer la teneur en humidité critique	
Sel	Influence par rapport aux matériaux et à la contamination	Contenu indirectement dans les catégories de substrat		
pH	Changé par les espèces fongiques			
Lumière	Croissance possible même sans lumière	Pas pris en compte dans le modèle ; est toujours considéré comme existant suffisamment		
Oxygène	Présence permanente			
Dissémination de spore	Les spores sont ubiquitaires			
Rugosité de surface	Seulement une faible influence	Contenus à travers les catégories de substrat		
Biotiques	Existence d'influence	Considération par LIM (Lowest Isopleth for Mould)		

Tant dans leurs données d'entrée, dans le traitement de celle-ci pour l'évaluation de la croissance (en mm de croissance des hyphes VS index de moisissure), que dans les indicateurs de sortie permettant leur interprétation, ces modèles sont très différents et difficiles à comparer.

Certains paramètres (luminosité, apport d'oxygène, rugosité du support...) sont considérés de la même manière. Par contre les entrées importantes (température, humidité, temps) sont appréhendées de manières différentes. L'isoplète est un simple réseau de courbes, alors que le Biohygrothermal model prend en compte les phénomènes de diffusion de vapeur, de

progression en régime transitoire de l'humidité, et permet ainsi un calcul « numérique » du phénomène.

Dans une autre étude comparative entre 5 modèles, Johansson *et al.* démontrent que même les modèles statiques offrent des résultats plus robustes que les modèles dynamiques dans certains cas, selon le type d'échantillon, la position dans le logement, etc.

En 2015, une nouvelle classification du risque fongique est établie par (H. Viitanen *et al.* 2015) basée sur une évaluation comparative de ces deux modèles de croissance établis. Dans cette étude, une conversion entre ces modèles est proposée et un nouveau processus de traitement du modèle VTT est développé, lequel permet à la fois d'analyser des résultats numériques de simulation hygrothermiques et des données expérimentales mesurées. Une classification employant un indicateur en code couleur facilite l'interprétation des résultats entre absence de risque (vert), risque non acceptable (rouge) et risque probable nécessitant une évaluation spécifique (jaune).

Malgré cela, d'autres études mettent en exergue l'importance d'utiliser ces modèles de manière plus réfléchie ou, tout du moins, avec une distanciation certaine – mêmes pour les plus actuels - :

- La première est une thèse (Evy Vereecken, Janssen, et Roels 2013) menée sur l'analyse hygrothermique de l'isolation par l'intérieur comprenant notamment une comparaison des modèles de prédiction du risque fongique ;
- Puis (E. Vereecken, Vanoirbeek, et Roels 2015a), une analyse critique de l'utilisation des protocoles et des résultats de la recherche expérimentale sur la croissance fongique pour alimenter les bases de données des modèles de prédiction. Cet article présente une évaluation préliminaire de certains modèles de prédiction des moisissures, basée sur des données comparatives de la littérature expérimentale. Bien que les expériences menées constituent l'intrant nécessaire pour le développement des modèles, des divergences fortes sont observées.

Par conséquent, les difficultés et les défis liés à la relation entre la recherche expérimentale, les tests et la simulation numérique sur les moisissures sont de plus en plus discutés.

En 2020 et 2021, deux articles (P. Johansson *et al.* 2020 ; P. Johansson, Lång, et Capener 2021) soulignent l'importance de la variabilité des modèles existants en comparant les résultats expérimentaux d'échantillons exposés in-situ pendant près de trois années aux simulations effectuées par cinq opérateurs indépendants sur cinq modèles différents.

Johansson et Svensson (Pernilla Johansson et Svensson 2020) soulignent par ailleurs la difficulté de connaître et de comprendre précisément ces dynamiques, montrant par l'expérimentation en comparant l'observation sur le terrain avec les résultats de modèles de prédiction de croissance, que les conclusions sont parfois très divergentes.

Bon nombre des méthodes discutées plus haut ont été développées pour une utilisation avec du bois ou des matériaux à base de bois. La question est alors de savoir si ces méthodes conviennent aux matériaux non ligneux. Logiquement, ils devraient convenir aux matériaux lignocellulosiques non boisés tels que le bambou, la bagasse ou le chanvre, et des tests de décomposition des pertes de masse sont en effet utilisés pour les matériaux de type panneau construits à l'aide de ces matériaux. Cependant, les matériaux biosourcés sont utilisés dans d'autres applications telles que l'isolation où les tests de désintégration standard peuvent ne pas convenir (Curling *et al.* 2015). Une autre question pour les matériaux de construction concerne les interactions synergistiques – par exemple, un matériau isolant biosourcé pourrait-il avoir un effet positif ou négatif sur la susceptibilité d'autres composants

structurels à être attaqués par des champignons ? Ces interactions peuvent être modélisées si les informations pertinentes sont connues (Stefanowski *et al.* 2015). Pour de nombreux nouveaux matériaux, cependant, cette information n'est pas facilement disponible et, par conséquent, des tests sont nécessaires. Initialement, les tests en laboratoire sont la méthode de criblage idéale pour déterminer les caractéristiques des matériaux et, par conséquent, les tests en laboratoire continueront d'être un outil important dans la caractérisation des matériaux. (Stefanowski, Curling, et Ormondroyd 2017)

2. Les substrats

Chaque espèce croît dans des conditions particulières. Dans la majorité des cas, les dynamiques de croissance des champignons sont analysées manuellement, limitant la recherche :

- À des conditions environnementales spécifiques, voire réductrices, car les conditions réelles sont limitées à des seuils et des durées prédéterminées de temps, de température et d'humidité ;
- À des espèces et souches de champignons ou de moisissures choisies et limitées.

Pour se prémunir de variables trop nombreuses, de durées d'analyse trop longues, etc. une forme de simplification des protocoles a induit :

- Une stérilisation préalable des supports étudiés pour éviter le développement de souches accidentelles, non désirées. Ceci a l'inconvénient de ne pas permettre l'étude de souches endémiques ou locales non identifiées ou inoculées (A. Laborel-Préneron 2018) ;
- Une inoculation de souches choisies, cultivées de manière standardisée. Dont les récentes études montrent que le comportement (croissance) peut être impacté par les modifications génétiques de ces souches (sélection et appauvrissement) et que les essais peuvent être biaisés à un autre niveau en raison de cette inconnue.

Il existe alors un risque de simplification, alors que le besoin de plus en plus manifeste relèverait de l'homogénéisation.

3. Les méthodes de prélèvements

- Caractérisation de prélèvement

Pour Verdier (Thomas Verdier 2015, 27-28), ainsi que pour Simons (A. Simons 2018), l'influence de nombreux facteurs sur l'efficacité du prélèvement, tels que la manipulation de l'opérateur (Bex *et al.* 2007), le type d'écouillon utilisé (coton, mousse, viscose, polyester, nylon) et s'il est humidifié ou non (Edmonds 2009 ; Edmonds *et al.* 2009 ; Méheust 2012 ; Rose *et al.* 2004). En outre, une étude de Buttner (Buttner *et al.* 2007) met en avant l'influence majeure du type de matériaux sur l'efficacité du prélèvement. Les auteurs comparent les rendements de collectes par écouillon et par éponge sur différents matériaux après inoculation artificielle. La quantification des micro-organismes est réalisée par PCR et le rendement est obtenu en divisant le nombre de cellules bactériennes prélevées sur matériaux par le nombre de cellules préalablement inoculées. Les auteurs expliquent que les efficacités ainsi estimées sont affectées par la technique de prélèvement elle-même et par la surface du matériau support. En effet, les valeurs de rendement les plus élevées sont trouvées sur matériaux lisses, non rugueux et/ou non-poreux : 52 % et 47 % pour le verre et 29 % et 11 % pour le

bois laminé, en utilisant l'écouillon et l'éponge respectivement. En comparaison, les rendements trouvés sur béton sont seulement de 0,8 % et 0,7 %.

- Impression (gélose contact)

Pour Simons (A. Simons 2018, 38-39), parmi les différents paramètres impliqués dans l'efficacité de prélèvement, les principaux facteurs concernent le temps de contact et la pression appliquée sur la gélose (Bex *et al.* 2007 ; Santucci *et al.* 2007). Afin de contrôler et de standardiser ces paramètres, l'utilisation d'applicateurs commerciaux est fortement recommandée. Le choix du type de gélose et ses conditions d'incubation sont essentiels pour sélectionner les microorganismes étudiés, permettant la croissance soit uniquement des bactéries, soit uniquement des champignons, soit des deux en même temps.

Dans la littérature examinée, par exemple les 22 études comparées par Thomas Verdier (T. Verdier *et al.* 2014 ; Thomas Verdier 2015 ; Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016), nous retiendrons que :

- les genres les plus étudiés et identifiés de moisissures appartiennent à *Penicillium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Stachybotrys* et *Acremonium* ;
- les genres de champignons destructeurs les plus rencontrés sont : XXXX
- l'apparition et la croissance des micro-organismes sur les matériaux de construction est influencée par un ensemble de facteurs déterminants regroupant :
 - leurs besoins spécifiques en eau et en nutriments ;
 - type de matériau substrat induit également une prévalence de certains groupes fongiques.

Le facteur le plus déterminant de la croissance microbienne sur les matériaux de construction semble être l'eau et plus précisément l'activité hydrique d'un matériau, qui correspond au 1/100 de l'humidité relative d'équilibre. Il semble être prouvé que l'activité de l'eau a_w est un indicateur fiable pour prédire la contamination microbienne. La croissance des micro-organismes est généralement favorisée par des valeurs d'un a_w autour de 0,75. Néanmoins, les besoins en micro-organismes dépendent en grande partie du type de matériau, par exemple il est plus faible pour les matériaux à base de cellulose que pour les matériaux à base de béton.

Les autres paramètres qui régissent la croissance microbienne concernent la composition chimique, le pH et les propriétés physiques des surfaces des matériaux colonisés.

Néanmoins, ils mentionnaient que la caractérisation des interactions physico-chimiques entre les substrats et les micro-organismes et les propriétés adhésives microbiennes n'ont pas encore été étudiées pour les matériaux de construction exposés à des conditions intérieures. (Thomas Verdier, Bertron, et Johansson 2016).

Mais l'ensemble de la littérature semble s'accorder sur le fait que d'autres études doivent être menées afin d'améliorer à la fois la connaissance des phénomènes régissant de croissance microbienne sur les matériaux de construction biosourcés, mais aussi sur leur durabilité face à la croissance fongique, ce que nous aborderons dans la section suivante, en se concentrant également sur les IBS.

2. Etudes *in situ*

Un nombre limité d'articles sont disponibles sur les mesures *in situ* du transfert de chaleur et du transport de l'humidité dans les bâtiments isolés par l'intérieur et ces études sont encore

moins représentées en ce qui concerne les IBS. Il existe cependant quelques études comparatives réalisées in situ.

Bien que ne portant pas sur les IBS, les travaux de Biseniece *et al.* (Biseniece *et al.* 2018) rapportent que Kloseiko *et al.* (Klõõseiko *et al.* 2015), ont surveillé un mur extérieur en moellons à double vantail d'un musée avec une isolation intérieure. L'isolation a été installée pendant la période automne-hiver et se composait d'une cavité d'air, de laine minérale et d'une paroi intérieure nouvellement construite. Pendant la période de test, une humidité relative très élevée a été observée. La recherche a conduit à la conclusion que le séchage du mur de maçonnerie avant l'isolation devrait être pris en compte et que la négligence de le faire entraînera des niveaux d'humidité relative globalement élevés dans toute la structure et un risque potentiel de croissance de moisissures.

Dans une autre recherche menée par Kloseiko *et al.* (Klõõseiko, Arumägi, et Kalamees 2014), quatre matériaux d'isolation différents (polyuréthane, polyisocyanurate, béton cellulaire et silicate de calcium) ont été testés. Les résultats des tests ont montré que le silicate de calcium et le béton cellulaire se desséchaient plus rapidement que les deux autres matériaux, mais ils ont également montré une augmentation rapide de l'humidité, lorsque l'humidité du climat interne était augmentée. La principale conclusion était que l'humidité intégrée du mur pendant l'application de l'isolant est responsable de niveaux d'humidité élevés et peut provoquer une condensation interstitielle.

Des recherches similaires ont été menées par Pavie où sept types de matériaux d'isolation ont été testés sur le mur de briques historiques. Ces matériaux étaient comparés à la finition d'enduits à la chaux. Il a été constaté que la performance des matériaux isolants est surestimée par les producteurs de 13 % à 25 % en moyenne (Walker et Pavía 2015).

Bianco *et al.* ont mené l'enquête sur un nouveau plâtre isolant thermique et étudié ce matériau sur un bâtiment historique à Turin, en Italie. Les résultats préliminaires montrent que la conductivité thermique du nouveau plâtre proposé est de 2,5 à 3 fois inférieure à celle du plâtre conventionnel, mais des recherches supplémentaires sont nécessaires sur les performances à long terme de ce matériau. (Bianco *et al.* 2015)

L'examen de la littérature sur l'isolation intérieure des murs existant en maçonnerie a révélé que les études sont dispersées et qu'il n'existe pas de solution commune pour tous les différents cas. Chacune des études a des objectifs différents se concentrant principalement sur le comportement thermique du mur et beaucoup moins sur le transport de l'humidité. Néanmoins, plusieurs études sont disponibles au niveau européen et traitent par exemple de la continuité capillaire entre les couches isolantes intérieures et les murs supports, de l'importance de la pose d'une couche de redistribution capillaire sur les murs support et de la problématique des nez de poutres.

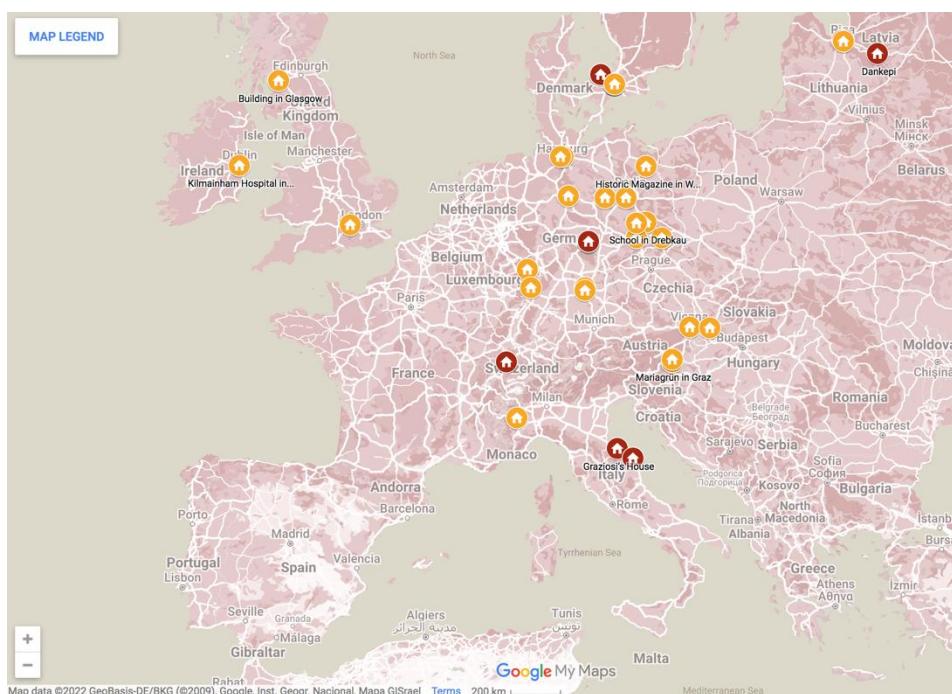
A. RIBuild 2015- 2019 : analyse et évaluation de matériaux d'isolation thermique par l'intérieur

Le rapport RIBuild⁷⁴ (Blumberga *et al.* 2016) fournit une analyse et une évaluation d'un état de l'art au sujet des matériaux d'isolation thermique par l'intérieur et de leurs méthodes d'application dans les bâtiments historiques, ainsi qu'une étude des méthodes, des outils et des lignes directrices utilisés dans les outils d'aide à la décision pour la mise en œuvre d'ITI dans les bâtiments historiques. Les bâtiments historiques considérés dans ce rapport représentent tous les types de bâtiments protégés⁷⁵ et non protégés construits avant 1945. L'enquête s'est limitée aux bâtiments à murs lourds (pierre, brique, ossature massive en bois), excluant ainsi les bâtiments en bois à ossature légère. Cette étude ne comporte pas uniquement des analyses de publications et d'études de cas mobilisant des IBS, néanmoins un nombre non négligeable de références et de projets réels sont sourcés et analysés.

1. Descriptifs des cas étudiés

Les études de cas sont localisées principalement dans la bande centrale de l'Europe, notamment en Lettonie (Dankepi, Spikeri, Catholic Seminar), au Danemark (Thomas Laubs Gade, Haderslev, Kildevældsgade, Klitgarden, Meinungsgade) en Italie (Graziosi's House, Rectorate), en Allemagne (Zöllnerviertel Building 1, 2 et 3), en Suisse (Brüttelen). La carte interactive disponible en ligne fourni une liste plus complète, bien que dépassant les cas exploités par l'étude.

Figure 67. Carte interactive recherche *in situ* (études de cas) sur ITI



⁷⁴ Source : (Blumberga *et al.* 2016)

https://static1.squarespace.com/static/5e8c2889b5462512e400d1e2/t/5e9db814e1ea8b0e935c76d2/1587394584525/RIBuild_D1.2_1.0.pdf

⁷⁵ La notion de « bâtiment protégé » représente un potentiel haut degré architectural de pertinence et de patrimoine culturel. Cette définition de cette notion et du statut donné aux bâtiments considérés peut être donnée au niveau national ou local selon les pays.

L'étude intègre principalement les isolants suivants :

- Cellulose ;
- Liège ;
- Laine minérale ;
- Polyuréthane (PUR) ;
- Polyisocyanurate (PIR) ;
- Polystyrène expansé (EPS) ;
- Polystyrène extrudé (XPS) ;
- Aérogel ;
- Panneaux d'isolation sous vide (VIP) ;
- Enduit isolant thermique ;
- Silicate de calcium.

2. Synthèse des principaux résultats

L'étude permet de préciser les avantages et inconvénients, la répartition, les facteurs de risque et des conditions limites et initiale des différents systèmes en ITI. Le Tableau 25 propose une synthèse des avantages, inconvénients et risque sur trois systèmes d'ITI.

Tableau 25. Avantages et inconvénients (y compris les risques de dommages) pour trois types différents de systèmes d'isolation intérieure en fonction de leurs caractéristiques de transport

	Avantages / Inconvénients	Risques
Systèmes d'isolation prévenant la condensation (anti-condensats)	<p>+ Permet des constructions sèches sans accumulation de condensat</p> <p>+ Indépendant du climat ambiant (fonctionnant également avec une charge d'humidité élevée de l'air intérieur)</p> <p>- Matériaux/systèmes coûteux</p> <p>- Fabrication nécessitant beaucoup de main-d'œuvre</p> <p>- Pas de potentiel de séchage à la vapeur en cas de charges d'humidité dans le mur</p> <p>- Pas de distribution d'eau liquide en cas d'accumulation locale d'eau</p>	<p>- Erreur d'appréciation des propriétés de construction (revêtements extérieurs, maçonnerie) et donc humidification du mur (par exemple, pluie battante)</p> <p>- Rétenzione d'une teneur élevée en humidité dans la construction existante (par exemple, en raison d'une humidité croissante et du faible potentiel de séchage)</p> <p>- Pose incorrecte entraînant des discontinuités et un flux d'air derrière la couche d'isolation</p>

Systèmes d'isolation limitant les condensats	<ul style="list-style-type: none"> + Sélection facile du niveau de perméabilité à la vapeur (membrane) et adaptée au cas + Habituellement, pas d'humidité intégrée au système d'isolation - Fabrication nécessitant beaucoup de main-d'œuvre - Réduction du potentiel de séchage à la vapeur en cas de charges d'humidité dans le mur - Forte réduction de l'effet de tampon hydrique et thermique des murs - Pas de distribution d'eau liquide en cas d'accumulation locale d'eau 	<ul style="list-style-type: none"> - Erreur d'appréciation des propriétés de construction (revêtements extérieurs, maçonnerie) et donc humidification du mur (par exemple, pluie battante) - Rétention d'une teneur élevée en humidité dans la construction existante (par exemple, en raison d'une humidité croissante) - Rétention d'une teneur élevée en humidité du système d'isolation - Pose incorrecte entraînant des discontinuités et un flux d'air derrière la couche d'isolation - Durabilité insuffisante des bandes adhésives et des membranes d'étanchéité (donc fuites et flux d'air derrière l'isolant) - Perforation des membranes par les locataires ou les ouvriers (donc fuites et flux d'air derrière l'isolant)
Systèmes d'isolation tolérant les condensats	<ul style="list-style-type: none"> + Système robuste en cas de mauvaise exécution ou de points de dommages locaux (distribution de condensat) + Effet tampon hydrique des murs conservés - Fabrication nécessitant beaucoup de main-d'œuvre pour préparer un support plan et lisser le sol, placer les panneaux ou coffrer/projeter, etc. - Effort important pour la conception du système (avec simulations le cas échéant) - Ne convient pas aux charges de vapeur élevées en permanence dans l'air ambiant - Performances thermiques réduites (conductivités thermiques plus élevées) par rapport à d'autres systèmes - Dans de nombreux cas, des charges d'humidité intégrées élevées (apport d'eau des mortiers, enduits, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> - Erreur d'appréciation des propriétés de construction (revêtements extérieurs, maçonnerie) et donc humidification du mur (par exemple, pluie battante) - Rétention d'une teneur élevée en humidité du système d'isolation - Pose incorrecte entraînant une connexion incohérente des couches du système et donc un contact capillaire interrompu avec une distribution capillaire réduite du condensat ou même une convection derrière les isolants (si sous forme de panneaux) et donc une accumulation de condensation - Perforation des éléments isolants par des chevilles ou d'autres éléments et donc des ponts thermiques locaux - Sélection d'un matériau de finition intérieure inapproprié qui bloquerait la diffusion/l'échange de vapeur d'eau avec l'air ambiant

E. Samin. Adapté de RIBUILD 3.2 (Freudenberg 2019, 22-23)

3. Apports de l'étude RIBuild

En conclusion de l'étude RIBUILD 3.2 (Freudenberg 2019, 69-70), il apparaît que l'analyse des études de cas publiées et celles internes au projet RIBuild a fourni un aperçu des systèmes d'isolation appliqués, des épaisseurs d'isolation et des conductivités thermiques employées :

- Les systèmes isolants dits « de limitation de la condensation » sont les plus fréquemment utilisés (environ 50 %) ;
- Les systèmes dits « tolérant à la condensation » sont aussi très représentés (environ 45 %) ;
- Et les systèmes de « prévention la condensation » sont plus rares (environ 5 %).

Les systèmes « prévenant » ou « limitant » la condensation présentent à la fois une conductivité thermique plus faible et une épaisseur de matériaux d'isolation plus élevée par rapport aux systèmes « tolérants ».

La résistance thermique de ces produits est en conséquence plus élevée que pour le groupe des produits isolants tolérant les condensats dans les cas réels étudiés. Le matériau le plus courant dans ce groupe est la laine minérale. Les autres produits fréquemment utilisés sont l'EPS (polystyrène expansé), le XPS (polystyrène extrudé), le PU (polyuréthane), les panneaux composites et l'isolation en perlite. La plupart sont complétés par une membrane régulant la diffusion de vapeur d'eau et une finition intérieure.

Les produits capillaires actifs, ou « tolérants à la condensation » sont appliqués dans une épaisseur moyenne de 68 mm dans toutes les études de cas analysées. Encore une fois, l'épaisseur typique est plus élevée pour les études de cas internes de RIBuild (84 mm) que pour les autres cas publiés (65 mm). La conductivité thermique moyenne est d'environ 0,042 W/mK. Les matériaux les plus courants de ce groupe sont le silicate de calcium, les isolants biosourcés (fibres de bois, chanvre, ouate de cellulose et certains panneaux minéraux). Sauf exceptions ces systèmes nécessitent :

- Des mortiers de nivellation et de redistribution appropriés ;
- Des mortiers de colle et une finition intérieure assurant la connexion capillaire dans la construction de l'enveloppe.

Synthèse : La majorité des bâtiments analysés de l'étude de cas présentaient :

- Des murs extérieurs en briques enduits ou en pierre naturelle (principalement du grès) ;
- Des épaisseurs de murs variant entre 250 et 790 mm avec une moyenne d'environ 450 mm ;
- Une valeur moyenne de déperdition U d'environ 1,6 W/m²K pour les murs avant isolation. Le niveau moyen atteint après rénovation était de 0,46 W/m²K pour les cas publiés et de 0,33 W/m²K pour les cas RIBuild.

Situations critiques

- La plupart des constructions évaluées n'ont pas montré de situations critiques, plusieurs n'ont montré que des conditions initialement critiques (dépassement initial des valeurs seuils d'humidité relative ou de teneur en humidité du bois pendant la période de séchage, les premières années de la phase de suivi) ;
- Cinq cas étaient problématiques. Pour ces cas, un examen approfondi des matériaux d'isolation des projets critiques montre que les matériaux utilisés étaient présupposés adaptés :

- Une grande variété de panneaux d'isolation sous vide (PIV), de laine minérale, d'aérogel, de polyuréthane (pu) et de polystyrène expansé (EPS) ;
- Qu'aucun d'entre eux n'appartient au groupe des matériaux capillairement actifs et donc tolérants à la condensation.

Les résultats de l'étude mettent en exergue les points suivants

- Plus la construction est ouverte à la vapeur et capillairement active et plus l'humidité existante initiale est faible, et plus la période de séchage sera courte.

Elle s'est étendue sur au moins deux ou trois ans et dans de nombreux cas analysés, c'est plus long que la période de mesure.

Quatre des cinq endroits les plus septentrionaux des études de cas publiées ont été jugés à risque en raison des niveaux d'humidité mesurés élevés dans les murs. Les indicateurs de risques de dommages sont les suivants :

- Deux d'entre eux n'avaient pas de protection adéquate contre la pluie battante (pas de traitement ou de revêtement de surface extérieur, pas de débords de toit) ;
- Trois d'entre eux ont été exposés à des niveaux de précipitations élevés pendant la période de mesure ;
- Et tous ont montré une charge d'humidité additionnelle à l'intérieur du système d'isolation.

Le comportement au séchage de ces constructions est donc particulièrement intéressant et plus spécifiquement immédiatement après la rénovation, lors de l'utilisation du bâtiment, laquelle devrait favoriser le processus de séchage.

Les conditions aux limites intérieures étaient un autre aspect analysé des conditions aux limites : la plupart des bâtiments ont été utilisés à des fins résidentielles, mais certains aussi à des fins tertiaires (comme des bâtiments éducatifs et des immeubles de bureaux). Un nombre important d'entre eux a donc été utilisé de façon discontinue, ce qui a pu poser problème lors de la phase de séchage post-travaux.

Le rapport RIBuild propose comme base pour une rénovation durable de faire tout d'abord une inspection *in situ* poussée permettant de collecter en amont de la rénovation les informations suivantes :

- Collecte de données sur les conditions locales ;
- État du bâtiment et de ses caractéristiques d'utilisation.

Ces aspects sont importants pour concevoir la rénovation, notamment :

- L'épaisseur maximale de l'isolation à poser ;
- Le type d'isolation et le traitement des ponts thermique.

Pour l'évaluation et la conception détaillée d'une rénovation thermique, le rapport confirme que des paramètres et des données supplémentaires sur les matériaux existants et utilisés sont nécessaires pour permettre une prédition réaliste du comportement hygrothermique avec des modèles de simulation.

Un des points de la conclusion de ce rapport souligne également que les mesures sur place ne permettent qu'une caractérisation grossière des constructions (en raison de la complexité et des erreurs possibles de la mesure) et devraient être complétées par des tests en

laboratoire pour produire des données. Une condition préalable importante pour prendre les mesures correctives « justes » est la connaissance des données fondamentales des matériaux que sont :

- La densité apparente ;
- La conductivité thermique ;
- La résistance à la diffusion de vapeur ;
- Et la conductivité capillaire des matériaux des murs extérieur.

L'étude souligne clairement que la connaissance de ces paramètres est un minimum afin de permettre une simulation hygrothermique réaliste des performances futures des bâtiments rénovés.

B. Comparaison de différents systèmes ITI sur un même bâtiment

L'étude présentée par Robert Borsch-Laaks et Paul Simons dans la revue *Quadriga* a l'originalité de comparer plusieurs systèmes d'ITI sur un bâtiment unique, permettant ainsi que réduire au maximum les paramètres environnementaux et constructifs (Borsch-Laaks et Simons 2012).

Cette étude a été menée sur le long terme pour évaluer la teneur en humidité de structures en colombage rénovées avec une isolation thermique intérieure : la question débattue était de savoir quels systèmes d'isolation et quelles épaisseurs d'isolation sont compatibles avec ce système constructif historique. Cette expérience a été réalisée avec deux méthodes d'isolation fondamentalement différentes :

- Au rez-de-chaussée, un mélange humide liège-argile a été utilisé, puis recouvert d'enduit terre en plusieurs couches ;
- Le premier étage et le grenier ont été traités par une solution sèche (ossature en bois + OSB et panneaux de gypse), et isolé en ouate de cellulose insufflée.

Figure 68. Façade à colombage isolée par l'intérieur (Borsch-Laaks et Simons 2012, 13)



Dans cette étude, l'histoire de la construction et de ses dommages structurels est rappelée. Les rénovations avec les nouveaux IBS étudiés ainsi que les tests d'isolation et

d'étanchéités sont présentés. Les résultats de cette expérience de 4 ans et demi de mesures d'humidité du bois sur environ 50 localisations dans diverses zones du colombage soulignent différents points.

1. Deux systèmes d'isolation : similitudes et différences

Les deux systèmes d'isolation, bien que différents, présentent certaines similitudes. Dans les deux cas, l'isolation est rapportée côté intérieur avec le vide entre le revêtement intérieur et l'ancien mur support comblé d'isolant. Ainsi aucun enduit pour redresser le mur existant n'est nécessaire et une structure secondaire support du revêtement intérieur est installée (coffrage perdu en bois ajouré au RdC, OSB à l'étage). Dans les deux cas, des matériaux isolants « écologiques » sont utilisés : broyat de liège expansé et ouate de cellulose. En raison du désalignement des murs existants, des épaisseurs d'isolation comprises entre 10 et 18 cm ont été installées.

Néanmoins les différences entre les deux systèmes d'isolation sont significatives, puisqu'au rez-de-chaussée le béton isolant Cellco (Figure 69) est constituée d'un mélange de liège, de terre de diatomées et d'argile. Il est posé à l'état humide côté intérieur. Le coffrage est rempli à la main puis fermé hermétiquement). Sa valeur isolante est plutôt modeste en raison de la teneur élevée en minéraux ($\lambda = 0,08 \text{ W/mK}$).

Figure 69. Isolation intérieure avec béton végétal (terre allégée) au rez-de-chaussée



(Borsch-Laaks et Simons 2012) Photo : Gräflich + Monard Architekten, Lüder

Le système Cellco est traité sans membrane pare-vapeur, les couches d'enduit en terre sont destinées à réguler l'équilibre hydrique.

La solution des niveaux supérieurs, en bois, utilise de la ouate de cellulose, isolant hygroscopique ouvert à la diffusion de vapeur d'eau. Le panneau OSB utilisé est modérément résistant à la vapeur d'eau (Figure 70).

Figure 70. Panneau OSB intérieur comme pare-vapeur (modéré) et étanchéité à l'air également dans le grenier



(Borsch-Laaks et Simons 2012) Photo : Gräflich + Monard Architekten, Lüder

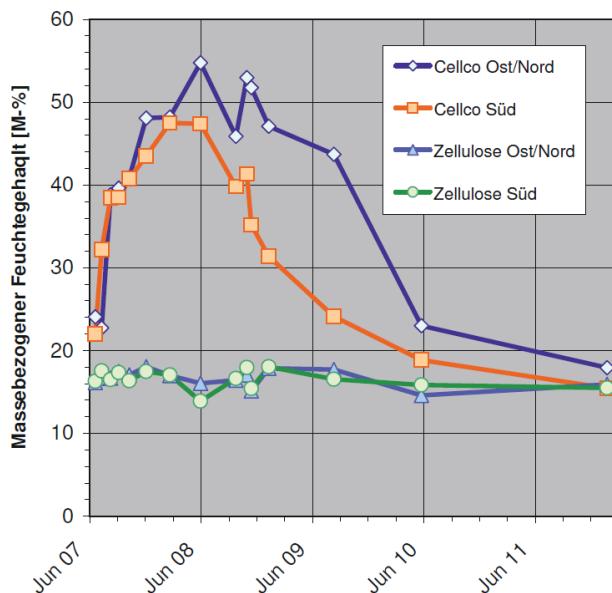
2. Résultats des mesures d'humidité

Un grand nombre de points de mesure ont été installés pour surveiller l'humidité du bois de la structure bois. Au cours de la phase de construction, 13 mesures ont été effectuées pour documenter la différence essentielle entre les deux systèmes d'isolation.

Le graphique ci-dessous (Figure 71) montre que l'introduction de l'argile isolante humide et des autres couches de terre crue appartenant au système (lesquelles ont hydrauliquement séparées), ont importée également d'importantes quantités d'humidité. Peu de temps après le traitement du matériau humide, la teneur en humidité des nouveaux éléments en bois (chênes) qui ont été installés, par ailleurs insuffisamment secs, a atteint des valeurs supérieures au degré de saturation des fibres.

Figure 71. Humidité du bois à l'intérieur de l'ossature, valeurs moyennes de 4 à 12 points de mesure chacune

Holzfeuchte Innenseite Fachwerk



(Borsch-Laaks et Simons 2012) Photo : Gräflich + Monard Architekten, Lüder

Les résultats des mesures montrent, que dans le béton végétal (terre + liège), l'humidité du bois reste au-dessus de la saturation en fibres pendant près de deux ans. Les mesures physiques, mais aussi la biologie ont fourni des données très parlantes : des fructifications de champignons sont apparues depuis le matériau isolant et d'un mycélium fongique gris-blanchâtre sur la surface du matériau Cellco (Figure 72), ainsi que des dégradation de peinture (Figure 73).

Figure 72. Corps fructifère et hyphes de champignons sur le béton végétal isolant.



(Borsch-Laaks et Simons 2012) Photo : Gräflich + Monard Architekten, Lüder

Figure 73. Écaillage sur une nouvelle peinture



(Borsch-Laaks et Simons 2012) Photo : Gräflich + Monard Architekten, Lüder

Un avis d'expert commandé par le fabricant a identifié dans le mycélium de surface un champignon composteur (dit de la pourriture) (*Trichurus spiralis Hasselbring*). Cependant, les auteurs stipulent que l'avis de l'expert n'atteste pas de structures fongiques résistantes à la sécheresse, pour les espèces trouvées dans les échantillons soumis (Borsch-Laaks et Simons 2012, 18). C'est-à-dire qu'une fois le mycélium séché, l'émergence de nouvelles fructifications à partir du mycélium existant semble peu probable. Sur un point, cependant, l'étude montre que l'affirmation selon laquelle les spores formées « ne peuvent germer qu'avec de l'eau liquide » et qu'elle nécessite la « formation d'un film d'eau à la surface de la couche limite surface/air » afin de permettre une nouvelle germination est techniquement incorrecte (Borsch-Laaks et Simons 2012, 18). Les auteurs précisent que pour la germination des champignons destructeurs du bois, une teneur en humidité proche de la saturation en fibres est tout à fait suffisante pour conduire à la germination (pour le bois d'épicéa, environ 26 %m-, pour le chêne d'environ 30 %m).

Ce n'est que par l'utilisation de dispositifs de séchage après l'application des revêtements intérieurs et l'usage ultérieur du bâtiment que le niveau d'humidité a pu être atteint à un niveau non critique. Les temps de séchage extrêmement longs ont conduit à retarder le processus de construction d'au moins six mois.

Ces observations faites, les conditions du chantier ne sont néanmoins pas précisées dans l'étude, ni si une ventilation naturelle (ouverture des fenêtres) scrupuleuse a été effectuée pour faciliter le séchage.

Par comparaison, nous relèverons qu'aucune moisissure n'a été observée avec l'isolation « sèche » en ouate de cellulose.

Cinq ans après le début des travaux et après deux ans d'utilisation et de chauffage du bâtiment, la teneur en eau s'est stabilisée à un niveau d'équilibre tolérable : l'inspection de suivi de janvier 2012 a montré que même lorsque la méthode humide était utilisée, les valeurs mesurées restent inférieures à 20 % massiques. Ceci est étayé par le fait que :

- La zone visible du colombage treillis a une faible absorption de la pluie motrice avec en même temps une certaine ouverture à la diffusion de vapeur d'eau ;
- De plus, la charge d'humidité interne doit être classée comme faible en raison du type d'utilisation et des systèmes de ventilation installés.

Cependant, la question reste de savoir si la solution d'une pose d'un mélange très humide est optimale, car plusieurs éléments limitants sont soulignés :

- Des temps de construction plus longs, voire très longs ;
- Une teneur élevée en humidité sur une longue période de temps.

Avant de refermer ce point, il nous paraît nécessaire de souligner que les mélanges dits « humides » sont divers, plus ou moins humides, plus ou moins denses et plus ou moins isolants. Les conclusions de cette étude, n'allant pas à ce niveau de détails, sont donc à prendre avec les réserves nécessaires.

3. Approche combinée (laboratoire et *in situ*) du risque en ITI avec IBS

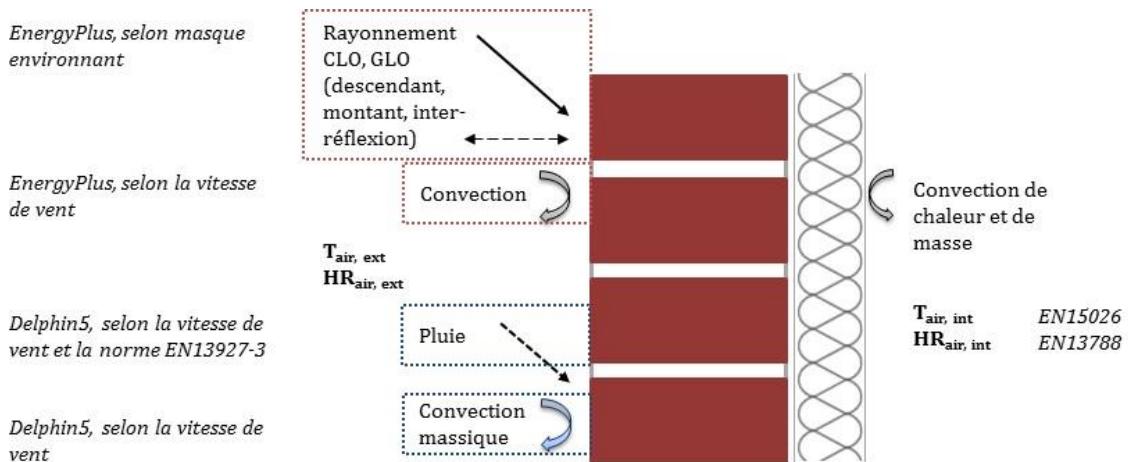
Dans le cadre d'une thèse doctorale (Claude 2018), Sophie Claude a mené une étude poussée du risque de croissance de moisissures d'une solution d'ITI en IBS (chaux-chanvre) pour évaluer les facteurs de risque en fonction :

- Du matériau d'isolation utilisé (chaux-chanvre ou laine minérale) ;
- De l'emplacement de la paroi dans l'environnement urbain ;
- De la typologie de paroi (pan de bois ou brique).

A. Descriptif de l'étude

Elle cherchait à comprendre à travers une étude à la fois expérimentale et numérique à quelle localisation (emplacement/profondeur dans la paroi) le risque de détérioration biologique pouvait survenir et, le cas échéant, sous quelles conditions. L'idée sous-jacente étant que l'identification des causes de ce risque permettrait de concevoir et mettre-en-œuvre une rénovation thermique pertinente sans compromettre la durabilité des parois (Figure 74).

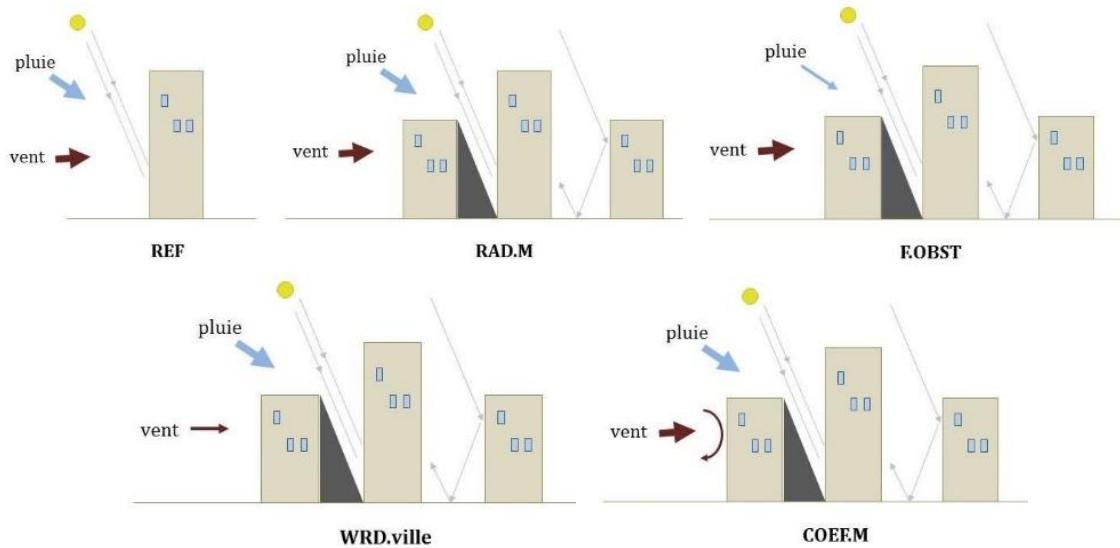
Figure 74. Conditions aux limites et outils utilisés en relation pour les définir et en modifier la magnitude



La thèse a montré par exemple que la morphologie urbaine influence principalement les radiations reçues par la paroi ainsi que le profil de vent à proximité de la paroi en modifiant ainsi le coefficient de convection (chaleur et massique) ainsi que la quantité d'eau de pluie reçue par la paroi. Claude a étudié plusieurs configurations (Figure 75), où les conditions aux limites extérieures ont été d'abord modifiées unes à unes, puis en les combinant :

- Une configuration de paroi de référence [REF] dans un environnement sans masque environnant, avec une rugosité du profil de vent « campagne » (données directement extraites du fichier météorologique extrapolé grâce à Météonorm) ;
- Une configuration de paroi [RAD.M] avec des masques environnements, modifiant uniquement les radiations reçues par la paroi, c'est-à-dire les rayonnements descendants GLO (grande longueur d'onde) et CLO (courte longueur d'onde), ainsi que les inter-réflexions ;
- Une configuration de paroi [F.OBST] avec un facteur d'obstruction de $O = 0.2$ pour la pluie battante, selon la norme EN 13927-3, correspondant à une distance entre 4 et 8 m entre la paroi et l'obstruction ;
- Deux configurations de parois soumises à différents profils de vent faisant varier uniquement la pluie battante et correspondant : soit à une réduction du profil de vent (rugosité centre-ville) [WDR_ville], soit à son accélération (facteur 3) [WDR_fact3] ;
- Une configuration [COEF.M] correspondant à l'utilisation d'un coefficient convectif massique adaptatif selon le profil de vent.

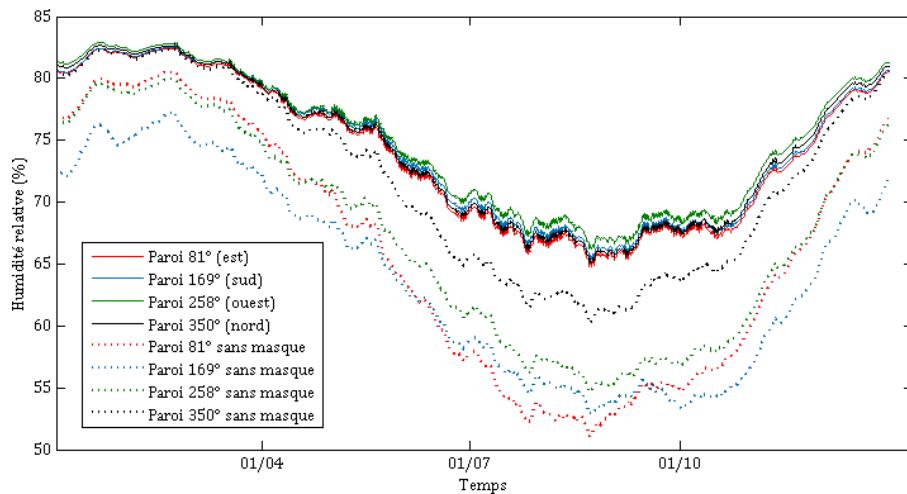
Figure 75. Schéma des différentes configurations étudiées (CLAUDE, 2018 : 129)



Exemples des résultats de simulation

Claude teste dans un premier temps, « les quatre orientations principales des murs en brique et en pan de bois sont testées avec et sans masque environnant pour observer l'influence des radiations reçues par la paroi » (Figure 76).

Figure 76. Humidité relative à l'interface (mur brique/chaux-chanvre), configurations avec et sans masque environnant (Claude 2018, 129)

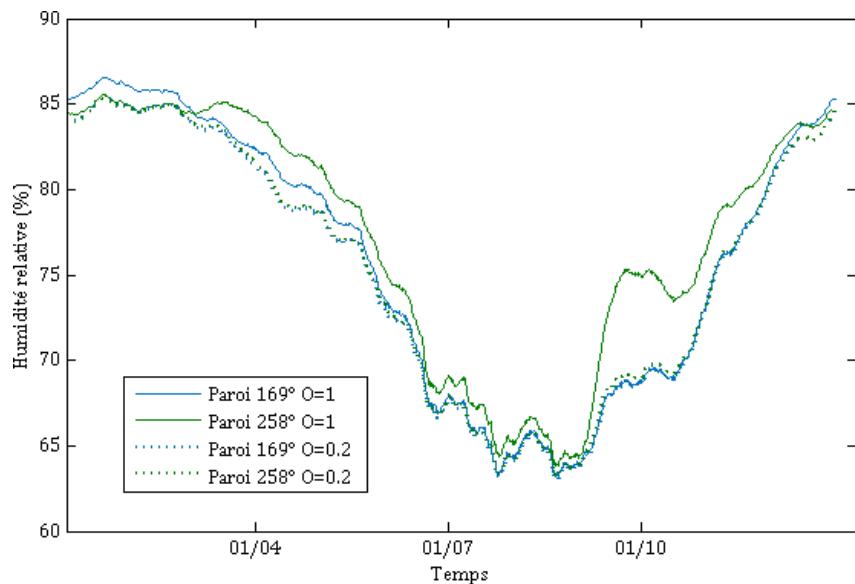


Elle constate que : « Pour chacune des orientations, on observe une différence claire entre la configuration avec masque et la configuration sans masque. Cette différence est particulièrement marquée pour l'orientation sud. La configuration de référence présente donc des résultats d'humidité relative plus faibles. »

Comparaison des configurations [RAD.M] et [F.OBST]

Dans une configuration « avec masque modifiant seulement les radiations solaires et dans cette même configuration en ajoutant un facteur d'obstruction de 0.2, représentant une diminution de la quantité de pluie battante atteignant la paroi » (Figure 77).

Figure 77. Humidité relative à l'interface (mur pan de bois/chaux-chanvre), configurations avec un facteur d'obstruction $O = 0.2$ et $O = 1$ selon la norme EN 13927-3 (Claude 2018)



Elle conclut que : « Lorsque le facteur d'obstruction est appliqué, les variations de l'humidité relative à l'interface sont quasiment similaires pour les deux orientations, sud et ouest, soulignant l'influence de la pluie sur le comportement hygrothermique de l'interface (pour ce mur à pan de bois). »

Dans ses simulations, Claude a également analysé la prise en compte de la vitesse du vent au sein du coefficient de convection massique (apport d'eau de pluie). Cette dernière va en effet :

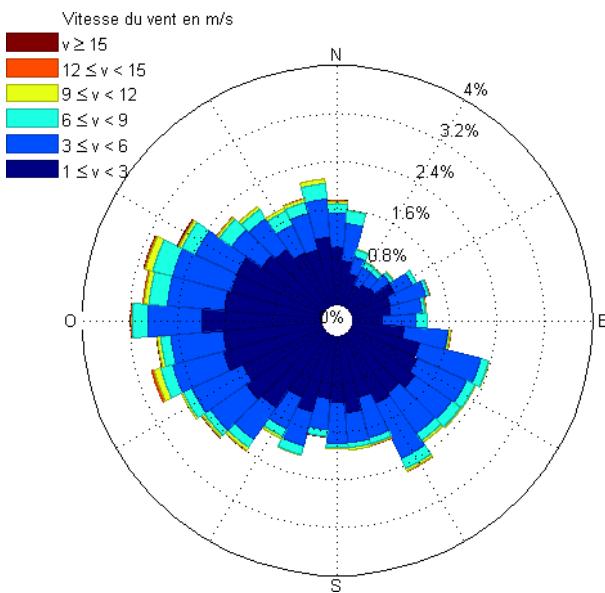
- Pour des vitesses élevées de vent :
 - Contribuer au séchage de la paroi sud ;
 - Mais ne pas contrebalancer l'augmentation de la quantité d'eau due à l'accentuation de l'effet du vent sur la pluie battante apportée ;
- Pour des vitesses de vents faibles :
 - L'influence de ce coefficient est négligeable. L'adaptation de l'humidité relative de l'air aux effets du milieu urbain est ici négligée, mais pour des rues très peu ventées et sans rayonnement solaire, l'humidité redescendra plus lentement après des événements pluvieux et pourrait d'autant plus ralentir le séchage de la paroi.

La rose des vents présentée ci-contre permet d'appréhender les différences de risque de pluie battante entre les parois des deux orientations sud et ouest pour des vitesses de vent (force 3⁷⁶) données.

En revanche, l'étude montre aussi que la réduction de la vitesse annule les différences entre les deux orientations, les deux parois sud et ouest recevant quasiment la même irradiation solaire, au vu du **Facteur Vue du Ciel** (FVC) très faible (Figure 78).

⁷⁶ Vent de force 3 : petite brise, soit 13 à 19 km/h, ou 7 à 10 nœuds.

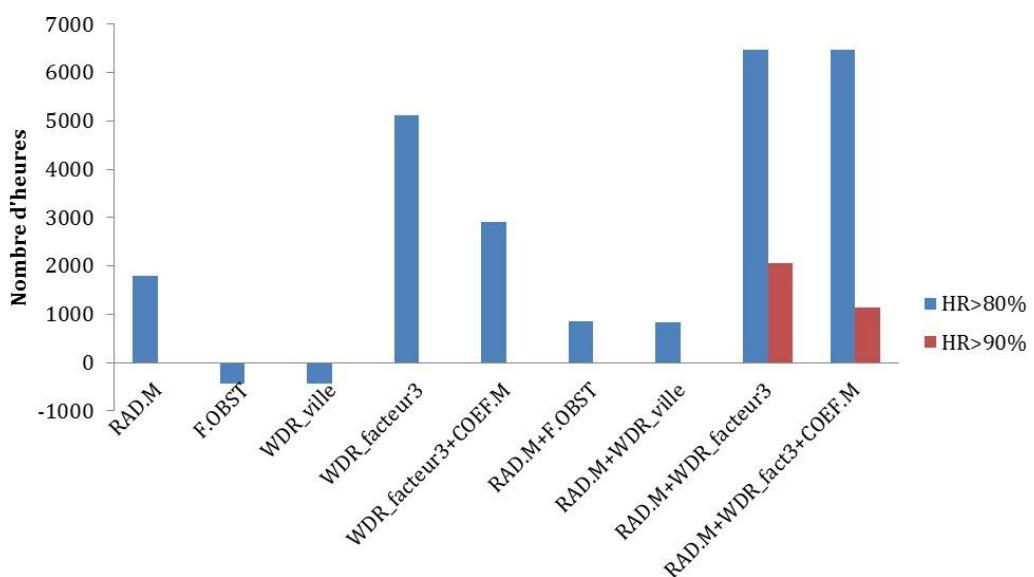
Figure 78. Rose des vents selon les données du fichier Météonorm pour Cahors



Comparaison de chacune des configurations pour la paroi Ouest

La Figure 79 regroupe les différentes configurations de paroi testées pour le mur pan de bois orientation 258° (ouest). Chaque paroi est comparée à la configuration de référence selon le nombre d'heures où l'humidité relative à l'interface dépasse 80 % (ou 90 % si le profil d'humidité atteint cette valeur).

Figure 79. Exemple de différence de nombre d'heures où HR>80 % entre la configuration de référence (sans masque) et différentes configurations pour la paroi 258° (Ouest) pour le mur en pan de bois (Claude 2018, 127)



Cet histogramme cumulé permet d'observer rapidement l'influence positive ou négative des différentes configurations. La morphologie urbaine, en modifiant l'accès au rayonnement solaire à un effet négatif, ou, au contraire en réduisant potentiellement la vitesse de vent et en créant des obstructions à la pluie battante peut avoir un effet positif. (Lequel ne contrebalançait pas dans ce cas d'étude les effets de la réduction de l'accès aux rayonnements solaires).

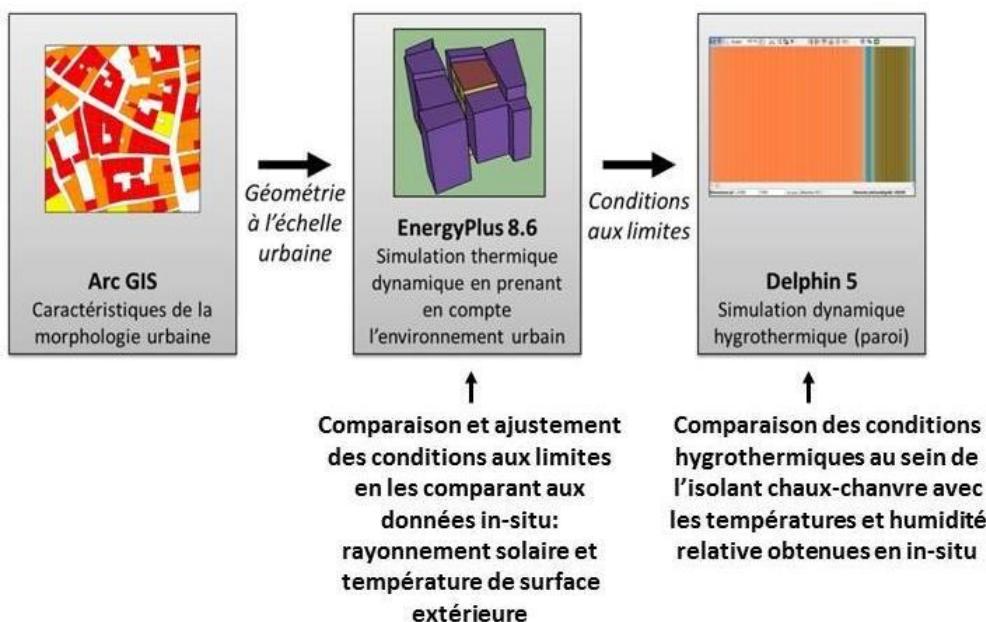
B. Aperçu des méthodes et résultats

Les résultats de cette étude ont permis plusieurs avancées significatives.

Tout d'abord, l'ensemble des grandeurs déterminées dans la partie expérimentale de cette thèse a permis d'enrichir les **bases de données** quant aux caractéristiques physiques des matériaux étudiés et de mieux comprendre les phénomènes de transfert et de stockage observés au cours de l'instrumentation *in-situ*. Ces données ont également été utilisées comme données d'entrées du modèle de transferts couplés utilisé dans la suite de l'étude.

Ensuite, la mise en place et la validation d'une méthodologie permettant de prendre en compte la **morphologie urbaine** (masques), au niveau des conditions aux limites appliquées dans les simulations hygrothermiques de la paroi (Figure 80).

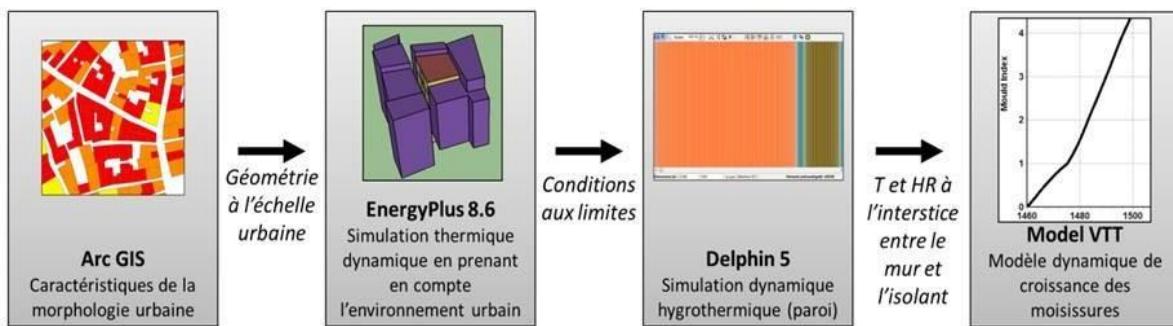
Figure 80. Méthodologie permettant la prise en compte de la morphologie urbaine dans Delphin 5⁷⁷



Ces premières étapes ont ensuite été complétées par une **étude de la durabilité de la paroi**, en examinant selon les indicateurs sélectionnés, le risque de développement de pathologies pour chaque paroi en utilisant un des modèles de modèle de croissance de moisissure existant. Le modèle VTT a été sélectionné car, selon l'auteure (Claude 2018, 136), il est le plus approprié pour simuler le développement de moisissures en régime dynamique (Figure 81).

⁷⁷ A noter ici que d'après l'auteure, Delphin 6 (logiciel HAM), permettrait notamment de simuler l'anisotropie des matériaux.

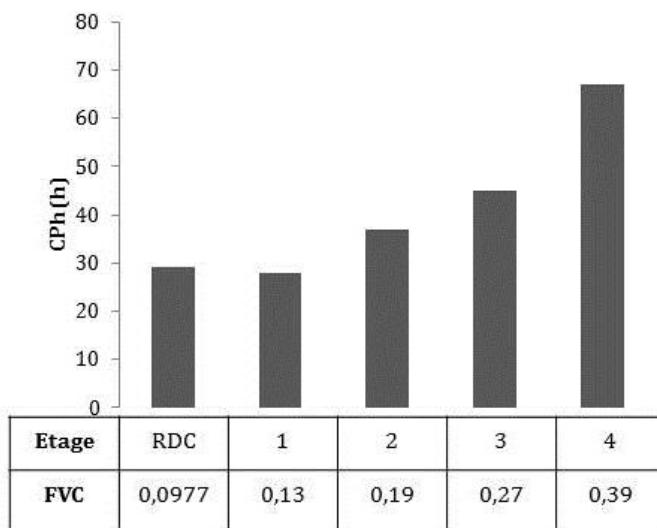
Figure 81. Méthodologie adoptée pour l'évaluation du risque de développement de pathologie des parois



Puis, la mise en avant d'une recherche et d'un **choix d'indicateurs pertinents** pour ce type d'analyse ont été définis. Les mêmes conditions étant appliquées pour chacun des bâtiments, l'unique variation provient des deux matériaux d'isolation choisis notamment pour leurs caractéristiques hygrothermiques très différentes (chaux-chanvre et laine minérale) :

- **Indicateurs de morphologie** : les conditions extérieures dépendant fortement de la morphologie urbaine dans ce cas d'étude, les différents indicateurs de morphologie suivants ont été sélectionnés :
 - Orientation, Ensoleillement, Irradiation, Facteur Vue du Ciel (FVC) et niveau de l'étage ;
 - La quantité annuelle de pluie battante normale à la paroi (Pluie exprimée en kg/m²) ;
 - Le potentiel de condensation de surface équivalent (CP) utilisé sous la forme CPh, qui représente le cumul des heures sur une année durant lesquelles CP est positif (c'est-à-dire la durée potentielle de condensation sur la surface extérieure d'une paroi). La raison invoquée pour le choix de cet indicateur est que, selon les zones climatiques, la pluie battante n'est pas forcément la source d'humidité principale en provenance de l'extérieur. Ainsi, pour des climats peu pluvieux comme Cahors (localisation du cas d'étude), la condensation de surface des parois n'est pas négligeable et survient quand la température de surface descend en dessous de la température de rosée, ce que l'étude de Claude a révélé durant les nuits de ciel clair : en fonction du facteur de vue du ciel de la paroi (déterminé par la morphologie urbaine), les rayonnements en provenance de la voûte céleste peuvent provoquer une diminution de la température de surface en dessous de celle de l'air. La convection et l'humidité de l'air extérieur favorisent alors le potentiel de condensation, de même que le bilan énergétique de la surface qui est déterminé par les caractéristiques du matériau (capacité thermique, absorptivité, émissivité) (Claude 2018, 136-37). La figure ci-dessous illustre l'évolution de CPh pour une façade orientée Nord selon l'étage et donc selon le FVC : le CPh augmente significativement avec l'augmentation du FVC pour cette orientation (Figure 82).

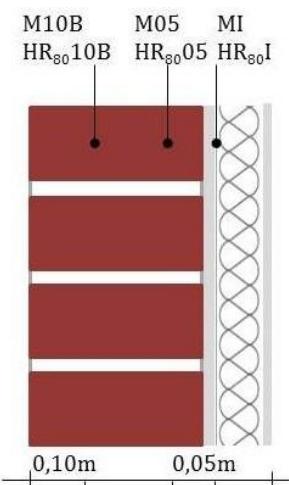
Figure 82. Durée potentielle de condensation annuelle selon l'étage et le FVC (orientation Nord)
 (Claude 2018) : 137



- **Indicateurs de risque de pathologie :** index de moisissure M calculé par le modèle VTT, lequel comprend un système d'évaluation qui permet par ailleurs de distinguer les risques de condensation des surfaces en contact avec l'ambiance intérieure de ceux à l'interface entre deux matériaux, sans contact avec l'air extérieur. Comme l'explique notamment De Ligne dans son travail sur l'analyse spatio-temporelle des cinétiques de croissance des moisissures (De Ligne, Vidal-Diez De Ulzurrun, *et al.* 2019), ces dernières varient selon de nombreux facteurs, dont la convection, l'apport en oxygène, mais aussi l'activité de l'eau, l'exposition aux UV (qui est léthale pour certaines micro-organismes), etc. Les surfaces extérieures et les interfaces présentent donc des cinétiques de croissance différentes ;
- L'indicateur du nombre de jours au cours de la 3^e année de **simulation où l'humidité relative** dépasse 80 % afin de comparer les parois entre elles. « La norme ASHRAE 160⁷⁸ préconise d'éviter plus de 30 jours à une HR > 80 % (avec 5 °C < T < 40 °C) pour éviter une dégradation microbiologique, mais une étude récente montre que ce critère est en réalité trop sévère (Glass *et al.* 2017) ». À ce sujet, en Allemagne la durée préconisée est de 5 années ;
- **L'indicateur d'accumulation d'eau année après année** au sein de la paroi afin d'évaluer le risque de pathologie (dans cette étude, aucune paroi étudiée n'ayant présenté d'accumulation, cet indicateur a été écarté [Figure 83]).

⁷⁸ <https://www.ashrae.org/>

Figure 83. Localisation des indicateurs de pathologies au sein de la paroi brique sans contact direct avec l'air extérieur (Claude 2018, 139)



Dénomination	Localisation	Risque
I (M, HR)	Interface entre l'isolant et le mur	Risque à l'interface
05 (M, HR)	5 cm de profondeur dans la brique côté isolant	Risque pour les poutres encastrées
10B (M, HR)	10cm de profondeur dans la brique côté extérieur	Pénétration significative de l'humidité dans la brique

Précision donnée par l'auteure : pour la configuration pan de bois, les localisations 10B et 05 sont confondues. Les épaisseurs entre l'isolant chaux-chanvre et l'isolant laine minérale varient afin d'avoir la même résistance thermique pour les deux configurations.

Localisation M05 a ceci d'intéressant qu'elle correspond à l'emplacement de l'appui des nez de poutres en bois des planchers encastrés. Il s'agit d'un sujet suscitant l'intérêt des recherches (Pär Johansson *et al.* 2014 ; Mets et Tilmans 2020 ; E. Vereecken et Roels 2021 ; Evy Vereecken et Roels 2019 ; Zhou, Derome, et Cameliet 2022) car des postures diverses existent :

- Traitement ou non du pont thermique dans l'épaisseur des planchers anciens ;
- Comparaison de la robustesse des dispositifs d'ITI :
 - * Bloquant la condensation (étanchéité à l'air forte utilisant des pare-vapeur ou des isolants fermés à la vapeur) ;
 - * Limitant la condensation (freine-vapeur) ;
 - * Ou tolérant la condensation (système capillaire actif).
- En rapport avec l'hypothèse d'une étanchéité à l'air imparfaite et le risque de transport d'humidité par convection sur le pourtour des poutres.

Ensuite, l'étude a permis d'identifier des variables représentatives pour connaître le **niveau de corrélation des indicateurs entre eux** et d'évaluer l'influence des différentes conditions extérieures sur le risque de développement de moisissures. Cette méthode liant les résultats de simulation et ceux d'une analyse à composante principales (ACP) a permis :

- De mieux comprendre les phénomènes en jeu sur chaque **typologie de paroi** selon tous les facteurs et indicateurs sélectionnés : l'étude ACP réalisée pour appréhender la corrélation entre les indicateurs de risque de pathologie au sein de la paroi (M1, M05 et M10) et ceux décrivant les conditions extérieures pour les différentes typologies de parois. L'étude de la corrélation entre les indicateurs de risque au sein de la paroi et les conditions extérieures permet également d'évaluer le degré d'incertitude de l'indicateur de risque de pathologie ;
- Et de pouvoir **extrapoler les résultats** obtenus sur un îlot à l'ensemble du centre ancien de Cahors.

Ainsi que le souligne l'auteure, « cette étude a été réalisée pour un cas précis, il est donc intéressant d'avoir une vision plus globale de l'impact de la morphologie urbaine sur le comportement hygrothermique de la paroi. De plus, seule la variation d'humidité relative est ici observée. Sachant que la modification de l'hygrométrie de la paroi peut avoir des conséquences sur la durabilité de la paroi, une étude en différents points de la paroi ainsi que des indicateurs de durabilité » doit approfondir ces premiers travaux (Claude 2018, 128).

Sophie Claude prolonge donc ses recherches dans un 6^e chapitre de sa thèse en y intégrant plus encore les facteurs d'ensoleillement, d'irradiation solaire et de typologie de paroi (Claude 2018, 140) :

- Les conditions extérieures ne présentent pas le même degré d'incertitude : la représentativité de l'irradiation solaire sur les parois en pan de bois a pu être vérifiée à l'échelle de la paroi, contrairement à celle de la pluie battante
- Influence non négligeable de la morphologie urbaine sur la réponse hygrothermique des parois.
 - Exposition au rayonnement solaire et orientation des façades :
 - Concernant les façades Est, Sud et Ouest (soumises au rayonnement solaire) : les parois ayant des FVC forts présentent moins de risque de pathologie ; inversement, celles en ayant un faible présentent quasi systématiquement un risque de pathologie plus élevé ;
 - Les façades nord n'étant pas soumises au rayonnement solaire, le comportement hygrothermique diffère : l'augmentation du FVC implique une augmentation du potentiel de condensation (correspondant à une autre source d'humidité extérieure) ;
 - Influence de l'accélération ou de la réduction de la vitesse du vent selon la morphologie urbaine
 - Pour les façades très exposées à la pluie battante : le milieu urbain peut minorer ce facteur et au contraire accentuer celui de la condensation ;
 - Pour des vitesses de vent importantes, le coefficient de convection massique permet de diminuer le taux d'humidité dans la paroi en accélérant son séchage mais ne contrebalance pas l'effet de l'augmentation de la quantité de pluie accumulée par la paroi.

Mettant de côté le caractère très localisé de l'étude, plusieurs observations peuvent être reprises du travail de Claude :

- **Le facteur de pénétration d'humidité** : l'épaisseur de la paroi est un facteur clé. Les parois en pan de bois, plus fines, sont donc également plus sensibles aux conditions aux limites extérieures. Par exemple :
 - Forte corrélation entre l'indicateur M5 et la quantité de pluie pour la typologie en pan de bois et les deux configurations d'ITI laine minérale et chaux-chanvre ;
 - Forte similarité de comportement pour les deux configurations (laine minérale et chaux-chanvre) pour la paroi en brique :
 - Plus l'analyse s'éloigne du côté extérieur de la paroi, moins la pluie apparaît comme le paramètre définissant le risque de pathologies ;
 - Plus l'indicateur est situé coté extérieur de la paroi, plus le comportement était sensible aux variations d'humidité extérieure : potentiel de condensation, pluie battante) plutôt qu'aux apports

intérieurs. Les indicateurs M10B et M05 sont donc plus sujets aux incertitudes concernant la quantité de pluie battante atteignant la paroi.

- Le comportement hygrothermique diffère entre les deux typologies de parois.
 - Typologie brique : aucun risque de développement de moisissures à l'interface mur support/isolant n'est détecté.
 - Forte corrélation entre le comportement hygrothermique à l'interface et le FVC, seule l'orientation Nord fait figure d'exception ;
 - Pour un FVC faible, la durée où l'humidité relative sera supérieure à 80 % sera plus importante ;
 - *Rq : l'épaisseur de laine minérale utilisée dans les simulations est très faible et peu représentative de la réalité, donc une épaisseur plus importante diminuera la température à l'interface et pourra augmenter le risque de condensations.*
 - Typologie pan de bois : l'isolation en laine minérale génère un risque élevé de développement de moisissures à l'interface pour chacune des orientations étudiées.
 - Seules les parois Sud possédant un FVC supérieur à 0.32 présentent des résultats satisfaisants avec ce matériau (sensibilité différente des parois aux sollicitations extérieures selon leur orientation) ;
 - Parois Sud : particulièrement sensibles aux effets de masque environnant concernant le rayonnement solaire. Ce sont elles qui auront des réponses hygrothermiques les plus différentes selon le FVC ;
 - Ouest sont également fragiles, cette fragilité est principalement due à la pluie battante plus importante sur cette orientation ;
 - La fragilité des parois Nord provient principalement du potentiel de condensation, car à l'inverse des parois Sud, les derniers étages peuvent être également sensibles à cause du rayonnement plus important de la voûte céleste.
 - Une différence nette entre les deux matériaux isolants se dessine donc pour la typologie pan de bois. Le fort potentiel hygroscopique du chaux-chanvre permet de stocker une quantité importante d'humidité sans que cette humidité ne transite vers l'interface, au contraire de la laine minérale.
 - Radiations reçues par la paroi : les masques modifient la quantité de radiations reçue par la paroi. Dans ce cas précis, les radiations directes et diffuses descendantes sont diminuées et l'étroitesse de la rue supprime quasiment toutes les inter-réflexions en provenance du sol, supprimant également une large part des inter-réflexions. La réduction de l'accès aux rayonnements solaires augmente l'humidité relative à l'interface ;
- **La pluie battante** est l'une des sources d'humidité principale. La quantité d'eau atteignant la paroi va dépendre des coefficients d'obstruction et d'exposition au vent qui peuvent tous deux être définis en fonction de la morphologie urbaine.
- Mais **la pluie battante n'est pas forcément toujours la source d'humidité principale** en provenance de l'extérieur pour les zones peu pluvieuses. La condensation de surface ne doit pas être négligée : les nuits de ciel clair les rayonnements en provenance de la voûte céleste peuvent provoquer une diminution de la température de surface de la paroi en-dessous de celle de l'air jusqu'à atteindre celle du point de rosée. Les phénomènes de convection et l'humidité de l'air jouent donc un rôle clé dans le potentiel de condensation surfacique.

Aucune des parois étudiées n'a présenté d'accumulation d'humidité d'une année sur l'autre. Cela est dû aux spécificités du climat de Cahors connaissant des étés chauds, voire caniculaires ces dernières années, faisant redescendre l'humidité relative au cours de cette période.

S'il est important de bien renseigner les caractéristiques physiques des matériaux, cette étude montre que les conditions aux limites extérieures doivent être soigneusement choisies lors des simulations car elles modifient fortement le comportement hygrothermique de l'interface entre le mur et l'isolant (et ce, particulièrement dans le cas de paroi fines en pan de bois). De même, la définition des conditions intérieures est cruciale car elles impactent fortement la réponse hygrothermique des parois, qui peut fortement différer selon :

- L'emplacement et l'orientation du logement (étage, accès au rayonnement solaire notamment via les parois vitrées et donc selon son positionnement dans la morphologie urbaine) ;
- Et bien sûr, les usages des occupants.

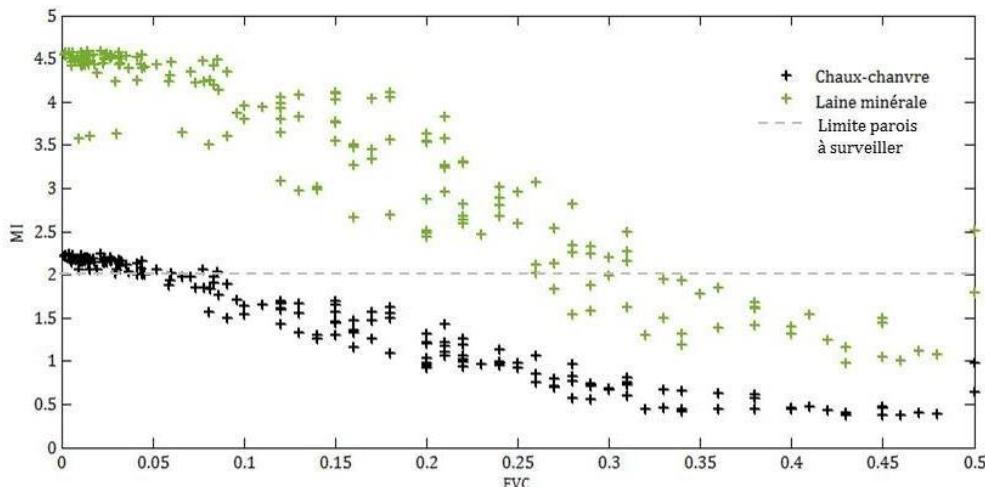
L'analyse en composantes principales (ACP) a mis en avant l'existence de groupements d'individus en fonction de l'orientation pour chaque configuration et indicateur de risques de pathologie. Étude des différents facteurs de risque en fonction des quatre orientations principales et de la typologie de la paroi.

Étude du facteur de risque à l'interface. Mi

à l'interface, la typologie pan de bois est plus sujette au développement de moisissures que la typologie brique.

- **Typologie pan de bois :**
 - La configuration avec de la laine minérale présente un risque accru par rapport à celle avec l'isolant chaux-chanvre et ce, quelque-soit l'orientation étudiée ;
 - La majorité des parois sont « à surveiller » ou « non acceptable » alors que pour la configuration chaux-chanvre, les parois Est ne présentent aucun risque, tout comme la majorité des parois Nord.
- **Typologie brique :**
 - L'ajout d'un isolant influence la réponse hygrothermique mais ne présente pas de risques de développement de moisissures ;
 - La configuration laine minérale présente néanmoins un comportement hygrothermique moins favorable qu'avec la configuration chaux-chanvre : elle atteint des humidités relatives plus élevées pendant les mois d'hiver et des variations journalières plus importantes que celle du CC ;
 - La plaque de plâtre appliquée en finition joue un rôle tampon mais n'est pas suffisante pour freiner la progression de l'humidité jusqu'à l'interface, car la laine minérale est très perméable à l'air : le risque de développement de moisissures à l'interface pour des murs traditionnels en bois orientés nord augmente avec la diminution de la valeur du coefficient Sd pour une isolation en laine minérale (Claude 2018, 148).
- **Orientations :**
 - Sud : une corrélation nette entre le facteur de risque et le FVC apparaît. Pour un FVC supérieur à 0.32, aucune paroi ne présente de risque de développement de moisissures et ce, pour les deux isolants testés (mais la configuration Chaux-Chanvre reste deux fois moins exposée) (Figure 84).

Figure 84. Indicateur M_i en fonction du FVC pour les parois pan de bois orientées Sud



(Claude 2018, 148)

- Nord : le comportement hygrothermique diffère.
 - Parois à FVC élevé (plus exposées aux radiations de la voûte céleste) : leur potentiel de condensation augmente ;
 - FVC fixé : les parois ayant un CP plus élevé auront également un risque de développement de moisissures plus important ;
 - L'utilisation de la brique apparente en façades diminue le risque de condensation de surface à cause de son absorptivité et de sa capacité thermique élevées ;
 - Façades Nord ayant un FVC élevé (derniers étages ou rues dont le rapport d'aspect est faible) : elles sont exposées aux rayonnements de la voûte céleste mais peu au rayonnement solaire. Elles ne peuvent donc pas compenser la perte thermique due aux rayonnements de la voûte céleste par temps clair en accumulant de la chaleur solaire (à l'inverse des autres orientations) et sont plus sujettes à la condensation de surface.
- Ouest :
 - Au-delà d'un FVC supérieur à 0.25, certaines parois ne présentent aucun risque ;
 - Mais pour un FVC fixé, le risque augmente avec le Potentiel de Condensation.
- Est :
 - Le CP ne semble pas avoir d'influence ;
 - La réponse hygrothermique diffère nettement selon la quantité de pluie reçue : pour des FVC élevés aucune paroi n'est considérée comme « non acceptable ».

Étude du facteur de risque en M05 et M10 (Figure 85)

- Pour la typologie pan de bois : étant donné l'épaisseur plus faible de ce type de paroi, les indicateurs M05 et M10B sont confondus.
- Pour la typologie brique : pour comparer les parois entre elles l'indicateur HR80 est utilisé (plutôt que l'indicateur M), car aucun facteur de risque n'apparaît avec l'utilisation de l'indicateur M, celui-ci ne dépassant pas la valeur de 1 :

- Une pénétration significative d'humidité dans la brique pour les deux configurations ;
- Pour des murs épais, les conditions aux limites extérieures déterminent davantage la teneur en eau à cette localisation dans le mur que les propriétés hygrométriques de l'isolant ;

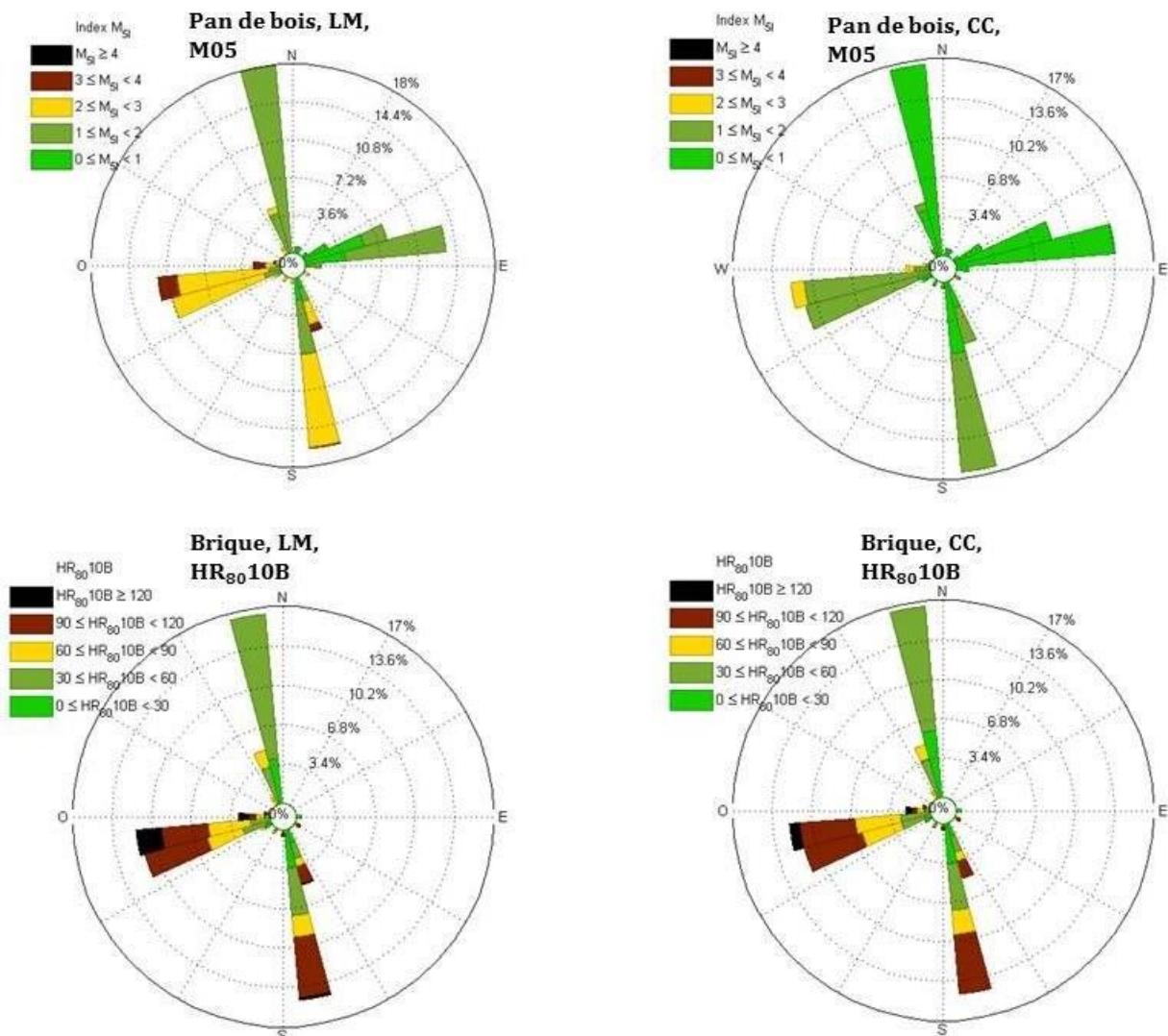
Une humidité relative plus importante pour les parois Ouest et Sud, la quantité de pluie reçue par ces parois est plus importante

- Figure 86) ;

Un lien entre le FVC et l'humidité relative est de nouveau mis en avant : le nombre d'heures où l'humidité relative dépasse 80 % augmente sensiblement avec la diminution du FVC pour les façades sud et ouest

- Figure 87).

Figure 85. Représentation des facteurs de risque à 5 cm de l'isolant et à 10 cm de l'extérieur
(Claude 2018, 150)



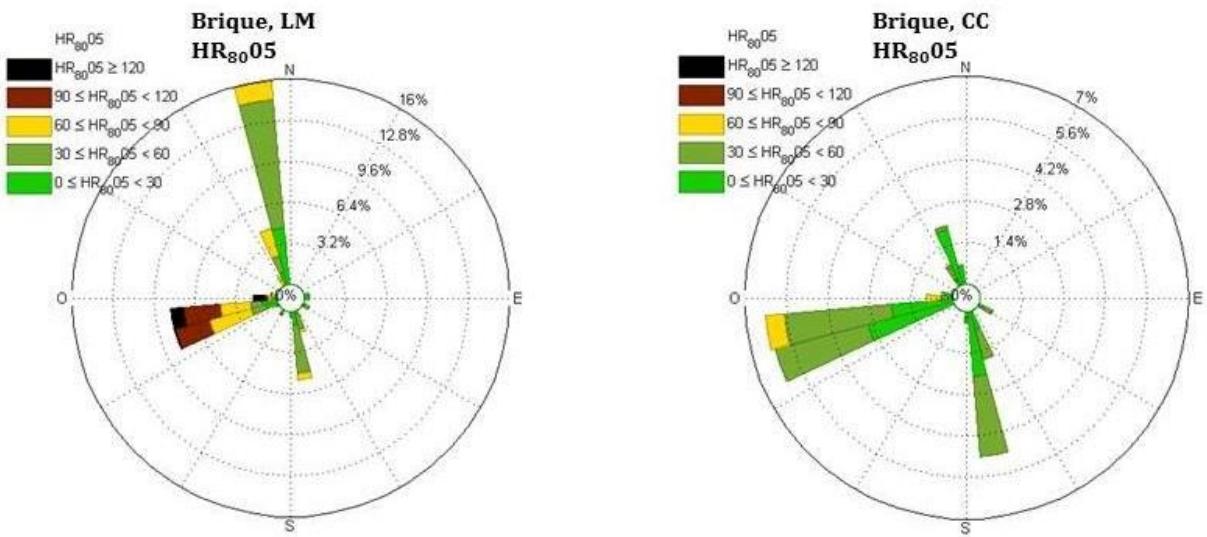
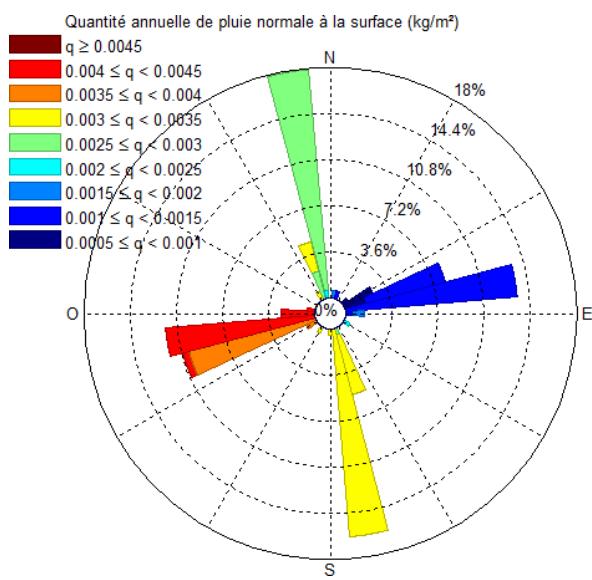


Figure 86. Quantité de pluie normale à la paroi selon l'orientation en nombres de parois cumulées (Claude 2018, 151)



- Risque pour les poutres encastrées :
 - L'étude réalisée à travers les indicateurs M05 et HR8005 met en exergue un risque plus important pour la configuration laine minérale ;
 - Pour la configuration chaux-chanvre, le risque pour les poutres encastrées apparaît comme faible voire inexistant pour la majorité des parois ;
 - Nord : cette orientation présente un risque qui augmente avec le potentiel de condensation (comportement similaire avec celui observé à l'interface) ;
 - Sud : au-delà d'un FVC = 0.2, le risque pour les poutres encastrées est négligeable pour les deux configurations (Figure 88)
 - Ouest : risque est présent quelque-soit le FVC pour la configuration laine-minérale.

Figure 87. HR₈₀10B en fonction du FVC pour la typologie brique (Claude 2018, 151)

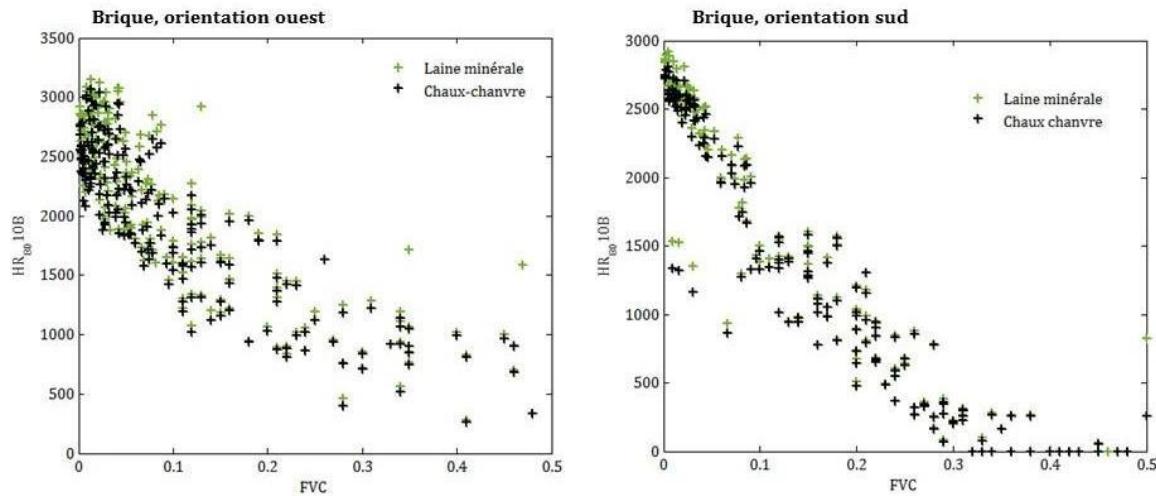
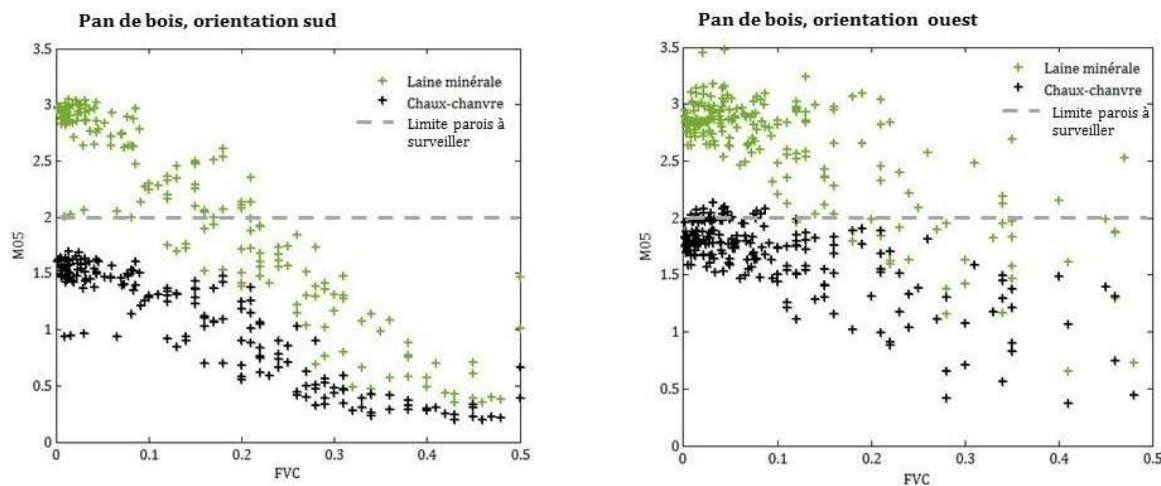


Figure 88. M05 en fonction du FVC pour les orientations sud et ouest, typologie pan de bois



(Claude 2018, 152)

4. Approche orientée IBS

Les approches spécifiques destinées aux isolants biosourcés ont testé la résistance aux moisissures et permis le développement d'outils de simulation hygrothermiques nouveaux. Des études françaises (Lamoulie 2015 ; Le Bayon 2015 ; Tobon Monroy 2020) notamment, ont donné naissance à un protocole d'évaluation de la résistance fongique des IBS destinés à l'isolation thermique par l'intérieur.

A. Classes d'emploi et durabilité d'isolants biosourcés

L'étude sur la classe d'emploi et la durabilité d'isolants biosourcés menée par J. Lamoulie (Lamoulie 2015) porte sur le développement fongique des isolants en fibres de bois et des simulations numériques sous WUFI® avec plusieurs configurations constructives. Elle constituait un pas significatif en France dans la mise en évidence de l'influence de la

température dans le développement fongique et non, uniquement, celle de l'humidité relative. Elle a permis de faire évoluer le calcul des risques hygrothermiques et la durabilité des isolants et a conduit à une méthode d'essai innovante pour évaluer la résistance des matériaux d'isolation biosourcés aux moisissures.

Ces travaux, expérimentés sur un matériau en fibres de bois non-traité, ont permis de définir des « classes d'emploi » et de valider des isolants biosourcés sans biocide au niveau des avis techniques (CSTB). En analysant les résultats des calculs et en raison de la précision des tests biologiques effectués, deux classes d'utilisation ont ainsi été déterminées :

- Une classe « sèche » avec une humidité relative dans les matériaux isolants toujours inférieure à 85 % au cours de l'année (ou supérieure à 85 % mais pas au-delà de 48 h) ;
- Une classe « humide » avec une humidité relative dans les matériaux isolants pouvant être supérieure à 85 % durant plus de 48 h par an.

Sur la base du « pire scénario » possible pour chaque classe d'usage et des résultats du dispositif expérimental, deux conditions d'essais en laboratoire ont été proposées pour évaluer la résistance des matériaux biosourcés aux moisissures :

- 85 % HR et 26 °C pour évaluer le matériau isolant biosourcé destiné à la « classe d'utilisation sèche » ;
- 95 % HR et 26 °C pour évaluer le matériau isolant biosourcé destiné à la « classe d'utilisation humide ».

Le choix des 26 °C pour l'essai relève aussi du « scénario du pire cas », puisqu'il prend en compte à la fois une température de croissance fongique considérée comme optimale selon les résultats de l'expérimentation menée et l'état de l'art effectué pour celle-ci, ainsi qu'une température la plus élevée obtenue à partir des conditions hygrothermiques de référence en situation réelle dans un bâtiment (Lamoulie 2015, 154).

Après 4 semaines, l'étude a mis en évidence ou confirmé plusieurs points d'importance :

- Entre 20 °C et 28 °C, avec une humidité relative constante, la température n'a pas eu d'impact sur le nombre d'unités fongiques ;
- À 12 °C et 95 % HR, la croissance de la moisissure a été réduite par rapport à 20 °C ou 28 °C et 95 % HR ;
- La charge fongique finale à 20 °C ($3,95 \log_{10} \text{UFC/cm}^2$) et à 28 °C ($4,00 \log_{10} \text{UFC/cm}^2$) à 95 % HR était supérieure à celle initiale ($3,65 \log_{10} \text{UFC/cm}^2$) ;
- Dont deux résultats-clés :
 - Un taux d'humidité relative de 95 % conduit à un développement de moisissure sur ce matériau ;
 - Entre 20 °C et 28 °C, avec une humidité relative comprise entre 70 % et 85 %, la croissance de la moisissure a été considérablement réduite (entre 1,47 et 2,02 $\log_{10} \text{UFC/cm}^2$) par rapport à la charge initiale.

Ces résultats indiquent que la moisissure s'est développée avec plus de difficultés dans le matériau en fibres de bois testé lorsqu'il a été exposé de 70 % à 85 % d'humidité relative.

Lors d'une exposition à 95 % d'humidité relative, la teneur en humidité de l'isolant en fibres de bois se situait entre 19,8 % et 21,5. La teneur en humidité était de 13,6 % à une HR de 85 % et entre 10,7 et 10,9 % pour une HR de 70 %. A 95 % HR et entre 20 °C à 28 °C, la moisissure s'est développée sur ce matériau d'essai en fibres de bois, alors qu'elle n'a pas augmenté à 70 ou 85 % HR./

L'un des objectifs du projet était de déterminer des classes d'utilisation spécifiques pour les matériaux d'isolation biosourcés. Les résultats attestent qu'il n'est pas à ce stade possible de déterminer des classes étroites en raison du paramètre de l'HR. Cependant, pour ce matériau, le risque de croissance fongique est nul lorsque l'HR ne dépasse pas 85 % (dans la plage de températures testée) ou lorsque la température ne dépasse pas 12 °C (dans la plage d'humidité relative testée).

En extrapolant ce modèle à plus 300 configurations, les auteurs ont produit ainsi plus de 1 500 séries de mesures sur la base du « pire scénario », confirmant les résultats des travaux sur le pin et l'épinette (Hukka et Viitanen 1999). Les résultats n'ont montré aucun effet de la plage de température de 20 °C à 28 °C sur la croissance des moisissures. D'autre part, à 12 °C, la température a réduit la croissance fongique. La bibliographie indique une croissance optimale des moisissures entre 22 °C et 35 °C (Ayerst, 1966 ; Panasenko, 1967, Carpenter, 1972, Botton *et al.* 1990).

Les études de Le Bayon (Le Bayon 2015) étendent ces conclusions à d'autres MBS : cellulose en vrac, fibres de bois, chanvre, lin et paille, tout en tenant compte de l'utilisation finale et des recommandations des fabricants. D'autres expérimentations pourraient en outre introduire d'autres classes d'utilisation et s'étendre à d'autres zones climatiques.

Si Le Bayon indique certaines limites à ses résultats comme le caractère fongistatique de matériaux et la modification de l'activité de l'eau (a_w) sur la croissance fongique, d'autres peuvent être avancées.

Notamment que si l'échantillon de matériau dépasse le seuil critique de 85 % HR pendant plus de 48 h, alors il faut que l'isolant passe l'essai à 95 % d'HR. Cela durcit très significativement l'essai et très souvent, ce seuil ne peut être passé que pour un matériau traité avec un biocide. Cela nous invite à exprimer plusieurs éléments :

- La capacité de séchage après les 48 h, qui peut être très rapide pour la plupart des biosourcés (comportement capillaire, forte ouverte à la vapeur), n'est pas mise en avant ;
- Le constat qu'un nombre beaucoup plus réduit de matériaux biosourcés pourront passer le test sans biocide ;
- Insidieusement, le fait que les matériaux contiennent des biocides leur permettant de dépasser des conditions extrêmes (+95 HR), engendre indirectement la diffusion de systèmes constructifs qui ne doivent plus nécessairement être conçus de manière pérennes (car ils acceptent et génèrent potentiellement des conditions trop humides pouvant favoriser des zones de risques).

De plus, concernant la question du temps d'exposition des échantillons aux conditions favorables à la croissance fongique, sont à prendre en considération :

- In situ : les conditions, qui tendent à varier plus fréquemment dans un bâtiment que lors des protocoles de test ;
- En simulation, les temps d'exposition qui sont plus strictement contrôlés ;
- La durée des essais. Comme le souligne d'autres études (Delannoy 2018 ; Pernilla Johansson, Svensson, et Ekstrand-Tobin 2013 ; P. Johansson, Lång, et Capener 2021) ;
- L'inertie hydrique des matériaux ;
- Des durées des tests sans doute trop courtes ;
- L'impact sur la précision des modèles.

Enfin, ces conditions ont été déterminées par la simulation en analysant les résultats de la troisième année. En Allemagne, les études regardent plutôt 3 à 5 ans après la date de fin des travaux (Scheiding et Plaschkies 2020b). En effet, dans un système constructif considéré comme « pérenne », les 3 premières années peuvent être critiques (les hivers notamment), par exemple le temps que l'excès d'humidité apportée durant le chantier puisse être redistribuée et évacuée. À terme, malgré les excès enregistrés durant les 3 premières années, les niveaux d'humidité peuvent se trouver ensuite à l'équilibre avec l'environnement intérieur. De fait, des moisissures peuvent commencer à apparaître derrière le parement durant cette période, ensuite disparaître durant les fortes périodes de séchage (en été notamment), puis s'arrêter définitivement avec le rééquilibrage de la paroi. Ainsi, lorsque des simulations sont réalisées, les 2-3 premières années peuvent tolérer des excès d'humidité si un équilibre est ensuite lentement atteint (pas plus de 2 % d'écart d'HR entre les deux dernières années de simulation (CSTB 2021)). Il nous semble important de comparer ces données sur une tendance sur 10 ans et regarder si le taux d'humidité augmente ou diminue.

De plus, il est convenu en France dans les simulations (SIMHUBAT, 2021) de ne considérer que les 5 mm les plus critiques d'une interface, d'une surface ou d'une zone d'un matériau à fort gradient hydrique, contre 10 mm en Allemagne.

Le protocole d'évaluation de la résistance vis-à-vis des moisissures, issu des travaux de (Lamoulie 2015 ; Le Bayon 2015) concerne tous les produits isolants thermiques. Il est établi selon la « Méthode isolants moisissures FCBA-CSTB », version n° 23 du 31/08/2020. Le Guide technique spécialisé pour la constitution d'un dossier de demande d'Avis Technique pour des Isolants à base de fibres végétales ou animales : le cahier 3713 V3 a été révisé et approuvé par le Groupe Spécialisé n° 20 le 23 février 2021. Il annule et remplace la version 3713_V2 du 13 mars 2018.

Les principales limites que l'on peut faire à ces modèles seraient :

- Un protocole uniquement destiné aux « biosourcés » ;
- Un écartement de lots d'échantillons si un seul de ces échantillons montre d'une contamination fongique. Cette approche nous semble très sécuritaire, et en décalage avec un principe qui nous paraît prévaloir : dans un ensemble de tests similaires, on écarte d'emblée les résultats extrêmes.

B. La méthode « Tobon »

Le travail de thèse de Tobon (Tobon Monroy 2020) constitue une amélioration de la méthode de Le Bayon et il a permis de définir un protocole expérimental très intéressant offrant la possibilité :

- D'un côté, de modifier les techniques d'ensemencement initialement prévues dans les normes grâce à un ensemencement à « sec », lequel évite de modifier la teneur en eau de l'échantillon et ainsi, d'augmenter artificiellement l'activité de l'eau a_w au sein de ce dernier ;
- D'autre part d'identifier les COV microbiens non pas dans des conditions statiques utilisées dans la plupart des études (et qui s'éloignent très largement des conditions d'utilisation des matériaux en air intérieur dans des bâtiments) mais dans des conditions d'évaluation dynamiques proches des conditions qui sont utilisées pour évaluer les émissions des matériaux.

5. Etudes en conditions d'exploitation critiques en Europe

Dans le prolongement du travail effectué par le FCBA et le CSTB (Lamoulie 2015 ; Le Bayon 2015), une étude visant à définir des méthodes d'essai en laboratoire pour évaluer la résistance d'IBS à la croissance fongique dans différentes conditions d'exposition a été élaborée pour un projet de nouvelle norme européenne, légèrement différente de celle utilisée en France⁷⁹ (CSTB - GS 20 2021).

A. Évaluation des isolants à la croissance fongique

La norme européenne⁸⁰ (EN 15026) définit des méthodes d'essai en laboratoire pour évaluer la susceptibilité des produits d'isolation thermique à la croissance de moisissures à différentes conditions d'exposition. Comme pour de nombreux modèles d'évaluation, les matériaux qui ne sont pas « à risque » selon les standards définis par le protocole d'essai pourront être utilisés sans restriction, tandis que les « matériaux sensibles » peuvent uniquement être utilisés là où l'humidité est limitée à un niveau qui ne permet pas la croissance fongique pour ce matériau spécifique. Selon la demande du fabricant de l'isolant, le matériau sera exposé à différentes conditions d'essai pendant plusieurs semaines, puis la contamination fongique est évaluée.

Tableau 26. Conditions proposées pour la nouvelle norme « Évaluation de la sensibilité des produits d'isolation thermique à la croissance des moisissures » (Zirkelbach et Stöckl 2021)

Choice of condition 1 or condition 2 according to the claim of the manufacturer for the end use of its insulation products	
Condition 1	95% ± 4% Relative humidity and 28 °C ± 2°C for 4 weeks
Condition 2	85% ± 4% Relative humidity and 28 °C ± 2°C for 4 weeks

Optional condition : according to the claim of the manufacturer (e.g: outdoor insulation products), a condition with 95% ± 4% and 14± 2°C can be tested provided that the duration of the test is extended to 2 to 3 months.

Pour déterminer des conditions d'essai pertinentes, des simulations hygrothermiques de constructions critiques dans des conditions climatiques et de fonctionnement critiques ont été effectuées dans l'étude « *Use of Bio-based Insulation Materials in Buildings* » (CEN/TC 088/WG 01, N 0776) (Lamoulie 2015). De telles simulations sont définies dans la norme EN 15026⁸¹.

⁷⁹ Les conditions et durées d'expositions sont identiques, mise à part la température qui est, pour le « scénario du pire », de 28°

C dans le projet de norme européen, alors qu'elle est de 26 °C pour le protocole français.

⁸⁰ Laboratory test method - Assessment of the susceptibility of thermal insulation products to mould growth. Task group : “mold test method” – WG 1 TC88. Draft version of May 2020. CEN/TC 088/WG 01 N 1018.

⁸¹ EN 15026 : Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation. July 2007 (ZIRKELBACH, 2021). Version mise à jour en 2023 : <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-15026/performance-hygrothermique-des-composants-et-parois-de-batiments-evaluation/fa202420/350816>

(Zirkelbach et Tanaka, 2021) relatent que des connaissances nouvelles et détaillées sur le processus de décomposition du bois ont été acquises ces dernières années et qu'elles permettent de définir des conditions limites plus fines en fonction de la coïncidence de la chaleur et de l'humidité et de leur durée, qui peuvent remplacer de simples limites en régime permanent (comme la teneur en eau de 20 % en masse largement utilisée). Sachant que pour les matériaux en bois et les isolants en fibres naturelles, les limites d'humidité sont encore plus faibles dans la plupart des réglementations.

En conclusion, (Zirkelbach et Tanaka 2021) précisent que par le simple abandon des limites conservatrices liées aux évaluations des matériaux en bois massif, il est alors possible de garantir une prédition et une évaluation plus justes de l'utilisation d'isolant en fibres de bois, ainsi qu'une procédure d'évaluation simplifiée, plus rapide et rentable.

Sur ce sujet, le Fraunhofer Institut signalait que les conditions d'essai en laboratoire proposées sont assez extrêmes (humidité relative de 85 à 95 % et 28 °C) et semblent s'éloigner des conditions qui se produisent dans la pratique :

« Une combinaison d'une humidité relative élevée avec des températures élevées n'est guère possible dans les matériaux isolants perméables à la vapeur, car [en hiver] l'humidité sera immédiatement redistribuée de la zone chaude avec des pressions de vapeur croissantes vers les parties les plus froides de l'assemblage. Seul le troisième climat optionnel avec 95 % HR à seulement 14 °C pour une période plus longue se rapproche un peu plus des conditions auxquelles il faut s'attendre dans la construction de bâtiments résidentiels en Europe. » (Zirkelbach et Stöckl 2021).

Dans le but d'apporter des éléments à la réflexion, (Zirkelbach, Schöner, Tanaka, Sonntag, Ruisinger, Conrad, Stöcker, de Mets, *et al.* 2022) étudient en laboratoire la résistance aux champignons de décomposition de différents isolants en fibres de bois adaptés à une utilisation comme isolant intérieur, c'est à dire à des niveaux d'humidité élevés, et les comparent à celle du bois massif. Des éprouvettes de 50x50 mm sont utilisées avec une épaisseur de 40 mm pour l'isolation des fibres et de 10 mm pour les échantillons d'aubier de pin massif.

Tableau 27 : Matériaux d'isolation en fibre de bois pour l'isolation intérieure utilisés pour les essais (Zirkelbach, Schöner, Tanaka, Sonntag, Ruisinger, Conrad, Stöcker, de Mets, *et al.* 2022)

	Brève description	Processus de production / Imprégnation / Autre
A	Panneau isolant sec 0,5 %	procédé de production à sec, densité 110 kg/m ³ avec agent hydrophobe : 0,5 % en masse
B	Panneau isolant sec 0,8 %	procédé de production à sec, densité 150 kg/m ³ avec agent hydrophobe : 0,8 % en masse
C	Tapis de fibre flexible	procédé de production à sec, densité 60 kg/m ³ avec agent de protection incendie / pas d'agent hydrophobe
D	Panneau isolant humide	procédé de production humide, densité 160 kg/m ³ sans agent hydrophobe
Pin	Bois massif	Aubier de pin massif

Les spécimens sont inoculés avec quatre champignons différents qui sont soit couramment utilisés de manière normalisée pour les tests de décomposition fongiques, soit soupçonnés d'avoir une forte affinité pour les matériaux en fibre de bois. Les types de champignons sont *Serpula lacrymans*, *Coniophora puteana*, *Trametes versicolor* et *Schizophyllum commune*. L'inoculation a lieu par contact avec des « chevilles » en bois tendre déjà inoculées.

Figure 89. Visual observation after 8 weeks: established mycelium growth on all specimens apart from the flexible fibre mat C. p. 26



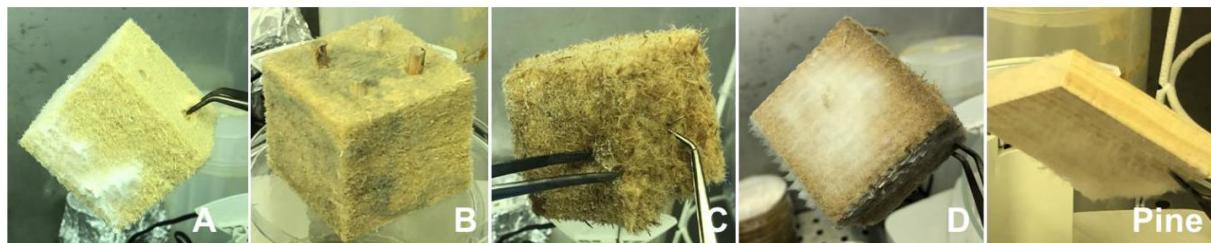
Les éprouvettes sont exposées à des valeurs élevées constantes d'HR de 95, 97 et 100 % HR, et à 25 °C puis environ 20 °C (voir Tableau 28), c'est-à-dire, à des conditions qui sont bien connues pour permettre des processus de dégradation.

Sur la base de ces résultats, les matériaux en fibre de bois peuvent être évalués comme le bois massif.

Tableau 28. Chronologie des tests de laboratoire avec les conditions climatiques et les différentes mesures d'évaluation (Zirkelbach, Schöner, Tanaka, Sonntag, Ruisinger, Conrad, Stöcker, de Mets, et al. 2022)

Incubation time		Condition of incubation units		Evaluation			
Days	Week	Relative Humidity	Temperature	Visual	Index	Surface cover	Mass loss
0 - 100	0 - 14	95 %, 97 % or 100 % poss. drier than planned	25 °C	regularly	regularly		
100 - 135	14 - 19	increased to planned values by different measures					
135	19	100 % in all remaining units	about 20°C	x	x		x
165	23			x			
185	26			x			x
200	29			x	x	x	
248	35			x			x
280	40			x			
338	48			x			x

Figure 90. Observation visuelle après 48 semaines. La plus forte croissance fongique s'observe sur le test de bois massif. (Zirkelbach, Schöner, Tanaka, Sonntag, Ruisinger, Conrad, Stöcker, de Mets, et al. 2022, 28)



Cette évaluation est basée sur l'aspect visuel, mais aussi sur une description des processus biologiques reconnaissables. De plus, les spécimens ont été ouverts de temps en temps pour vérifier si les champignons de décomposition s'étaient déjà propagés du goujon à l'intérieur du matériau. De plus, des spécimens individuels ont été séchés et pesés pour déterminer la perte de masse causée par le processus de désintégration (Zirkelbach, Schöner, Tanaka, Sonntag, Ruisinger, Conrad, Stöcker, de Mets, et al. 2022).

Les résultats montrent, comme prévu, que les quatre matériaux en fibre de bois testés présentent une durabilité plutôt bonne à des niveaux d'humidité élevés et se sont avérés plus résistants aux champignons de décomposition que l'aubier de pin massif. Par conséquent, des valeurs limites ou des courbes de limite identiques, voire supérieures, peuvent être utilisées pour l'évaluation de ces matériaux comme pour le bois massif. De telles limites sont actuellement disponibles sous forme de courbe limite en fonction de l'HR et de la température dans la ligne directrice WTA 6.8, notamment

1. Méthodologie et conditions climatiques⁸² de l'étude de simulation

Afin de vérifier ces hypothèses, cette récente étude du Fraunhofer Institut (Zirkelbach et Stöckl 2021), effectuée pour l'ECIA (*European Cellulose Insulation Association*) dans des conditions de constructions critiques et de climats extrêmes, suit la même approche et analyse les conditions hygrothermiques qui se produisent dans les matériaux d'isolation biosourcés dans les éléments de construction sous un climat européen et des conditions de fonctionnement de bâtiments résidentiels critiques. À cette fin, « *l'exposition des matériaux d'isolation doit être représentative de situations critiques, mais pas irréalistes ou basées sur des conditions qui échoueront en raison de processus dommageables.* » (Zirkelbach et Stöckl 2021).

⁸² Les conditions aux limites sont précisées dans l'étude. En résumé : pour la simulation des murs, l'orientation nord est utilisée, car elle présente les gains de rayonnement solaire les plus faibles et représente le pire cas pour un mur où l'influence de l'eau de pluie est peu pertinente, comme pour le mur de béton. L'absorption par ondes courtes est basée sur $a = 0,4$, l'émission d'ondes longues est fixée à 0,9, valeur commune pour les matrices non métalliques. Le coefficient de transfert de chaleur par convection sur la surface extérieure est fixé à 17 W/m²K. Sur la surface intérieure, le coefficient de transfert de chaleur commun de 8 W/m²K est utilisé. Une valeur de 20 °C est utilisée comme température initiale sur l'ensemble de la construction et la teneur initiale en humidité est la teneur en humidité d'équilibre des différentes couches de matériaux à 80 % HR.

Les simulations sont réalisées avec le modèle logiciel WUFI® pour calculer les performances de transport transitoire de chaleur et d'humidité des éléments et des matériaux de construction dans des conditions climatiques réelles et plus spécifiquement avec la version unidimensionnelle WUFI® Pro 6.5 selon la norme européenne EN 15026.

Afin d'être représentatif dans toute l'Europe, des zones climatiques critiques ont été utilisés : Helsinki, en Finlande pour l'Europe du Nord, Holzkirchen, en Allemagne, pour l'Europe centrale et Bari, en Italie, pour l'Europe du Sud⁸³.

Pour le climat intérieur, le modèle standard pour les bâtiments résidentiels a été appliqué selon la norme EN 15026 avec une « charge d'humidité élevée » afin de prendre comme hypothèse le scénario du « pire des cas ». En utilisant ce modèle, la température intérieure et l'humidité relative sont dérivées de la température moyenne quotidienne extérieure, ce qui conduit à une plage comprise entre 20 °C et 25 °C et 40 % et 70 % HR toute l'année.

2. Étude de simulation

Neuf constructions « type » ont été testées selon différents systèmes constructifs : Mur maçonnes et murs en béton isolés par l'intérieur ; murs en ossatures bois, plafonds, rampants, toitures plates (isolées dans l'épaisseur et en intérieur). Deux isolants ont été appliqués : la ouate de cellulose (50 kg/m³) et la fibre de bois (40 kg/m³). Les systèmes conçus répondent aux règles de conception allemandes et ont été appliquées aux climats de Bari, de Holzkirchen et de Helsinki, lesquels ont impliqué pour certaines configurations la mise en œuvre de membranes d'étanchéité (freins vapeur) avec des valeurs de Sd différentes⁸⁴ (1 m, 2 m, 5 m, 18 m) et parfois hygrovariables⁸⁵ (0,08 m à 4,4 m), afin que les critères limites dans les 10 mm les plus critiques des isolants soient respectés⁸⁶, en accord avec les orientations de la WTA 6.8.

La ligne directrice 6-8 de la WTA [10] comprend un modèle pour une évaluation plus précise de la décomposition du bois en fonction de l'humidité relative et de la température ambiante se produisant en même temps dans les pores du matériau (description physique du contenu d'humidité disponible pour le processus biologique). Dans cette étude, l'évaluation est effectuée sur une couche de 10 mm d'isolation (fibres de bois, ouate, etc.) localisée dans la zone la plus critique de la paroi (interface de l'isolant avec le mur pour cette étude). Le seuil critique est la zone se situant au-dessus de la droite définie par les couples 95 % HR à 0 °C et 86 % HR à 30 °C (Figure 91).

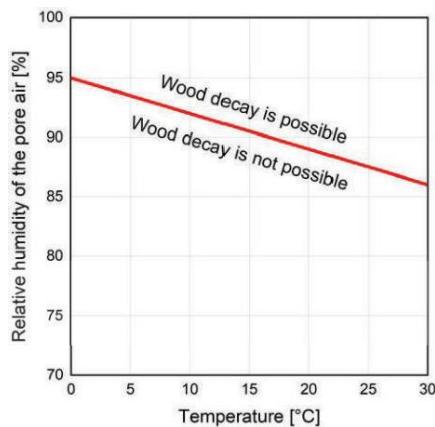
⁸³ Les fichiers climatiques sont utilisés à partir de la base de données climatiques intégrée à WUFI® et contiennent des données horaires représentatives pour la température, l'humidité relative, le rayonnement solaire, le rayonnement du ciel, le vent et la pluie pour les emplacements respectifs. Les informations climatiques sont présentées dans les annexes de l'étude.

⁸⁴ Pour le mur en béton par exemple : Sd = 1 m pour Bari et Sd = 5 m pour Holzkirchen et Helsinki.

⁸⁵ Pour l'ITI de murs maçonnes et la toiture plate.

⁸⁶ Donc doivent se situer en-dessous d'un seuil défini par une droite reliant les conditions suivantes : 95 % HR à 0 ° C et 85 % HR à 30 ° C.

Figure 91. Diagramme de la courbe limite de dégradation en fonction de la température (axe des x) et de l'humidité relative (axe des y) selon la fiche technique allemande WTA 6-8 [10]



En dessous de la courbe limite rouge, la dégradation n'est pas possible (pour du bois massif)

En Allemagne, la limite de la teneur en eau maximale pour les matériaux à base de bois est fixée par la norme DIN 68800⁸⁷ à 18 % d'eau en masse du matériau. Cette limite n'est pas définie en raison de risque de dégradation, mais de pertes de résistance mécanique à des valeurs d'humidité plus élevées. Elle est cependant actuellement en discussion, car au moins pour certains matériaux d'isolation plus résistants sans aucune fonction porteuse, des teneurs en humidité plus élevées pourraient être acceptables⁸⁸ (Zirkelbach et Stöckl 2021).

En conséquence, les parois proposées dans cette étude sont conçues de manière à ce que les teneurs en humidité restent assez élevées, mais qu'elles ne puissent ni produire d'accumulation d'eau dans la paroi ni de dégradation de l'isolation. Et pour conserver la dimension de scénario du « pire des cas », la teneur maximum en humidité appliquée pour l'isolant en fibres n'est donc pas la limite couramment utilisée de 18 % massique, mais celle de la ligne directrice WTA 6-8⁸⁹, plus généreuse et normalement valables uniquement pour le bois massif, autorisant une teneur maximale en humidité allant jusqu'à 26 % massique dans des conditions de température froide en hiver.

⁸⁷ DIN 68800-3: Wood preservation – Part 3: Preventive protection of wood with wood preservatives. March 2020.

⁸⁸ À ce sujet la recherche parallèlement menée pour le projet européen CORNET « IN2EuroBuild » pour la définition de lignes directrices européennes cohérentes pour l'isolation interne du parc immobilier existant et du patrimoine (Zirkelbach, Schöner, Tanaka, Sonntag, Ruisinger, Conrad, Stöcker, de Mets, et al. 2022), conclue notamment sur une mise à jour de la procédure d'évaluation des matériaux d'isolation en fibre de bois dans les lignes directrices 6.5 (et 6.8) de la WTA. Celle-ci est donc affinée en fonction des découvertes liées aux tests de résistance fongique réalisés sur des échantillons en fibre de bois pour le projet CORNET « IN2EuroBuild ». Pour les matériaux en fibres de bois qui se sont avérés plus résistants aux champignons lignivores que le bois massif, les mêmes critères d'application et de limite s'appliquent que pour le bois massif. Pour les matériaux non testés ou ceux qui présentent une résistance inférieure à celle du bois massif lors de l'essai, la limite de 18 % en masse s'applique.

⁸⁹ WTA Guideline 6-8/E: Assesment of humidity in timber constructions – Simplified verifications and simulation. August 2016.

3. Résultats

L'évaluation des résultats est comparée aux niveaux limites critiques respectifs des combinaisons de température et d'humidité relative actuellement proposées pour la norme européenne CEN/TC 088/WG 01 N 1018. Deux conditions sont alors étudiées :

- Condition 1 : un couple de 95 % +/- 4 % HR avec 28 °C +/- 2 °C pendant 4 semaines ;
- Condition 2 : un couple de 85 % +/- 4 % HR avec 28 °C +/- 2 °C pendant 4 semaines.

Le développement et la croissance constituant des processus biologiques plutôt lents et les conditions critiques devant durer une certaine période de temps pour permettre la germination des spores et la croissance ultérieure du mycélium (Lamoulie 2015), seules les conditions d'une durée supérieure à 48 h ont été évaluées et effectuées à l'aide d'une moyenne flottante de 48 heures. Dans une étape suivante, les conditions de température et d'humidité relative aux interfaces entre les couches (ex. : isolation intérieure et mur support) sont évaluées et comparées (avec des écarts/incertitudes admissibles de ± 2 K et ± 4 % HR) aux conditions proposées pour la nouvelle norme. Pour obtenir des résultats comparables sur les trois zones climatiques, la plage de température s'étend de températures inférieures à 0 °C à + 32 °C et celle des humidités relatives de 60 % à 100 % HR⁹⁰.

Afin de pouvoir comparer les conditions mentionnées ci-dessus et proposées par la norme avec des conditions plus représentatives du réel,

d'après le Fraunhofer Institut, une troisième condition a été définie et testée :

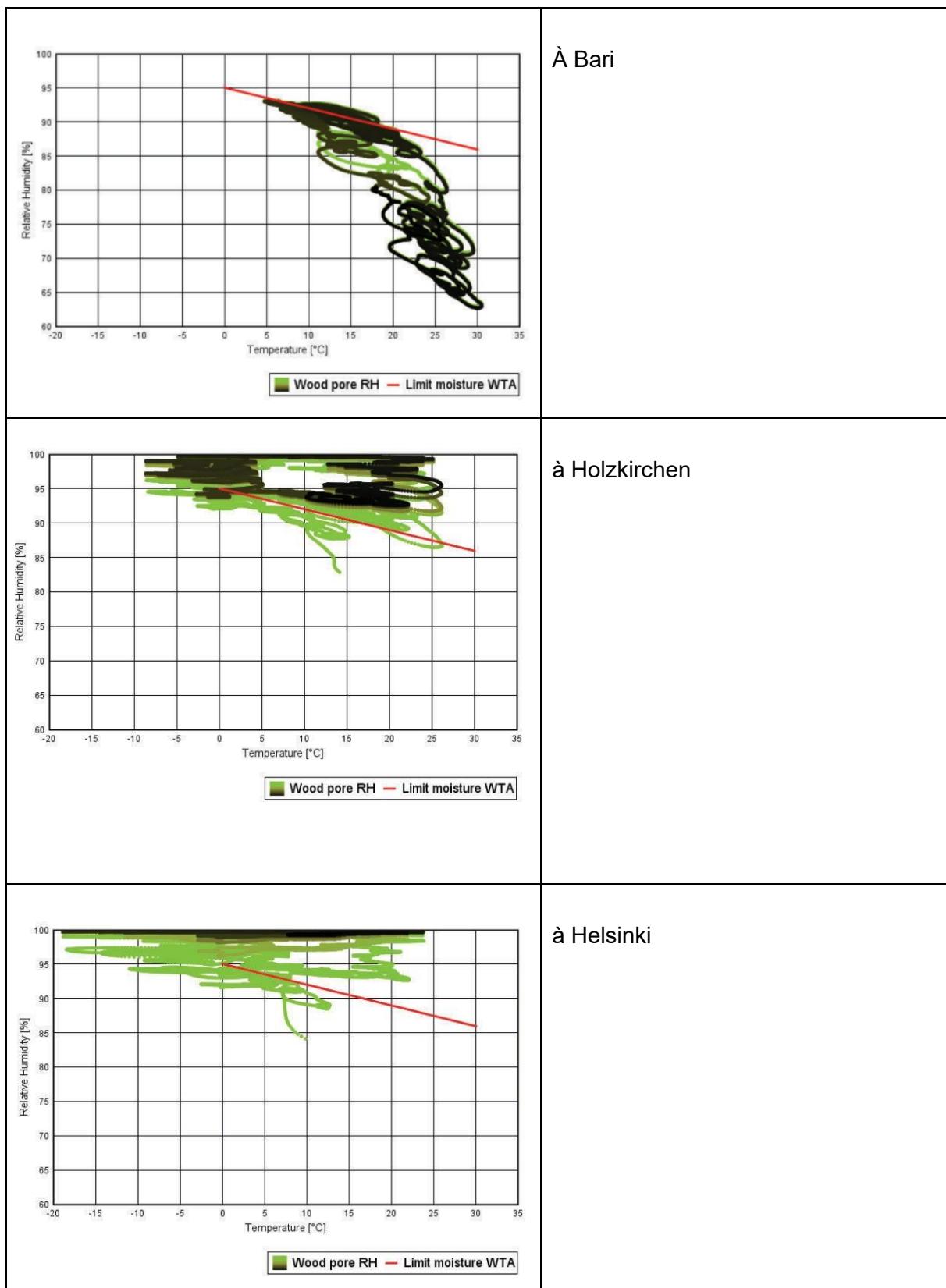
- Condition 3 : un couple de 95 % +/- 4 % HR avec 14 °C +/- 2 °C pendant 12 semaines.

4. Exemple pour le « pire des scénarii » possibles

A titre d'exemple pour ce « pire des scénarii » : les résultats sur cinq ans ont été simulés (Figure 92). La couleur de chaque point indique le moment du calcul : les premiers points sont en vert clair et les derniers en noir.

⁹⁰ Comme la croissance fongique s'arrête ou devient négligeable pour des températures inférieures à 0 °C, elles n'ont pas été indiquées dans les graphiques.

Figure 92. Exemple pour le pire des scénarii : évaluation du mur en béton sans pare-vapeur conformément au critère WTA 6-8 pour les 10 mm critiques de l'isolation en fibres de bois posée en ITI

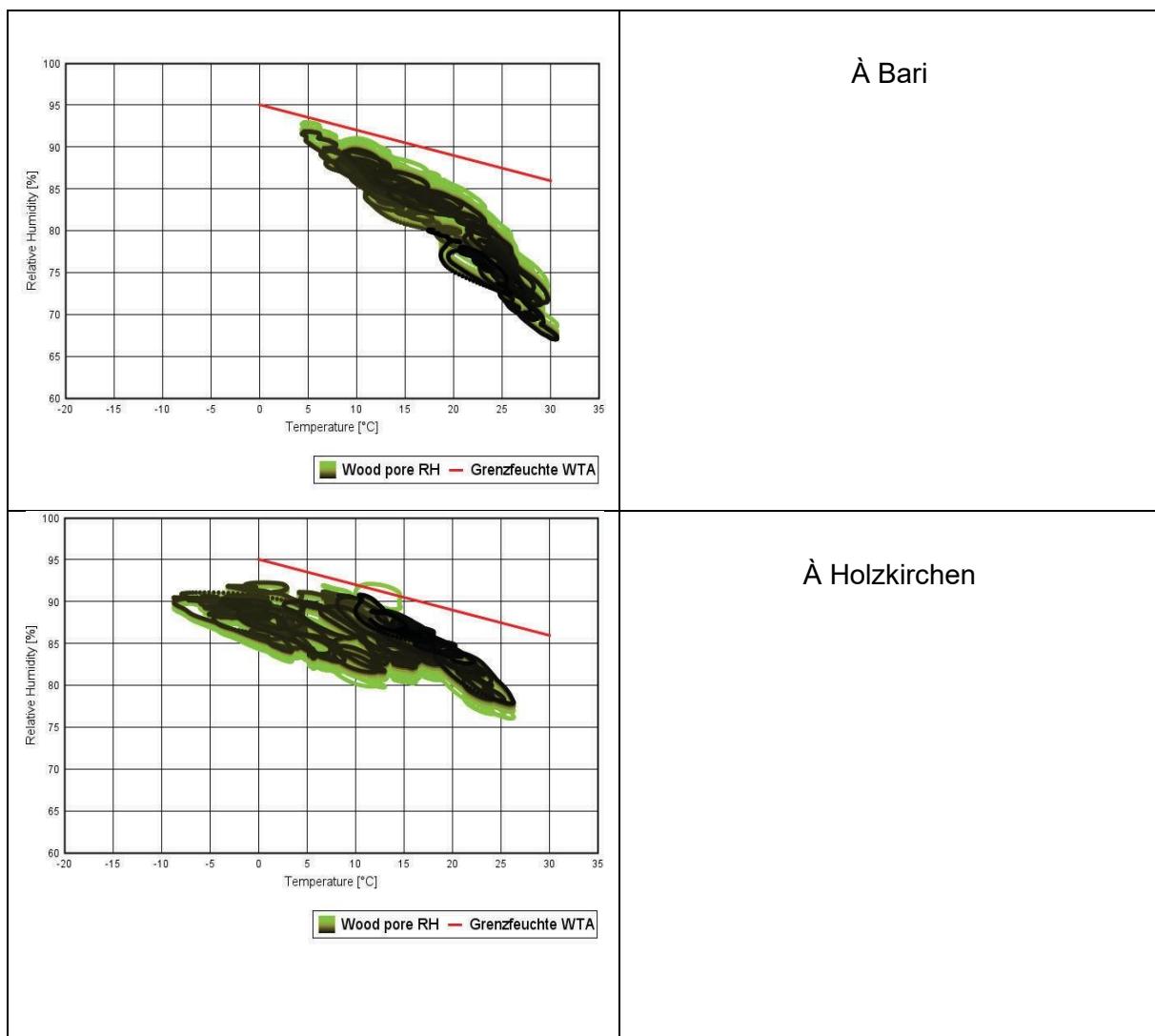


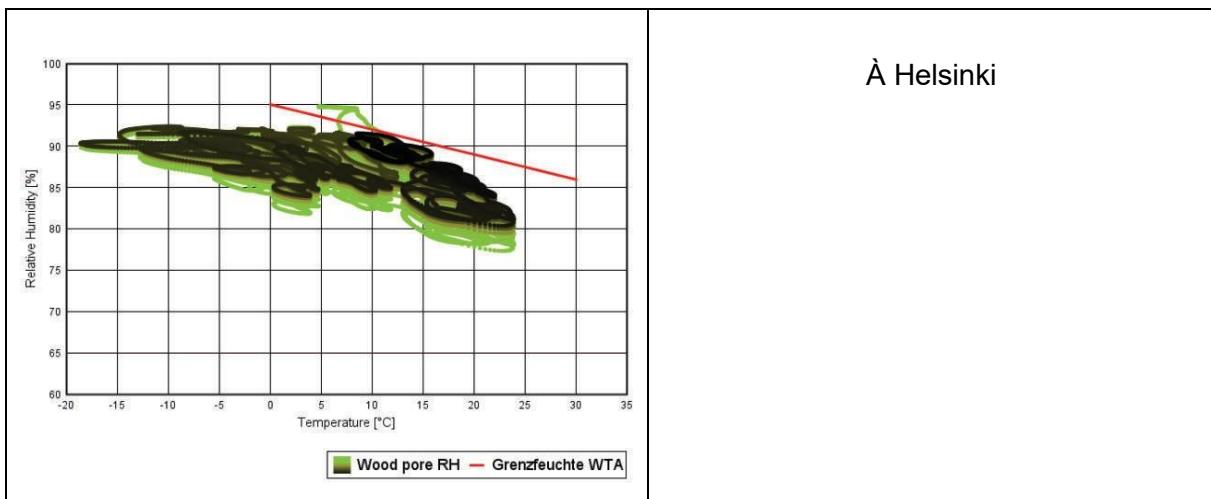
Ces résultats montrent une teneur en humidité dans l'isolation qui dépasse la courbe limite dans les trois zones climatiques : il existe donc un risque fongique probable (dépassement sévère des valeurs limites à Holzkirchen et à Helsinki). Dans ce cas, une évaluation du risque fongique pour des constructions défectueuses n'a pas de sens. Pour assurer une base réaliste d'évaluation de la moisissure de ce scénario, des frein-vapeur ont été appliqués côté intérieur et leur valeur Sd a été sélectionnée selon le dispositif constructif et les conditions climatiques.

Pour cet exemple (Figure 93) :

- Sd de 1 m est requise à Bari
- Sd de 5 m sur les sites d'Holzkirchen et d'Helsinki.

Figure 93. Exemple pour le pire des scénarios : évaluation du mur de béton avec pare-vapeur pour les 10 mm critiques de l'isolation en fibres de bois posée en ITI





Les résultats montrent alors qu'un léger dépassement de la courbe limite s'est seulement produit au tout début, lors de la redistribution de l'humidité (intégrée) pendant le premier hiver.

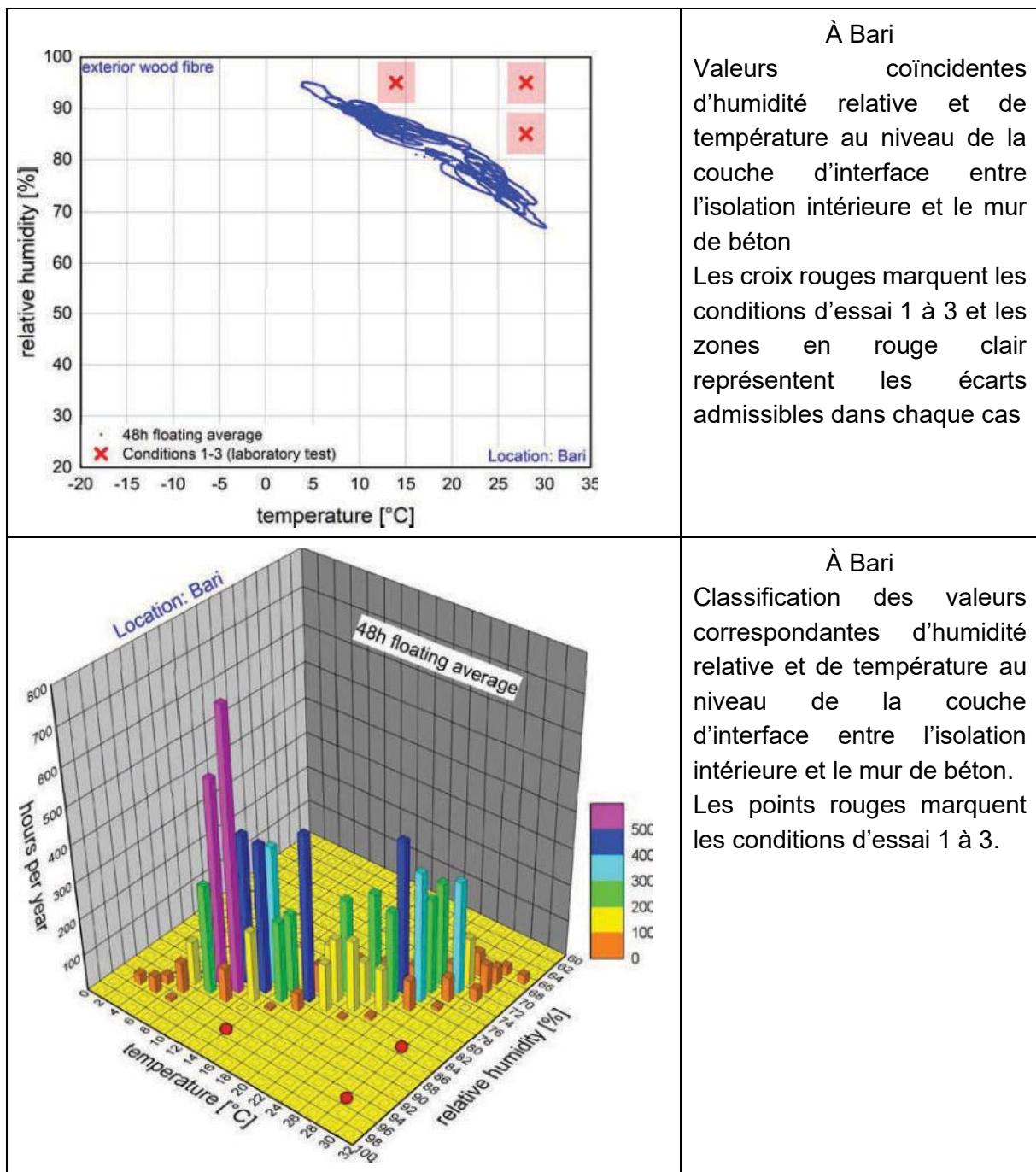
Dans l'étape suivante, les conditions de température et d'humidité relative au niveau de l'interface entre l'isolation intérieure et le mur sont évaluées et comparées aux conditions proposées pour la nouvelle norme.

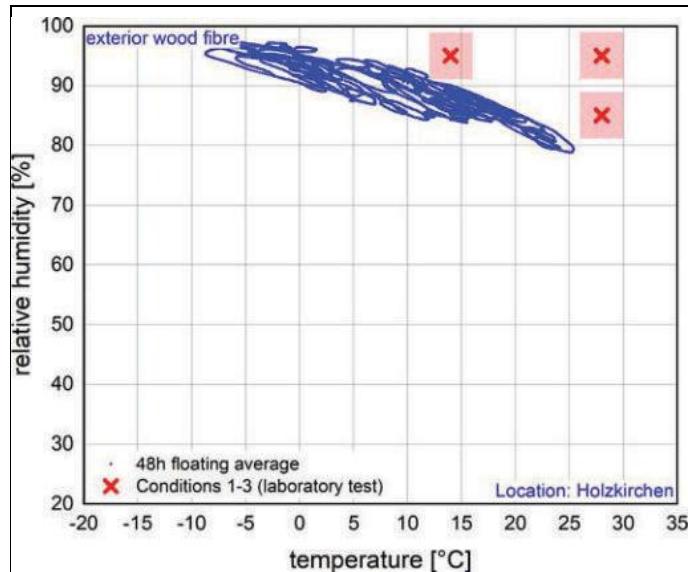
Pour chaque zone climatique, l'humidité relative est tracée en fonction de la température à la même heure que les valeurs moyennes flottantes sur 48 h et affichée dans un diagramme à points. Les résultats sont également présentés sous forme de diagrammes à barres avec une classification des combinaisons HR.-température et le nombre d'heures par an.

La Figure 94, qui présente les résultats pour un mur de béton à partir des données climatiques de Bari (Italie), Holzkirchen (Allemagne) et Helsinki (Finlande), montre que les conditions d'humidité relative et de température retenue pour nos trois essais ne sont jamais atteintes.

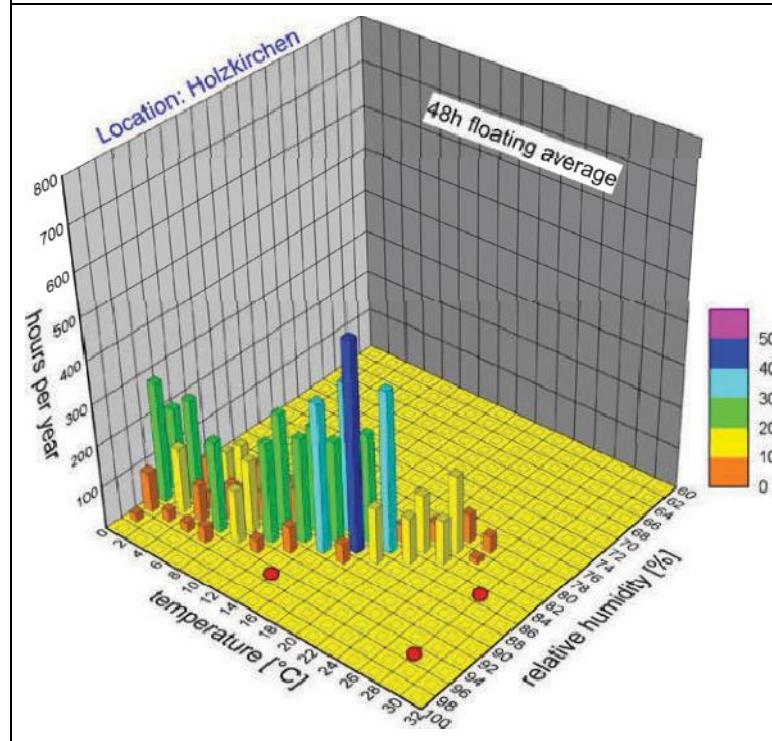
Ce protocole a ensuite été suivi et ajusté selon les dispositifs et les zones climatiques pour tous les autres systèmes constructifs.

Figure 94. Construction du mur de béton à partir des données climatiques de Bari (Italie), Holzkirchen (Allemagne) et Helsinki (Finlande)

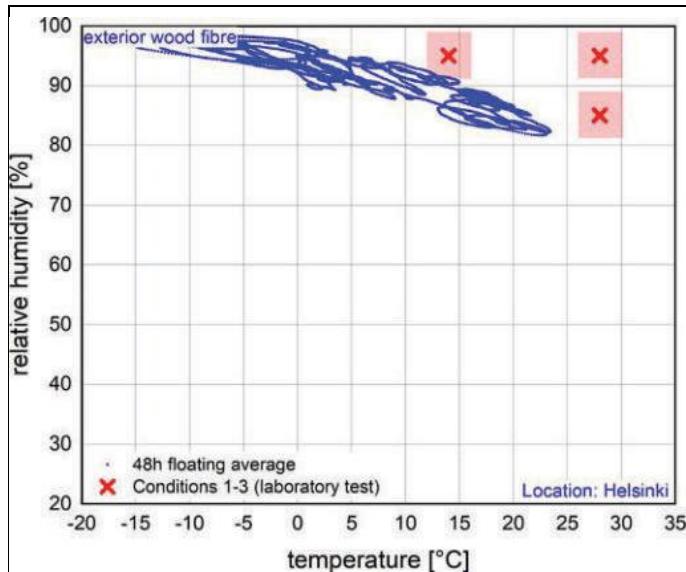




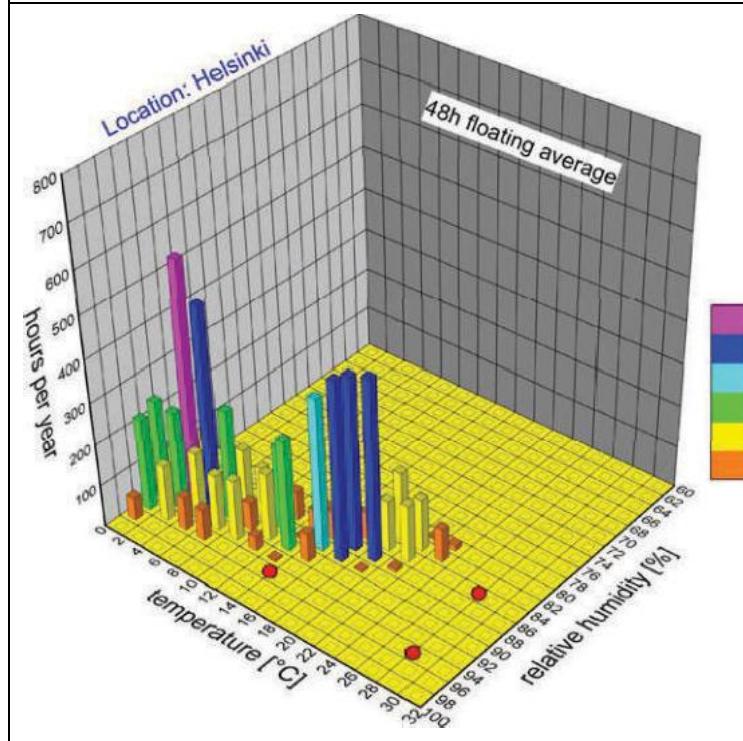
À Holzkirchen
Valeurs coïncidentes d'humidité relative et de température au niveau de la couche d'interface entre l'isolation intérieure et le mur de béton
Les croix rouges marquent les conditions d'essai 1 à 3 et les zones en rouge clair représentent les écarts admissibles dans chaque cas



À Holzkirchen
Classification des valeurs correspondantes d'humidité relative et de température au niveau de la couche d'interface entre l'isolation intérieure et le mur de béton.
Les points rouges marquent les conditions d'essai 1 à 3.



À Helsinki
Valeurs coïncidentes d'humidité relative et de température au niveau de la couche d'interface entre l'isolation intérieure et le mur de béton
Les croix rouges marquent les conditions d'essai 1 à 3 et les zones en rouge clair représentent les écarts admissibles dans chaque cas



À Helsinki
Classification des valeurs correspondantes d'humidité relative et de température au niveau de la couche d'interface entre l'isolation intérieure et le mur de béton.
Les points rouges marquent les conditions d'essai 1 à 3.

B. Résultats et synthèses pour plusieurs systèmes constructifs et trois zones géographiques

Les tableaux suivants (Zirkelbach et Stöckl 2021) indiquent, pour chaque système constructif et zone géographique considérés, l'humidité relative maximale obtenue à la température d'essai de 28 °C ainsi que la différence calculée par rapport à l'humidité relative de l'essai à 95 %. Si la température de 28 °C n'est pas atteinte dans le calcul, la température maximale atteinte est alors indiquée. Sont données également la température maximale atteinte dans le calcul avec 95 % HR ainsi que la différence par rapport à la température d'essai de 28 °C pour ce même seuil. Si le seuil de 95 % HR n'est pas atteint dans le calcul, l'humidité relative

maximale obtenue est indiquée. L'évaluation est effectuée pour chaque cas dans l'épaisseur la plus défavorable de l'isolant en cellulose ou en fibres de bois.

1. Pour les conditions d'essai n° 1

La condition d'essai n° 1 est à 95 % HR et à une température de 28 °C sur une période de quatre semaines.

Tableau 29. Comparaison des valeurs maximales d'HR et de température dans toutes les constructions critiques analysées avec les valeurs d'HR et de température proposées pour les conditions d'essai n° 1

	Emplacement	HR Max. à 28 °C	Diff. / HR essai.	Température max. si < 28 °C	Température max à 95 %	Diff. / T° essai	HR Max. si < 95 %
Mur en béton	Bari	75 %	20 %	---	5 °C	23 K	---
	Holzkirchen	X	X	26 °C	0 °C	28 K	---
	Helsinki	X	X	23 °C	5 °C	23 K	---
Toiture en pente 1	Bari	48 %	47 %	---	X	X	80 %
	Holzkirchen	X	X	27 °C	X	X	90 %
	Helsinki	X	X	24 °C	X	X	89 %
Toiture en pente 2	Bari	49 %	46 %	---	X	X	81 %
	Holzkirchen	X	X	27 °C	X	X	87 %
	Helsinki	X	X	24 °C	X	X	86 %
Toiture plate	Bari	63 %	32 %	---	X	X	81 %
	Holzkirchen	67 %	28 %	---	X	X	88 %
	Helsinki	X	X	27 °C	X	X	94 %
Ossature bois Mur 1	Bari	52 %	43 %	---	X	X	72 %
	Holzkirchen	X	X	26 °C	X	X	79 %
	Helsinki	X	X	24 °C	X	X	84 %
Ossature bois Mur 2	Bari	52 %	43 %	---	X	X	79 %
	Holzkirchen	X	X	26 °C	-5 °C	33 K	---
	Helsinki	X	X	24 °C	0 °C	28 K	---
Mur maçonner	Bari	70 %	25 %	---	X	X	80 %
	Holzkirchen	X	X	24 °C	X	X	89 %
	Helsinki	X	X	23 °C	X	X	92 %
Plancher haut	Bari	53 %	42 %	---	X	X	88 %
	Holzkirchen	X	X	24 °C	3 °C	25 K	---
	Helsinki	X	X	22 °C	5 °C	23 K	---
Résumé	Moyenne		36 %			26 K	
	Minimum		20 %			23 K	
	Maximum		47 %			33 K	

Colonnes vertes : le tableau montre que l'humidité relative maximale obtenue dans l'isolant au sein du mur avec une température de 28 °C est toujours inférieure à celle des conditions d'essai (95 % HR) :

- D'un taux HR d'au moins 20 % à celle des conditions d'essai ;
- En moyenne de 36 %.

Colonnes beiges : le seuil des 95 % HR n'est pas du tout atteint dans la plupart des situations. Et s'il l'est, la température est inférieure à celle de l'essai en laboratoire (28 °C) :

- D'au moins 23 K ;
- En moyenne de 26K.

2. Pour les conditions de test n° 2

La condition d'essai n° 2 est à 85 % HR et à une température de 28 °C sur une période de quatre semaines.

Tableau 30. Comparaison des valeurs maximales d'HR et de température dans toutes les constructions critiques analysées avec les valeurs d'HR et de température proposées pour les conditions d'essai n° 2

	Emplacement	HR Max. à 28 °C	Diff. / HR essai.	Température max. si < 28 °C	Température max à 85 %	Diff. / T° essai	HR Max. si < 85 %
Mur en béton	Bari	75 %	10 %	---	20 °C	8 K	---
	Holzkirchen	X	X	26 °C	22 °C	6 K	---
	Helsinki	X	X	23 °C	22 °C	6 K	---
Toiture en pente 1	Bari	48 %	37 %	---	X	X	80 %
	Holzkirchen	X	X	27 °C	12 °C	16 K	---
	Helsinki	X	X	24 °C	4 °C	24 K	---
Toiture en pente 2	Bari	49 %	36 %	---	X	X	81 %
	Holzkirchen	X	X	27 °C	6 °C	22 K	---
	Helsinki	X	X	24 °C	4 °C	24 K	---
Toiture plate	Bari	63 %	22 %	---	X	X	81 %
	Holzkirchen	67 %	18 %	---	7 °C	21 K	---
	Helsinki	X	X	27 °C	20 °C	8 K	---
Ossature bois Mur 1	Bari	52 %	33 %	---	X	X	72 %
	Holzkirchen	X	X	26 °C	X	X	79 %
	Helsinki	X	X	24 °C	X	X	84 %
Ossature bois Mur 2	Bari	52 %	33 %	---	X	X	79 %
	Holzkirchen	X	X	26 °C	7 °C	21 K	---
	Helsinki	X	X	24 °C	8 °C	20 K	---
Mur maçonneré	Bari	70 %	15 %	---	X	X	80 %
	Holzkirchen	X	X	24 °C	10 °C	18 K	---
	Helsinki	X	X	23 °C	15 °C	13 K	---
Plancher haut	Bari	53 %	32 %	---	10 °C	18 K	---
	Holzkirchen	X	X	24 °C	17 °C	11 K	---
	Helsinki	X	X	22 °C	15 °C	13 K	---

Résumé	Moyenne		26 %			16 K	
	Minimum		10 %			6 K	
	Maximum		37 %			24 K	

Le tableau montre que l'humidité relative maximale obtenue dans l'isolant au sein du mur avec une température de 28 °C est toujours inférieure à celle des conditions d'essai à 85 % HR sur 4 semaines :

- D'au moins 10 % à celle des conditions d'essai ;
- En moyenne de 26 %.

La température maximale atteinte à 85 % HR est toujours inférieure à celle de la condition de l'essai :

- D'au moins 23 K ;
- En moyenne de 16K.

3. Pour les conditions de test n° 3

La condition d'essai 3 est à 95 % HR et à une température de 14 °C sur une période de trois mois (12 semaines).

Tableau 31. Comparaison des valeurs maximales d'HR et de température dans toutes les constructions critiques analysées avec les valeurs d'HR et de température proposées pour les conditions d'essai n° 3

	Emplacement	HR Max. à 14 °C	Diff. / HR essai.	Température max. si < 14 °C	Température max à 95 %	Diff. / T° essai	HR Max. si < 95 %
Mur en béton	Bari	88 %	7 %	---	5 °C	9 K	---
	Holzkirchen	91 %	4 %	---	0 °C	14 K	---
	Helsinki	92 %	3 %	---	5 °C	9 K	---
Toiture en pente 1	Bari	75 %	20 %	---	X	X	80 %
	Holzkirchen	79 %	16 %	---	X	X	90 %
	Helsinki	78 %	17 %	---	X	X	89 %
Toiture en pente 2	Bari	74 %	21 %	---	X	X	81 %
	Holzkirchen	78 %	17 %	---	X	X	87 %
	Helsinki	78 %	17 %	---	X	X	86 %
Toiture plate	Bari	78 %	17 %	---	X	X	81 %
	Holzkirchen	83 %	12 %	---	X	X	88 %
	Helsinki	88 %	7 %	---	X	X	94 %
Ossature bois Mur 1	Bari	71 %	24 %	---	X	X	72 %
	Holzkirchen	74 %	21 %	---	X	X	79 %
	Helsinki	72 %	23 %	---	X	X	84 %
Ossature bois Mur 2	Bari	70 %	25 %	---	X	X	79 %
	Holzkirchen	74 %	21 %	---	-5 °C	19 K	---
	Helsinki	77 %	18 %	---	0 °C	14 K	---
Mur maçonneré	Bari	76 %	19 %	---	X	X	80 %
	Holzkirchen	83 %	12 %	---	X	X	89 %
	Helsinki	85 %	10 %	---	X	X	92 %
Plancher haut	Bari	79 %	16 %	---	X	X	88 %
	Holzkirchen	84 %	11 %	---	3 °C	11 K	---
	Helsinki	85 %	10 %	---	5 °C	9 K	---
Résumé	Moyenne		15 %			12 K	
	Minimum		3 %			9 K	
	Maximum		25 %			19 K	

Le tableau montre que l'humidité relative maximale obtenue dans l'isolant au sein du mur avec une température de 14 °C est toujours inférieure à celle des conditions d'essai à 95 % HR sur 3 mois :

- Inférieure d'au moins 3 % à celle des conditions d'essai ;
- En moyenne de 15 %.

La température maximale obtenue à 95 % HR est toujours inférieure à celle de la condition de l'essai :

- D'au moins 9 K ;
- Et en moyenne de 12K.

Évaluation des conditions d'essai en laboratoire

→**Les conditions d'essai n° 1** (28 °C et HR de 95 % sur quatre semaines) sont très éloignées de toute exposition réaliste d'un matériau isolant en fibres naturelles dans les constructions en Europe.

Premièrement, nous réalisons que dans les endroits testés, la température n'atteint 28 °C qu'à Bari, ainsi qu'à Holzkirchen pour la toiture plate. Dans les situations où la température de 28 °C est atteinte, les conditions de l'essai en laboratoire (HR de 95 %) est supérieur d'au moins 20 % au taux d'humidité relative le plus critique observé, qui rappelons-le, l'est sur une période beaucoup plus courte (= condition plus critique). En moyenne, à 28 °C, le taux d'HR à la position la plus critique à l'intérieur de la couche d'isolation est de 59 %, soit une HR 36 % en dessous des conditions d'essai. Et si l'on excepte les complexes constructifs les plus « risqués » (ITI et toiture plate), cette différence moyenne entre conditions d'essai et observation est de 44 %, l'HR maxi repérée à 28 °C oscillant seulement entre 48 et 53 %.

Pour les situations où le 28 °C n'est pas atteint dans la partie testée de l'isolant, elle oscille entre 22 et 27 °C.

Si nous regardons désormais à quelle température maximum nous atteignons un taux HR de 95 %, nous réalisons que ce taux d'humidité n'est atteint que dans 7 des 24 situations. Mais dans ces cas, la température est basse, entre -5 et 5 °C, soit très loin de la température retenue pour les tests réalisés en laboratoire.

Dans les nombreux cas où le 95 % d'humidité relative n'est pas atteint, il oscille entre 72 et 94 %.

Nous déduisons de ces résultats que les conditions de l'essais en laboratoire, 95 % à 28 °C, encore plus sur 4 semaines, ne sont pas du tout adaptées pour représenter les conditions hygrothermiques réelles des bâtiments en Europe.

→**Les conditions d'essai n° 2** (28 °C et HR de 95 % sur quatre semaines) se rapprochent un peu plus des conditions qui peuvent se produire dans certaines constructions critiques. Cependant, cette combinaison est encore trop extrême pour représenter les conditions réelles, car elles ne sont pas du tout encore atteintes dans les constructions analysées, bien qu'elles aient été choisies pour représenter des espaces critiques sous conditions extrêmes.

Dans les situations où la température de 28 °C est atteinte, les conditions de l'essai n° 2 (HR de 85 %) est encore supérieur d'au moins 10 % au taux d'humidité relative le plus critique observé. Rappelons-le : en moyenne, à 28 °C, le taux d'HR à la position la plus critique à l'intérieur de la couche d'isolation est de 59 %, soit une HR 26 % en dessous des conditions d'essai, qui s'élève à 34 % pour les complexes constructifs les moins « risqués » (ossature bois et isolation haute autre que toiture plate).

Contrairement au tableau précédent, nous constatons que le taux d'humidité relative retenu (désormais de 85 %) est atteint dans la majorité des situations. Mais là encore à des

températures plus basses que celle de l'essai, soit entre 4 et 22 °C (moyenne de 16K) pour l'ensemble des parois, et entre 4 et 17 °C (moyenne de 9K) pour les parois les moins « risquées ».

→**Les conditions de l'essai complémentaire n° 3** (14 °C et HR de 95 %, mais sur une période non encore définitivement définie, sans doute entre 2 et 3 mois) semblaient plus plausibles, car dans un complexe isolant, l'espace où l'humidité relative est la plus élevée coïncide normalement avec les températures les plus basses, du moins en hiver.

Mais ici également le résumé comparatif du tableau montre :

- Que la valeur de 95 % d'HR n'est jamais atteinte à 14 °C. La moyenne à cette température étant de 75 % (70 % minimum et 92 % maximum) ;
- Que lorsqu'une HR de 95 % est atteinte, ceci l'est à des températures très basses, entre -5 et +5 °C, soit un différentiel entre 9 et 19K vis-à-vis de notre température de référence ;
- Que dans la majorité des cas une HR à 95 % n'est jamais atteinte, et que dans ces situations elle oscille entre 72 et 94 %.

De plus, la figure 29 montre que les conditions qui se rapproche des potentielles conditions d'essai (14°C, 95%HR) durent beaucoup moins longtemps que les deux à trois mois actuellement entrevus (respectivement 1 440 à 2 160 heures).

En résumé, les trois conditions d'essai proposées sont trop extrêmes en ce qui concerne le niveau et la durée hygrothermiques. Cela est particulièrement vrai pour la condition de test 1, qui ne correspond en aucun cas aux charges réelles. La condition d'essai 2 nécessite une condition d'essai significative et la condition d'essai facultative 3 toujours une réelle adaptation.

De nouveau, rappelons que ces comparaisons considèrent les conditions les plus extrêmes qui se produisent avec des valeurs moyennes flottante de 48 h, qui durent bien moins longtemps que lors des conditions d'essai proposées.

4. Points clés à retenir de cette étude

Si nous avons réalisé que les conditions d'essai proposées ne représentent pas les conditions qui se produisent dans les isolants, reprenons le résultat des 3 précédents tableaux au regard des systèmes constructifs retenus.

1. Nous réalisons que même pour le système le plus critique, c'est-à-dire **l'isolation intérieure en fibres de bois d'un mur en béton** (CEN/TC 088/WG 01, N 0776), l'isolant ne se trouve jamais dans les conditions d'exposition retenues pour les tests de laboratoire. Et ce même pour la nouvelle proposition. En outre, dans la construction, la situation la plus proche, HR de 91 % à 13 °C, dure moins de 300 heures.

Rappelons néanmoins que l'hypothèse pour la conception du mur en béton dans la simulation intégrait la présence d'un pare-vapeur hygroréglable afin d'éviter une dégradation de l'isolant du fait de l'humidité, car il limite l'entrée de la vapeur en temps normal, mais permet l'assèchement du mur côté intérieur lorsque l'HR en son sein augmenté réellement.

Cette disposition constructive a été également retenue pour **l'isolation intérieure de murs maçonnés**, qui se comportent néanmoins mieux que le mur béton du fait qu'il soit moins fermés à l'assèchement côté extérieur.

2. L'autre situation complexe à appréhender concerne les **toitures terrasse chaude**. Munies elles aussi d'un pare-vapeur hygrovariable, leur problématique tient au fait que l'humidité ne peut en aucun cas quitter la construction côté extérieur. Bien qu'élevée sur la surface extérieure de l'isolant lorsque les températures sont basses, cette situation d'une humidité relative forte ne se poursuit pas lorsque les températures s'élèvent car à ces moments l'humidité est redistribuée à l'intérieur. Et répétons que lorsque taux d'humidité et température se rapprochent des conditions des essais, cela se fait sur des périodes courtes.

3. Dans les autres situations, qualifiées de « moins risquées » dans le § précédent, soit les **murs ossature bois et les isolations de rampants ou de plancher haut**, la surface extérieure de la couche d'isolation connaît les conditions les plus extrêmes, mais comme ce sont toutes des constructions qui sont plutôt perméables à la vapeur à l'extérieur, le niveau d'humidité est limité dans une certaine mesure aux conditions extérieures. Ainsi, les conditions maximales restent dans tous les cas nettement inférieures aux combinaisons de température et de R.H. des tests de laboratoire.

Selon le climat

Parallèlement à ce focus réalisé sur le systèmes constructifs, la comparaison des différents climats n'a pas révélés de surprise, avec la situation de Bari généralement plus éloignée des seuils critiques que celle de Holzkirchen, puis celle Helsinki. Ce, même si cet ordre ne s'impose pas forcément à l'ensemble des systèmes constructifs étudiés.

Évaluation des conditions dans les matériaux de construction en bois adjacents

Un autre aspect de cette étude consistait à comparer les charges hygrothermiques des matériaux d'isolation avec celles de la construction en bois elle-même. Toutes les constructions avec un panneau à base de bois côté extérieur ont été évaluées en ce qui concerne cet aspect, et les taux d'humidité relative et température maximum ont été comparées aux valeurs maximales de l'isolant lui-même. Les résultats montrent que les valeurs d'humidité sont plus élevées que dans le matériau d'isolation lui-même. Si cette réalité ne nous surprend pas (l'humidité peut être facilement transportée à travers les matériaux isolants, qui sont très perméables à la vapeur, tandis qu'elle s'accumule dans les matériaux en bois, moins ouverts), il ne nous semble pas logique d'imposer des exigences sur le matériau isolant supérieures à celles qui s'appliquent aux matériaux porteurs à base de bois.

La méthode d'essai qui est en cours de développement dans le cadre européen et qui reprend pour partie celle utilisée en France pour qu'un IBS puisse obtenir un avis techniques⁹¹ suscite des débats. Au regard de la conclusion de cette étude, réalisée en partenariat avec le Fraunhofer Institut, il est remarqué que les conditions des essais sont

⁹¹ « *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.* » Le protocole d'évaluation de la résistance vis-à-vis des moisissures, présenté dans ce document est établi selon la « *Méthode isolants moisissures FCBA-CSTB* », version n° 23 du 31/08/2021. Ce guide a été révisé et approuvé par le Groupe Spécialisé n° 20 le 23 février 2021. Il annule et remplace la version précédente 3713_V2 du 13 mars 2018.

bien plus sévères que celles, même critiques, observées dans les parois aussitôt que l'on suit les règles de conception qui existent dans les pays où il y en a. Ces règles de conception ont été développées et affinées pendant des dizaines d'années dans ces pays (ex. Allemagne, France, etc.) avec des recoulements et des croisements effectués sur ce qui est observé et mesuré (ex. WUFI® : données croisées avec des essais grandeur nature). Ce qui ressort est donc que lorsque ces règles de conception et de dimensionnement sont correctement appliquées, les conditions réelles n'arrivent pas aux conditions des essais d'évaluation de résistance au moisissures

Les conditions d'essai en laboratoire pour la nouvelle norme ne représentent pas les conditions hygrothermiques auxquelles les matériaux d'isolation dans la construction en bois sont exposés. Cette étude a montré que même des conditions aux limites extrêmes dans des constructions critiques mais sans dommages entraînent des charges nettement inférieures. Par conséquent, pour cette méthode de construction, des scénarios d'essai adaptés doivent être fournis. Ces exigences ne devraient pas seulement s'appliquer au matériau isolant lui-même, mais aussi aux matériaux de construction en bois adjacents, qui sont exposés à des conditions encore plus élevées que le matériau d'isolation lui-même.

Conclusion

1. Étendue du corpus

Cette revue de littérature a permis de prendre conscience que le corpus traitant du développement et de la croissance des moisissures dans le bâtiment, dans les matériaux biosourcés et dans les isolants biosourcés est en réalité conséquente. En effet, au vu de la profusion d'études abordant le sujet, il ne s'agit pas d'un sujet nouveau qu'il faille découvrir. Pour cette recherche il en a été présélectionné environ 2 000, puis sélectionné 600 et environ 250. Cependant, en raison de sa complexité et du manque apparent de capitalisation des connaissances, ce sujet est bien souvent examiné de manière fragmentaire dans des études distinctes et n'est que trop rarement compilé sous forme d'ouvrage synthétique⁹².

2. Évaluation de la prolifération fongique et de la résistance des IBS face à celle-ci

Un point-clé ressort de l'étude de la littérature : les études de la dégradation ou de la croissance fongique, certes peuvent informer sur les limites performancielles des matériaux, mais du fait de la structuration des protocoles et des critères extrêmement sévères de leur évaluation, ne peuvent pas refléter le comportement des matériaux mis en œuvre en conditions réelles et dans la durée, qu'il s'agisse de leur sensibilité ou de leurs résistances potentielles. En effet, comme le soulignent plusieurs études (G. Delannoy 2018 ; Pernilla Johansson, Bok, et Ekstrand-Tobin 2013 ; P. Johansson, Lång, et Capener 2021 ; P. Johansson, Bok, et Ekstrand-Tobin 2013) :

- l'inertie hydrique des matériaux sur le long terme (3 à 5 ans) n'est que rarement prise en compte et impactent aussi la précision des modèles⁹³ ;

⁹² Tel que le livre *Performances of Biobased Materials* (Jones et Brischke 2017d).

⁹³ En Allemagne, les études sont effectuées et considérées à partir de 3 à 5 ans après les travaux (Zirkelbach et Stöckl 2021 ; Scheiding et Plaschkies 2020a). Car dans un système constructif considéré comme « pérenne », les 3 premières années peuvent être critiques (notamment les hivers), le temps que l'excès d'humidité apportée durant le chantier puisse être redistribuée et évacuée. À terme, malgré les excès enregistrés durant les 3 premières années, les niveaux d'humidité peuvent revenir à l'équilibre avec l'environnement intérieur. Des moisissures peuvent commencer à apparaître derrière le parement durant cette première période, mais ensuite disparaître durant les périodes de séchage (en été notamment), puis s'arrêter définitivement avec le rééquilibrage final de la paroi. Ainsi, lorsque

- la durée des essais peut être trop courte pour permettre à l'inertie hydrique des matériaux d'impacter l'activité de l'eau et la prolifération fongique ;
- les conditions varient plus fréquemment dans un bâtiment que lors des protocoles de test ce qui, là encore, génère des conditions d'essai plus propices à la dégradation des matériaux.

Les éléments qui inspirent certaines pensées limitantes concernant ces matériaux ont été examinés, mais aussi ceux qui justifient de prendre certaines précautions, puis d'autres qui constituent des facteurs de résistance des IBS face à celles-ci :

- une des pensées limitantes est qu'ils « absorbent » beaucoup d'eau, négligeant que la majorité de cette humidité est de l'eau liée, sans conséquence néfaste, mais également qu'ils peuvent aussi sécher aisément, lorsque leurs spécificités et leur comportement sont compris et correctement mis en œuvre dans un système constructif adéquat (par diffusion de vapeur d'eau et/ou conduction capillaire) (Claude 2018 ; Héberlé 2016 ; Raiffaud 2017 ; Guillaume Delannoy 2018 ; Dubois *et al.* 2014 ; Evrard 2008) ;
- la deuxième est qu'ils sont « vulnérables » à la moisissure. Mais de quoi parle-t-on ? La littérature montre la différence à faire entre les « champignons » destructeurs (ou composteurs) et les « moisissures » qui vivent à la surface des matériaux sans généralement porter atteinte à leur intégrité⁹⁴ (CSHPF 2006 ; Alexis Simons 2018; Imken *et al.* 2020 ; Jones et Brischke 2017c ; Kutnik, Suttie, et Brischke 2017 ; Forest Products Laboratory 2007; Thomas Verdier 2015). Les tests de résistance fongique visent à faire moisir les matériaux dans des conditions extrêmes qui ne doivent en aucun cas être rencontrées dans les bâtiments (Tobon Monroy 2020 ; Guillaume Delannoy 2018 ; Aurélie Laborel-Préneron *et al.* 2018 ; Lamoulie *et al.* 2015 ; Bayon *et al.* 2015). La notion même de « vulnérabilité » est donc en ce sens questionnable ;
- la troisième est que les biosourcés seraient tous « équivalents », puisque leur dénomination même les englobe dans une seule et même catégorie. Or, la littérature montre que (Guillaume Delannoy *et al.* 2020 ; Guillaume Delannoy 2018 ; Aurélie Laborel-Préneron *et al.* 2021 ; 2018 ; Zirkelbach, Schöner, Tanaka, Sonntag, Ruisinger, Conrad, Stöcker,

des simulations sont réalisées, des excès d'humidité sont tolérés les 2-3 premières années si un équilibre est ensuite lentement atteint.

⁹⁴ De manière générale et simplifiée, les champignons dégradent les matériaux lignocellulosiques pour se nourrir, en produisant des enzymes spécifiques (ligninolytiques et/ou cellulolytiques) grâce auxquelles chaque espèce dégrade préférentiellement la lignine et/ou la cellulose, ou encore les sucres dissous à l'intérieur des cellules, provoquant en conséquence dans les matériaux des dégâts différents, qui se distinguent en deux grands types :

- l'altération des composés des membranes cellulaires du bois (la lignine, et/ou la cellulose), ce qui modifie profondément les propriétés mécaniques du matériau attaqué ;
- l'altération des contenus des cellules (leurs substances nutritives), sans provoquer d'autres dégâts que des tâches ou des défauts de colorations, superficiels ou non.

Dans le premier cas, on parle de champignons de décomposition ou « composteurs » (lignivores), qui peuvent décomposer l'hémicellulose, la cellulose et/ou la lignine, simultanément ou successivement (Jones et Brischke 2017a). Dans le second cas, on parle de champignons lignicoles, ou « de décoloration ». On y retrouve des moisissures responsables du bleuissement, ainsi que quelques champignons d'échauffures, dont l'action peut se transformer en pourriture si les conditions de leur développement ne sont pas modifiées ou si elles s'accentuent. Les moisissures n'ont en réalité pas de statut officiel dans la classification générale des champignons. Elles constituent un groupement hétérogène d'organismes microscopiques liés à une altération visible des matériaux (CSHPF 2006, 7-8).

De Mets, *et al.* 2022 ; Harper et Lynch 1981 ; Klaus Sedlbauer 2001; 2001; Sedlbauer K. 2013; Viel 2018; Viel *et al.* 2019; Viel 2019 ; Zirkelbach et Tanaka 2021 ; S. Marceau, Caré, et Lesage 2016) :

- les niveaux de vulnérabilité diffèrent selon les matières premières et les produits transformés (chanvre, paille, fibre de bois, etc.) ;
- les compositions chimiques et structurelles des divers IBS expliquent les différences de leurs performances hydrothermiques (notamment les différents points de saturation des fibres (PSF) en eau), selon l'origine et la proportion de leurs constituants (cellulose, hémicellulose, lignine, etc.).

En dehors de l'humidité, de nombreux autres facteurs conditionnent l'apparition et le développement de moisissures à la surface ou au sein des IBS. La caractérisation de cette dégradation biologique, son évaluation et sa prédition ont été abordées pour présenter la manière dont sont évalués la pertinence de l'usage des biosourcés et leur niveau de vulnérabilité face au risque de moisissure.

Le risque de décomposition fongique dépend de l'environnement dans lequel un matériau est appliqué et de la résistance du matériau : un aspect clé est la façon dont les conditions environnementales spécifiques affectent la croissance mycélienne elle-même. Pour déterminer comment différentes caractéristiques des matériaux affectent le risque de décomposition des matériaux biosourcés, plusieurs méthodes ont été étudiées, soulignant l'influence de la chimie des matériaux, de la dynamique de l'humidité et de la structure sur la sensibilité fongique (De Ligne, Vidal-Diez de Ulzurrun, *et al.* 2019 ; De Ligne *et al.* 2020 ; De Ligne 2021a).

Concernant les essais de résistance à la prolifération fongique et à la dégradation, de très nombreux biais et limites ont été exprimés, tant sur la fiabilité des prélèvements que lors de la culture des échantillons contaminés et leurs protocoles de test très variés, ou encore de l'analyse des résultats des essais pour l'évaluation de la prolifération fongique (Tobon Monroy 2020 ; Tobon, Andres, et Locoge 2020 ; De Ligne *et al.* 2020 ; De Ligne 2021a ; Evy Vereecken, Vanoirbeek, et Roels 2015 ; E. Vereecken, Vanoirbeek, et Roels 2015a). Sachant que des études montrent que certains IBS (ouate cellulose, fibre de bois ou de chanvre) ont des niveaux de résistance très élevés, même parfois dans des conditions extrêmement favorables à la croissance fongique (par exemple : HR ≥ 95 % et T=25°C) (Scheiding et Plaschkies 2020a ; Zirkelbach, Schöner, Tanaka, Sonntag, Ruisinger, Conrad, Stöcker, De Mets, *et al.* 2022 ; Pernilla Johansson *et al.* 2020 ; Klaus Sedlbauer *et al.* 2011 ; Zirkelbach et Tanaka 2021). Comme également le chaux-chanvre qui ne montre pas de croissance fongique (Guillaume Delannoy 2018 ; S. Marceau, Caré, et Lesage 2016) dans une gamme de conditions représentatives, ou encore la paille, même si elle peut être plus sensible (variant de plus selon son origine : celle de seigle étant plus résistante que celle du blé) (Klaus Sedlbauer *et al.* 2011).

Ces résultats sont largement liés à l'hygroscopicité et à la capillarité des matériaux lignocellulosiques dont les caractéristiques (structurelles, anatomiques et chimiques) de leurs constituants leur confèrent un pouvoir de tampon hydrique, de redistribution de l'humidité et de séchage. Il a été démontré dans plusieurs études (Kopecky, Staněk, et Tywoniak 2020 ; Tywoniak, Staněk, et Richter 2019b) comparant plusieurs isolants biosourcés et non biosourcés en contact avec des nez de poutres en situation confinée. Par exemple⁹⁵,

⁹⁵ Plusieurs dispositifs comprenant un montant en bois massif stabilisé stockées à 98 % HR et 23 °C pendant 2 mois et des isolants stockés à 53 % HR et 23 °C pendant 2 mois. Dans cette étude, l'idée était (i) de simuler la réaction de l'ensemble bois / isolant, où la source d'eau provient du bois (scénario où une fuite surviendrait d'une volige en toiture, ou bien

dans le cas d'un système constructif où un élément de structure en bois aurait subi un excès d'humidité et serait en contact avec divers isolants dans une enveloppe étanche (donc sans variation de masse mais uniquement un déplacement d'eau au sein de la paroi) et à température fixe de 23°C, le risque de développement fongique est fort avec une laine minérale. Alors que dans ce même contexte défavorable, avec les isolants biosourcés (ouate de cellulose et fibre de bois), le taux d'HR à proximité du bois reste inférieur à 75 % (entre 70,8 et 74,6 % HR), limitant toute dégradation.

Selon l'orientation des fibres, la nature du bois, le système constructif et dans les simulations et les contextes les plus défavorables, il a néanmoins été montré (Enertech SCOP 2018) que pour certains bois étudiés (fortement hygroscopiques et relativement résistants à la diffusion de la vapeur), il y a des cas où la laine de bois (hygroscopique) en contact avec le bois d'œuvre pouvait entraîner une accumulation d'humidité et un risque de croissance fongique si l'hygroscopicité de l'IBS (effet d'éponge) n'est pas bien gérée (capacité de séchage du mur, etc.). Ainsi, lorsque cette hygroscopicité et cette capacité de séchage ne sont pas appréhendées et intégrées correctement dans les systèmes constructifs, en d'autres termes, si l'on ne permet pas aux volumes potentiellement humides de sécher, elles peuvent devenir des points de faiblesse et être à l'origine du stockage d'un excès d'humidité. Cette réflexion en amène une autre concernant les niveaux de risque en lien avec une réelle augmentation de l'humidité des matériaux :

- risque mécanique. Par exemple le tassement de la ouate de cellulose⁹⁶, et conséquemment d'autres problèmes induits (ponts thermiques, condensation, etc.) ;
- diminution des performances thermiques : évolution de la conductivité avec le taux d'humidité, mais le fait de prendre le lambda utile et non le lambda sec pour les études thermiques intègre ce point ;
- risque sanitaire, dans le cas où l'isolant est en contact avec l'air intérieur. Mais dans ce cas on peut estimer qu'il peut sécher. Nous pouvons donc estimer que se trouver dans une telle situation préjudiciable n'est possible que si les espaces de vie sont peu ventilés ;
- voire dégradation du bâtiment par contact et accumulation d'eau sur un élément

dans une ossature ou un caisson en bois). (ii) de mesurer la vitesse de migration de l'humidité depuis le bois vers l'isolant en fonction du temps (iii) et de mesurer comment cette humidité se répartit pendant la phase de redistribution (delta de pression et quantité d'eau entre les deux matériaux) jusqu'à l'équilibre. Plusieurs variantes ont été réalisées : étanchéité totale, avec revêtements capillaire ou non, etc. Dans le système étanche l'humidité s'est répandue rapidement, mais la diminution de la quantité d'eau dans le bois varie très peu avec la laine minérale (qui n'absorbe quasi aucune humidité) : aucun effet de tampon hydrique n'a été observé. Le taux d'humidité ne varie pas non plus de manière significative et le taux final atteint est critique. Le taux d'HR au niveau de tous les capteurs, mais surtout celui à proximité du bois, est donc à risque car il demeure supérieur à 85 % (80 % étant une limite générique donnée pour le début de croissance fongique pour les bois les plus courants). A noter que dans les systèmes non étanches, soit avec des parements favorisant le séchage sur l'extérieur, ce mauvais résultat de la laine minérale change pour le réservoir aux seuls isolants fermés à la vapeur.

⁹⁶ Nous n'avons pas abordé ici davantage la ouate de cellulose car nombre d'études montrent qu'elle est réellement très résistante à la croissance fongique. La concernant, le premier risque lié à un excès d'humidité serait donc mécanique.

structurel sensible.

3. IBS : quelle sinistralité recensée ?

Selon leur composition et la part de matières premières connexes associées (dont synthétiques), de nombreux matériaux de construction biosourcés sont (dans une certaine mesure) biodégradables. C'est une excellente qualité à la fin de la durée de vie ou de service d'un matériau, car il résout en partie les problèmes de déchets du bâtiment, mais cette caractéristique est nettement moins souhaitable pendant son utilisation.

De nombreuses études rapportent que lorsqu'un matériau de construction organique est exposé à des conditions d'humidité et de température favorables, ainsi qu'à des organismes dégradants, il peut devenir la cible de contaminations microbiennes importantes et sa durée de vie fonctionnelle et esthétique peut diminuer (T. Verdier, Bertron, et Johansson 2016 ; De Ligne 2021a). Il est également avéré que les conditions d'humidité, de température et de nutrition optimales peuvent être atteintes dans des bâtiments, anciens ou non, lorsqu'ils sont mal isolés, mal ventilés, mal chauffés et/ou qu'ils ont subi des dégâts des eaux (ANSES 2016). Mais il est également stipulé dans la littérature que cette prolifération n'est pas le fait d'un matériau ou d'un groupe de matériaux, y compris des isolants biosourcés (« Biosourcés - Table Ronde Nationale Technique Et Juridiquecr-163e TRNTJ » 2018, 9 ; « Observatoire de la Qualité de la Construction : l'AQC présente son Flop 10 annuel » 2021). D'autres travaux prouvent par ailleurs l'occurrence – même si elle est moindre - de prolifération fongique au sein d'autres types de matériaux (Guillaume Delannoy 2018 ; Virginie Wiktor 2008 ; V. Wiktor, De Leo, *et al.* 2009).

Les études des désordres et des sinistres recensés en France (notamment les déclarations des assurances, les rapports annuels de l'observatoire de l'AQC, les Sycodés) (« Biosourcés - Table Ronde Nationale Technique Et Juridiquecr-163e TRNTJ » 2018, 9 ; « Observatoire de la Qualité de la Construction : l'AQC présente son Flop 10 annuel » 2021), montrent que l'origine des sinistres liés à l'eau ne résident pas dans les matériaux mais qu'ils relèvent de défauts de conception, de prescription, de mise en œuvre et d'entretien. Pourtant, bien que l'utilisation des matériaux biosourcés augmente très nettement en raison de leurs nombreux avantages reconnus⁹⁷ et leur réponse aux exigences et enjeux de la RE 2020, leur part de marché reste encore faible au regard des produits conventionnels. Différents freins à leur développement entrent en ligne de compte, comme cela a été vu précédemment, l'un d'eux est la méconnaissance de leurs caractéristiques spécifiques et des désordres que leur mauvais emploi peut engendrer, précisément en raison de cette méconnaissance. (Galmiche 2016 ; DREAL 2013).

4. Pourri ? Moisi ? Dégradé ?

Malgré la croissance des IBS sur le marché, l'ITI en biosourcés ne va pas de soi. Le frein majeur avancé dans la littérature est leur sensibilité à l'eau. Le risque de pourrissement réel d'un matériau, c'est-à-dire de décomposition fongique ultime, dépend des conditions environnementales auxquelles est soumis ce matériau et au degré de résistance fongique de ce dernier (son caractère fongistatique). Il convient également de souligner ici que, selon la destination du matériau, le risque de dégradation n'est pas égal aux conséquences d'une défaillance potentielle, lesquelles sont par exemple beaucoup plus préjudiciables dans les

⁹⁷ Site du gouvernement : <https://www.ecologie.gouv.fr/materiaux-construction-biosources-et-geosources>

applications porteuses que dans les utilisations non structurelles, telle que l'isolation (De Ligne 2021a).

La problématique n'est pas de savoir si ces matériaux sont putrescibles, mais dans quelles conditions ils risquent de présenter des risques de moisissure et jusqu'à quel point ceux-ci peuvent être synonymes de dégradation réelle ou de risque sanitaire. Des recherches soulignent ainsi qu'une attaque fongique d'IBS n'entraîne pas systématiquement leur détérioration (Zirkelbach et Stöckl 2021; Scheiding et Plaschkies 2020a; Zirkelbach, Schöner, Tanaka, Sonntag, Ruisinger, Conrad, Stöcker, De Mets, *et al.* 2022; De Ligne, Vidal-Diez de Ulzurrun, *et al.* 2019 ; Pernilla Johansson, Lång, et Capener 2021; Zirkelbach et Tanaka 2021 ; E. Vereecken, Vanoorbeek, et Roels 2015b; Evy Vereecken, Vanoorbeek, et Roels 2015). Tout d'abord parce que les espèces fongiques responsables des moisissures (superficielles, « lignicoles ») ne sont pas les mêmes que celles responsables de la décomposition par des champignons composteurs (« lignivores »). Ensuite parce que ces différences souches ont des besoins en température, en nutriments et en eau (pour les facteurs principaux) très variables. Certaines peuvent se développer à un niveau de disponibilité ou d'activité en eau⁹⁸ (aw) relativement bas (65-80% HRE⁹⁹) principalement les moisissures, tandis que d'autres ont des besoins importants se rapprochant du régime super-hygroscopique (> 95 % HR) voire saturé (100% HR). Mais, il est à constater et regretter que les études sur ces points sont relativement hétérogènes et les seuils très variables (Alexis Simons 2018; Susan E Anagnos 2011 ; Thomas Verdier 2015 ; Ayerst 1969).

Une nuance cruciale doit ainsi être faite entre « prolifération » de micro-organismes et « dégradation » de l'isolant ou de la structure support (Scheiding et Plaschkies 2020a ; Guillaume Delannoy 2018 ; De Ligne 2021a). Ceci illustre la difficulté de relier le phénomène de moisissure d'un matériau observé lors d'un essai et la moisissure qui peut véritablement apparaître dans la réalité. En effet, des recherches récentes en laboratoire (Guillaume Delannoy 2018 ; De Ligne 2021a) s'accordent sur le fait que les variations d'humidité (par exemple la capacité « séchage » d'un matériau biosourcé en fonction de la diminution de l'humidité relative de son environnement) peuvent inhiber la croissance fongique, concluant également que lorsque ces matériaux sont utilisés dans des conditions usuelles de construction, la maîtrise du comportement des parois peut éviter le risque de contamination voire le stopper. Ces résultats sont mis en perspective avec d'autres projets de recherches caractérisant les comportements hygrothermiques des matériaux et des phénomènes pouvant expliquer comment ce lien d'équilibre entre le monde du « vivant » (les conditions propices de développement fongique, par exemple) et celui du « matériel » (les matériaux et systèmes constructifs) peut être considéré afin d'examiner l'évaluation des facteurs et/ou des dispositifs de résistance au développement de ces micro-organismes. Les dynamiques temporelles d'exposition aux conditions hygrothermiques favorables à la croissance fongique déterminent le développement spatial de cette prolifération (Guillaume Delannoy 2018 ; De Ligne, Vidal-Diez de Ulzurrun, *et al.* 2019 ; Evy Vereecken, Vanoorbeek, et Roels 2015) : en ce qui concerne les conditions fluctuantes, lorsque les conditions varient entre des conditions

⁹⁸ L'activité de l'eau désigne l'eau disponible pour la croissance fongique. Cet indicateur est de fait bien plus important que la teneur en eau pour estimer les risques de dégradation d'un matériau.

⁹⁹ HRE désigne l'humidité relative à l'équilibre d'un matériau (quand son espace intérieur et l'air ambiant ont la même humidité relative).

favorables et non favorables, le délai d'amorçage de la croissance sera plus long, par conséquent, le temps nécessaire à la croissance des moisissures devrait être encore plus long que dans les conditions favorables constantes en laboratoire (Pernilla Johansson, Bok, et Ekstrand-Tobin 2013).

De ce fait, les fluctuations des conditions hydrothermiques au fil du temps (même très courtes), ralentissent en réalité la croissance fongique. Ceci étant, le dimensionnement correct des complexes isolants, en rapport avec leur mur support et les conditions climatiques intérieures reste primordial. En effet, les spores présentes peuvent germer et croître si les conditions requises sont de nouveau réunies (Tobon Monroy 2020 ; Guillaume Delannoy 2018 ; Thomas Verdier *et al.* 2014 ; T. Verdier, Bertron, et Johansson 2016).

Même s'ils ne sont pas souhaitables, il arrive que les risques de **moisissure** fassent partie des processus de construction, notamment avec des apports d'eau lors des travaux. L'objectif est de les limiter au maximum et, si des moisissures surviennent, d'évaluer leur caractère réversible et de convenir de la stratégie à adopter selon cette évaluation. Le **pourrissement**, lui, désigne un état ultime d'une dégradation, état qui ne doit en aucun cas survenir dans le bâtiment, qu'il s'agisse d'isolant biosourcé ou de tout autre matériau.

Une fois les causes de la contamination fongique identifiées et corrigées, plusieurs points peuvent être soulignés :

- si le caractère réversible du moisissement est confirmé : le matériau peut-il retrouver un état acceptable et retrouver ses pleines propriétés ?
- s'il n'est pas réversible, il doit être remplacé, la paroi/structure doit être vérifiée et le dimensionnement de l'enveloppe diagnostiqué et amendé.

Une étude récente effectuée en Allemagne tend à y répondre¹⁰⁰ (Scheiding et Plaschkies 2020a) :

- si les performances thermiques et mécaniques ne sont pas engagées, s'il n'existe pas de risque contigu de dégradation structurelle, ni de contact direct avec l'air intérieur (c'est-à-dire sans mouvements convectifs entre ce matériaux et l'air intérieur), la situation pourrait être considérée comme pérenne :

« Si la couche d'étanchéité à l'air des bâtiments est conçue et exploitée correctement, une infime quantité d'air est alors échangée entre, d'un côté, les couches d'éléments de construction isolées et fermées (cavités) et, de l'autre, les espaces intérieurs. Il est donc très peu probable que l'air intérieur subisse une charge microbienne importante à cause d'une charge de moisissure potentielle provenant de l'isolant qui dépasserait d'un niveau inacceptable la concentration de fond. Le risque pour la santé est très faible. Cependant, les contaminations microbiennes dues à l'humidité et aux dégâts d'eau doivent être traitées d'une manière complètement différente. » (Scheiding et Plaschkies 2020a, 13)

- si l'isolant est en contact avec la structure et que la structure est engagée, un risque existe. Mais si ce n'est pas le cas, les moisissures ne provoquent pas une dégradation entraînant une mise en péril. Dans ces conditions, le risque peut être accepté mais il doit être minimisé. C'est la question du risque qui est mis en avant ici. Si une telle situation survient, il est nécessaire de savoir évaluer les conséquences et quel serait l'impact sur la santé, le bâtiment, etc. :

¹⁰⁰ Nous avons traduit toutes les citations suivantes.

« Les moisissures [lignicoles, contrairement aux champignons lignivores^{101]} ne nuisent pas au matériau de construction lui-même et ne compromettent pas l'intégrité structurelle du matériau isolant¹⁰². Leur pertinence se limite donc aux aspects d'hygiène et de santé.» (Scheiding et Plaschkies 2020a, 14)

- si ces différents points ne sont pas touchés, les auteur·es soulignent qu'il n'y a aucune raison de rendre les dispositifs plus sécuritaires et contraignants :

« La croissance de moisissures ne doit pas être considérée comme une "propriété essentielle" telle que le règlement de l'UE sur les produits de construction la définit. La nécessité de tester la croissance des moisissures (tout comme celle de tester d'autres propriétés) pourrait être déterminée par la mise en œuvre réelle, plutôt que par des tests en laboratoire. » (Scheiding et Plaschkies 2020a, 15)

Ainsi, les exigences concernant le comportement des isolants thermiques face à la croissance fongique pourraient être formulées de manière générale comme suit :

« Les matériaux d'isolation thermique doivent présenter un comportement de croissance fongique garantissant que, dans les constructions de bâtiments correctement exécutées et dans des conditions climatiques normales relatives à la construction, aucun risque pour la santé et aucune perturbation inacceptable ne sont causés dans les espaces intérieurs. Des conditions climatiques normales au regard de la construction peuvent être supposées si les exigences [des règles en vigueur] sont remplies (...) et s'appliquent. »

Une communauté scientifique semble donc signifier qu'il est possible qu'un IBS redevienne « sain » s'il ressort des conditions de croissance fongique, par exemple si le mur a des capacités de séchage suffisantes. Dans ce cas, si un retour dans des conditions « normales » d'usage est envisageable, le mur peut être considéré comme « non-pathologique » si l'isolant est placé derrière une couche étanche à l'air, c'est-à-dire, s'il est confiné dans une paroi / qu'il n'est pas en contact avec l'air intérieur de l'habitat.

5. Caractérisations et modélisations

C. La modélisation

Pour limiter le risque fongique, des approches calculatoires de simulation hygrothermique permettent aujourd'hui d'évaluer les transferts couplés de masse (via l'eau) et de chaleur (via la température) et ainsi l'accumulation d'humidité dans les parois pour prédire le potentiel risque fongique. La réponse transitoire des composants, du point de vue thermique, de l'humidité ou de l'écoulement de l'air, donne des résultats réalistes qui aident les

¹⁰¹ Note personnelle.

¹⁰² Cette assertion est soumise telle quelle en conclusion de l'étude. Elle rejoint les hypothèses d'autres chercheurs considérant que dans des conditions d'utilisation normales, les IBS, même attaqués ponctuellement par des croissances fongiques ne voient pas leurs propriétés se dégrader (De Ligne 2021b). De même, les capacités de protection des IBS sans traitement chimique existent : des recherches sur des traitements thermiques (De Ligne 2021 b ; TYWONIAK, STANĚK, et RICHTER 2018) et biologiques existent (Tobon Monroy 2020 ; Thomas Verdier 2015).

concepteurs à optimiser les performances des bâtiments sur lesquels ils travaillent (Evrard 2008). Mais, plusieurs études montrent que la fiabilité et la robustesse de ces démarches pour la conception ou le contrôle de projets de construction ou de rénovation sont relatives et fortement conditionnées par de nombreux facteurs : des paramétrages logiciels difficilement maîtrisables et des données d'entrée basées sur des caractérisations préalables de matériaux pouvant montrer des variabilités fortes. Concernant ces dernières, les bases de données des matériaux (pris individuellement ou par groupe de matériaux) peuvent être inégales/incertaines/fluctuantes¹⁰³. Les modèles s'appuyant sur celles-ci peuvent ainsi impacter la simulation et la prédiction du risque en omettant certaines propriétés, comme l'anisotropie des IBS.

De plus, la complexité des transferts couplés de masse et de chaleur procède de phénomènes se produisant à l'échelle microscopique et leur traduction en modèles nécessite des simplifications (Claude 2018 ; Mühlsteff et ULg > 2013). La relation entre ces deux échelles constitue une difficulté centrale afin de déterminer un volume pertinent pour que, une fois appliquée une homogénéisation des phénomènes (d'une échelle microscopique à macroscopique), les résultats obtenus soient représentatifs du comportement d'un milieu poreux hétérogène. La séparation des phénomènes dans différentes phases (gazeuse, liquide) implique aussi la définition de coefficients de transferts qui ont été évalués soit expérimentalement, soit à partir de modèles basés sur la morphologie d'une structure poreuse, qui reste délicate à caractériser (Amziane et Arnaud 2013). Ce choix se fait à travers du « volume élémentaire représentatif » (VER).

Dans sa thèse, (Claude 2018, 113) explique aussi que parmi les modèles HAM (Heat, Air, Moisture) les plus connus, différents potentiels moteurs sont utilisés à l'échelle macroscopique¹⁰⁴ (la teneur en eau, la pression capillaire, l'humidité relative), et chacun d'entre eux présente des limites. Par exemple pour les parois multicouches : la variation de la teneur en humidité génère une discontinuité entre les différents matériaux qui composent la paroi. (Ce dernier défaut n'existe pas avec le gradient d'humidité relative, mais sa définition à travers l'isotherme de sorption limite la représentation du domaine super-hygroscopique - > 95% HR)

Ainsi, plusieurs éléments engendrent une complexité à modéliser les transferts hygrothermiques au sein des matériaux biosourcés. Face à la divergence entre les résultats expérimentaux et simulés un grand facteur d'incertitude existe. Par exemple, la plupart des modèles de transferts couplés considèrent les matériaux comme homogènes et continus, alors que certains biosourcés présentent une anisotropie qui ne peut pas toujours être négligée¹⁰⁵ (Evrard 2008).

¹⁰³ Plusieurs études montrent que les performances thermique et hydriques des IBS sont minorées par de nombreux essais de caractérisation : la conductivité thermique est accentuée, tandis que leur perméabilité à la diffusion de vapeur d'eau est diminuée (Thibaut Colinart, PAJEOT, et al. 2021 ; Thibaut Colinart, Pajeot, et al. 2021 ; Thibaut Colinart et Glouannec 2021 ; 2020 ; T. Colinart et al. 2020 ; Vincelas et al. 2019 ; T. Colinart et Glouannec 2022).

¹⁰⁴ Voir à ce sujet une synthèse concernant les différents types de transport (diffusion de vapeur d'eau dans les pores, transfert d'eau liquide par diffusion de surface, de condensation capillaire selon la dimension des pores, etc.) et les différentes lois les régissant dans au sein des deux échelles microscopique et macroscopique (Claude 2018).

¹⁰⁵ Le modèle utilisé dans le logiciel Delphin utilise le potentiel du gradient de pression capillaire, qui permettrait de converger plus rapidement et de travailler avec la courbe de stockage de l'humidité (Claude 2018, 113). De plus, il semblerait que ce logiciel, dans ses

En raison de la forte hygroscopicité de nombreux matériaux biosourcés, certains paramètres cruciaux doivent être ainsi mieux compris pour être intégrés dans les modèles :

- il existe une analyse critique de nouveaux modèles utilisés pour le calcul des effets importants de l'hystérésis sur les transferts de masse et de chaleur dans les matériaux poreux et sur la manière de les intégrer (Lelièvre, Colinart, et Glouannec 2015 ; Berger *et al.* 2020) ;
- l'influence de la teneur en eau sur la plupart des propriétés hygrothermiques.

Au-delà de la complexité des phénomènes physiques simulés, un des freins majeurs à la simulation numérique du comportement des matériaux biosourcés est imputé au manque d'entrée dans les bases de données sur les propriétés hygrothermiques de ces matériaux (Claude 2018 ; Pernilla Johansson, Lång, et Capener 2021 ; Lopez Hurtado, Rouilly, Vandenbossche, *et al.* 2016 ; Lopez Hurtado, Rouilly, Raynaud, *et al.* 2016). Ainsi, l'analyse de la performance globale est délicate, car elle nécessite de faire un lien entre le stockage et le transfert couplé (de chaleur, d'air et d'humidité) qui tienne compte de la durabilité du matériau : une bonne connaissance des phénomènes qui se produisent dans les matériaux poreux ouverts repose donc toujours selon (Evrard 2008) sur le triptyque « simulation » / « test » / « pratique ».

D. Caractérisations hygrothermiques : les limites fortes des protocoles employés pour les isolants biosourcés

La perméabilité à l'air de certains isolants et le lien entre les propriétés hygrothermiques d'un matériau et sa teneur en eau questionnent donc la validité de certains tests de caractérisation pourtant largement utilisés (Claude 2018). Dans une étude visant à évaluer les incertitudes dans la détermination des propriétés de stockage de la chaleur et de l'humidité des matériaux d'isolation en terre allégée (terre et fibres végétales) et de leurs matières premières constitutives (annas de chanvre et terre), les résultats montrent que des incertitudes allant jusqu'à 10 % sont notées pour la capacité thermique et jusqu'à 100 % pour l'isotherme de sorption (Vincelas *et al.* 2019). Cette même étude indique des incertitudes sur la prédiction du comportement hygrothermique d'un mur existant isolé avec ce conglomerat. De fait, différentes méthodes de caractérisation conduisent à des résultats différents puisque leurs protocoles de conditionnement initiaux ne sont pas strictement identiques.

De même, l'essai à la coupelle, essai normalisé (NF EN ISO 12572-2001) largement utilisé pour mesurer la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux de construction poreux engendrerait une sous-estimation de perméabilité à la vapeur réelle des échantillons dans le cas de matériaux peu denses et très perméables à l'air (Thibaut Colinart et Glouannec 2021 ; 2020 ; T. Colinart et Glouannec 2022 ; 2017). Dans une autre étude sur le test de la coupelle humide/sec, (T. Colinart et Glouannec 2022) ont montré que l'humidité relative était rarement la même que la valeur attendue et que l'humidité relative du dessiccant solide utilisé pour contrôler les conditions à l'intérieur du dispositif variait également au fil du temps, ce qui entraînait des erreurs relatives de 5 % à 450 % dans la valeur S_d prévue. Ce résultat confirme la variabilité du test pour d'autres matériaux poreux, comme dans une étude menée pour tester les mesures effectuées sur des isolants en fibre de bois en fonction des dessiccants adsorbants utilisés (Thibaut Colinart et Glouannec 2020). Dans cette expérience menée sur des matériaux de construction très perméables à la vapeur d'eau, les résultats indiquent que l'humidité relative de la partie « sèche » (surveillée à l'intérieur du dispositif), n'atteint

valeurs récentes, permettre d'accepter et de simuler l'anisotropie des milieux (Claude 2018, 120 ; E Vereecken, Janssen, et Roels 2013).

jamais le 0 % HR attendu et que l'état aux conditions limites n'est pas toujours stable. L'impact de ces observations est évalué sur la détermination du facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau et comparé à d'autres sources d'incertitudes.

Le besoin d'améliorer la fiabilité des tests utilisés pour mesurer le comportement hygrothermique et les propriétés des matériaux poreux est ainsi souligné :

- sur leur perméabilité à la vapeur d'eau (Thibaut Colinart et Glouannec 2021 ; Barnaure, Bonnet, et Poullain 2021) ;
- sur les effets de la dépendance à la température de la sorption sur les performances hygrothermiques d'isolants en béton de chanvre (Tran Le *et al.* 2020) ;
- mais aussi sur la variabilité des résultats mesurés entre laboratoires pour des études menées sur ces matériaux poreux (López *et al.* 2017).

Les problèmes liés aux transferts hygrothermiques sont une réalité de terrain dans le bâtiment. Souvent peu maîtrisés, ils sont alors négligés. Ainsi, en sus des raisons liées aux matières premières utilisées, « fabrication », « mise en œuvre » et « caractérisation », prises séparément ou ensemble, rendent difficile l'obtention de valeurs permettant de définir précisément les caractéristiques et les performances hygrothermiques des IBS et leurs seuils de risque de développement fongique. L'importance de l'observation et celle d'effectuer des mesures directes et *in situ* sont donc considérées comme primordiales.

E. Simulation et prédition du risque fongique

1. Aperçu global sur les modèles

La synthèse proposée dans les paragraphes suivants est basée sur plusieurs revues exhaustives et consécutives effectuées par (ANSES 2016 ; Evy Vereecken, Vanoirbeek, et Roels 2015; E. Vereecken, Saelens, et Roels 2011a; Evy Vereecken et Roels 2012; E. Vereecken, Vanoirbeek, et Roels 2015a) sur les différents modèles existants.

Dans le cadre d'une approche prédictive du développement des moisissures sur les matériaux, plusieurs modèles de croissance ont été étudiés et validés. Le plus simple des modèles de prédition de croissance des moisissures constitue les courbes isoplèthes.

Afin d'évaluer la durabilité des différents matériaux de construction, le risque de germination, la présence et le développement fongique sont modélisés selon plusieurs facteurs déterminants : l'humidité, la température, le temps et le type de matériau face à ce risque. Les modèles sont aussi des outils pour simuler l'état d'avancement de la moisissure dans des conditions différentes sur les surfaces et à l'intérieur des matériaux (ANSES 2016), mais cela implique que leurs propriétés physiques (capacité hydrique, capillarité, diffusion de vapeur d'eau, etc.) soient correctement intégrées aux simulations. Parmi ces modèles, deux sont très connus et utilisés, les modèles VTT et Biohygrothermiques IBP :

- le modèle VTT, présenté au chapitre 3.1.A, est un modèle validé de manière expérimentale fondé sur des découvertes empiriques et des observations visuelles de croissance fongique. Il propose une échelle d'évaluation du risque très compréhensibles en 6 niveaux appelée « Index de moisissure », lesquels décrivent l'intensité de la croissance sur une surface ;

- le modèle Biohygrothermique IBP modélise la croissance fongique des hyphes¹⁰⁶. Cependant, comme la croissance des hyphes est incolore jusqu'à ce qu'elles se teintent de pigments liés au substrat, elles sont souvent invisibles à l'œil nu. Et il n'est pas aisément de savoir à partir de quelle longueur la croissance fongique deviendra une nuisance, ni si elle sera d'une souche destructrice. (Sedlbauer, 2011)

Ainsi, tant en raison de la saisie de leurs données d'entrée que du traitement de celles-ci pour l'évaluation de la croissance (en mm de croissance des hyphes VS index de moisissure), ou encore des indicateurs de sortie permettant leur interprétation, ces modèles sont très différents et difficiles à comparer.

Des chercheurs ont contribué au développement du « Biohygrothermal model¹⁰⁷ », un modèle de croissance en régime non permanent (Martin Krus 2005 ; Miroslav Krus *et al.* 2001 ; 2001) dont l'intérêt est de prendre en compte des conditions micro-climatiques, comme un séchage ponctuel, qui peut ralentir la croissance des spores.

2. Analyses critiques

Pour évaluer le risque de moisissure sur les matériaux, différents autres modèles de prédiction de moisissure existent¹⁰⁸, cependant, chacun d'entre eux présente des lacunes, ce qui peut entraîner des conclusions incertaines. Dans leur étude (Evy Vereecken et Roels 2012) montrent de nombreux biais et hypothèses simplificatrices induisant des résultats non représentatifs, c'est-à-dire variables voire contradictoires d'un modèle à l'autre en terme d'intensité et de dynamique de croissance fongique (ANSES 2016).

En 2015, (H. Viitanen *et al.* 2015) proposent une conversion entre les modèles Biohygrothermique et VTT afin de développer un processus de traitement du modèle VTT permettant d'analyser à la fois des résultats numériques provenant de simulations hygrothermiques mais aussi des données expérimentales découlant de mesures. Une classification très limpide en un code tricolore rend l'interprétation des résultats évidente : absence de risque (zone verte), risque probable nécessitant une évaluation spécifique (zone jaune), et risque non acceptable (zone rouge). Néanmoins, cette classification sans nuance pose la question des marges d'erreur ou de sécurité pour les zones proches des limites entre ces catégories.

D'autres recherches soulignent l'importance d'utiliser ces modèles de manière réfléchie ou, tout du moins, avec une distanciation certaine. En 2015, (E. Vereecken, Vanoirbeek, et Roels

¹⁰⁶ Les hyphes sont les éléments constitutifs du jeune mycélium, organe végétatif du champignon.

¹⁰⁷ Intégré au logiciel de simulation WUFI, ce logiciel est couramment utilisé dans les bureaux d'études effectuant des simulations dynamiques de l'humidité au sein des parois.

¹⁰⁸ À titre informatif, les principaux autres modèles existants sont les suivants (ANSES 2016) : IEA Annex 14 (le plus rudimentaire, la consigne en humidité relative est basée sur l'isopèle le plus faible pour la moisissure *Aspergillus versicolor*) ; Time-of-wetness (TOW, un indice de temps nécessaire pour que l'humidité relative soit supérieure à 80 % avec une température d'air de 0 °C) ; Johansson's mould growth (il s'agit du modèle PJ élaboré à partir de mesures sur différents types de matériaux et basés sur l'humidité relative critique, c'est-à-dire la plus basse à laquelle une croissance fongique est observée) ; Fungal index (l'indice fongique indique la capacité qu'a l'environnement à engendrer la croissance de moisissures). (Voir également chapitre 3.1)

2015b) effectuent une analyse critique de l'utilisation des protocoles et des résultats de la recherche expérimentale sur la croissance fongique pour alimenter les bases de données des modèles de prédiction. Cet article présente une évaluation des modèles de prédiction des moisissures basée sur des données comparatives issues de la littérature expérimentale. Bien que les études expérimentales menées constituent l'intrant nécessaire pour le développement des modèles, des sur- et sous-estimations sont présentes sur l'ensemble des modèles. Ils identifient des faiblesses et des imprécisions aussi bien dans la conception et la réalisation des protocoles d'essai expérimentaux que dans la robustesse des modèles, qui sont, de fait, impactés par les données expérimentales.

Dans une autre étude comparative menée en 2021 (Pernilla Johansson, Lång, et Capener 2021), la variabilité des modèles existants est évaluée en comparant aux simulations effectuées par cinq opérateurs indépendants sur cinq modèles les résultats expérimentaux d'échantillons exposés *in-situ* dans plusieurs édifices différents pendant près de trois années. Il s'avère que des modèles statiques offraient selon le cas des résultats plus robustes que les modèles dynamiques. L'objectif visé n'était pas de juger la justesse des modèles ou leur validité mais de souligner, d'un côté la difficulté de connaître et de comprendre précisément ces dynamiques et, de l'autre, l'importance de prendre en compte les biais subjectifs forts induits par les modèles plus complexes du point de vue de l'utilisateur final, c'est-à-dire de celui de l'opérateur.

F. Posture réflexive : la philosophie du Fungi

Le « pourrissement » est un terme fort, voire violent. De plus, il n'arrive jamais dans un bâtiment sain sauf accident et absence de correction des causes (Galmiche 2016 ; S. Marceau, Caré, et Lesage 2016). Il semble donc nécessaire d'inclure ce terme dans un autre contexte sémantique car il provoque, lorsqu'il est utilisé, tout un ensemble de connotations (au sens figuré) et de dénotations (au sens plus littéral). D'un point de vue symbolique, le « pourrissement » désigne la représentation mentale du concept associé au degré ultime d'une dégradation qui n'a jamais lieu dans le fonctionnement « réel » et en conditions « normales » de vie et d'usages d'un bâtiment. Alors que la représentation mentale de la forme et de l'aspect matériel du « pourrissement » fait référence à un élément de nature tout autre que le matériau ainsi signifié lui ayant servi de substrat pour sa croissance.

Or la relation entre le signifiant et le signifié est arbitraire et il n'existe pas de relation naturelle, parce que les propriétés du mot (et des matériaux qu'ils désignent) ne dépendent pas de la nature du signifié (et donc de leur pourrissement). Cette relation est conventionnelle : on a « appris » que les matériaux naturels pourrissaient puisque, dans la nature, ils sont l'objet de dégradation ultime. Les membres d'une communauté linguistique doivent apprendre quels mots correspondent à quelles images. Et si l'on parle de « pourrissement » pour les BS, ce terme est également en un sens performatif, puisque l'on aura inconsciemment tendance à projeter en regardant ces matériaux la dégradation ultime auquel ce terme fait référence.

Cette revue de littérature a notamment permis de souligner le fait que les risques de « pourrissement » versus « moisissures » ne sont pas les mêmes car ils impliquent, à la fois :

- des niveaux d'activité de l'eau (aw) très distincts ;
- des souches fongiques différentes : d'un côté les souches lignivores (destructrices de la cellulose et/ou de la lignine), de l'autre lignicoles (se nourrissant de substances nutritives qui n'impactent pas la résistance mécanique ou la tenue des matériaux).

G. Capitalisation des connaissances : perspectives et ouvertures

Si l'objet de ce travail est d'effectuer un état des connaissances, celui-ci ne peut être que parcellaire et modeste, d'un côté au vu du temps imparti pour sa réalisation, et de l'autre en raison d'une activité scientifique particulièrement riche. En conséquence, une veille scientifique et technique constante sur le sujet semblerait incontournable et une capitalisation des connaissances nécessaire, car les recherches existantes permettraient d'ores et déjà de faire évoluer les pratiques et de dépasser le cadre normatif actuel afin de s'extraire de visions parfois trop surannées, sécuritaires ou dogmatiques. De fait, s'il est difficile de prendre en compte tous les enjeux techniques et scientifiques permettant de circonscrire le développement des moisissures dans le bâti, il est trop aisément, en revanche, d'avancer que les isolants biosourcés sont initiateurs de sinistralité ou responsables de la contamination fongique, en invoquant leur origine naturelle ou la présence préalable de micro-organismes au sein de leurs constituants. Entre certaines postures qui, par prudence, habitude et/ou intérêts complexifient l'usage des IBS en ITI et d'autres qui, par intérêt, croyance et/ou méconnaissance les proposent sans retenue, sans doute existe-t-il un juste milieu sans craindre de désordre. Tout comme la systématisation de l'usage des biosourcés n'est pas pertinente en toutes circonstances, se contenter d'écartier *a priori* des matériaux en raison d'un doute persistant ou d'une croyance, n'est pas davantage satisfaisant. Si des savoir-faire constructifs robustes existent bien sur le terrain dans ce qu'il a de plus concret et que le monde de la recherche fait montre d'une montée en connaissances dans le domaine des biosourcés, le pont entre ces univers reste inachevé. Car si la question que l'on se pose est bien - à défaut de les résoudre - de défricher certains sujets pour aller vers la mise en œuvre opérationnelle des IBS et favoriser une levée des freins qui leur sont opposés, le point de départ de la réflexion est la difficulté qui est éprouvée aujourd'hui à les mettre en œuvre sur le terrain.

Cette revue de littérature souligne par ailleurs que les passerelles actuelles entre les deux mondes « scientifiques » et « bâtiment » sont encore ténues et que cette fragilité s'ancre en partie dans une spécialisation trop cloisonnée et artificielle des savoirs et des connaissances (donc des freins opérationnels), mais également voire surtout dans le cadre normatif. En effet, en France, ce dernier semble ne pas être pleinement adapté à ce qui est connu sur les comportements et échanges hydriques/hygriques au sein des matériaux et la réponse des IBS à celle-ci. De même, le cadre normatif ne prend pas suffisamment en compte la diversité des matériaux (dans leurs propriétés, leurs comportements, leurs sensibilités, etc.) qui existe au sein des isolants biosourcés¹⁰⁹.

Néanmoins, les frontières bougent et des études de plus en plus transversales se font jour sur le sujet. Dans l'état des connaissances acquises lors de la rédaction de ce rapport, et sans taire la pertinence des travaux français présentés précédemment (*Bioterra*¹¹⁰,

¹⁰⁹ C'est d'ailleurs ce point qui a motivé la réalisation de cette revue de littérature, plus exactement le fait que les invitations du guide (SIMHUBAT, 2021) ne diffèrent pas plusieurs classes de vulnérabilité à l'eau des IBS.

¹¹⁰ Bioterra : maîtriser la prolifération microbienne dans des produits biosourcés pour des bâtiments sains et durables : <https://anr.fr/Projet-ANR-13-VBDU-0005>. Consulté le 11.12.2021.

*ACLIBIO*¹¹¹ ou *EmiBio*¹¹²) et l'implication du CSTB, du CEREMA et surtout du groupe de recherche GdR MBS¹¹³, les recherches les plus ambitieuses semblent se situer, tout au moins pour l'Europe, dans les pays scandinaves ainsi qu'en Allemagne où de vastes projets de recherches - associant par ailleurs d'autres pays limitrophes (tels que la Belgique et la République Tchèque) - regroupent institutions publiques, groupes privés, laboratoires de recherche et d'analyse, universités, syndicats professionnels et producteurs de matériaux¹¹⁴.

Ces différents programmes et projets visent à dessiner de nouveaux contours aux périmètres des connaissances actuelles sur les isolants biosourcés et à élaborer de nouvelles approches et stratégies concernant d'un côté leur mise en œuvre et, de l'autre, l'évaluation de leur dégradation (notamment des isolants en ITI). Pour ces derniers, des programmes spécifiques leur sont dédiés. La volonté sous-jacente semble nourrir un changement de regard radical les concernant. Et l'objectif mis en avant viserait une refonte progressiste du cadre normatif européen concernant l'inclusion massive des biosourcés dans la construction. Pour cela, des milliers de pages d'articles et d'études ont été produites (Scheiding et Plaschkies 2020a ; Zirkelbach, Schöner, Tanaka, Sonntag, Ruisinger, Conrad, Stöcker, De Mets, *et al.* 2022 ; Zirkelbach et Stöckl 2021 ; Zirkelbach et Tanaka 2021).

Cette recherche a permis de mettre en regard une réalité du terrain avec un état de l'art scientifique qui dépasse largement les frontières nationales et permet, de fait, une prise de recul offrant d'autres perspectives. En outre, l'idée de ce travail était également, à travers une étude mêlant des aspects normatifs, réglementaires, techniques, physiques et biologiques, de mettre en avant des approches existantes plutôt orientées sur l'acceptation et l'intégration de phénomènes et d'approches davantage ancrées dans le retour d'expérience et une certaine forme d'empirisme. S'appuyer sur les matériaux que l'on connaît le plus depuis plus de 40 à 50 ans (comme la ouate de cellulose, la laine de bois), sur les retours d'expérience, tandis que pour les produits plus récents et pour lesquels moins de connaissances ont été collectées, rester sur une posture un peu plus sécuritaire en continuant néanmoins à tester, expérimenter et capitaliser les savoirs. Ce point est souligné dans de nombreuses études, articles et thèses : le besoin de mesurer et de se confronter au réel dans des travaux réalisés *in situ*. Même si ces dernières sont des études longues et plus coûteuses, c'est un facteur crucial de compréhension des dynamiques au sein de ces matériaux (Borderon, Nussbaumer, et Burgholzer 2016 ; Aurélie Laborel-Préneron *et al.* 2016 ; 2021 ; Alexis Simons 2018; Guillaume Delannoy 2018), **car tout ce qui est fait en laboratoire n'est qu'un aperçu, une ébauche du comportement réel de ces matériaux.**

¹¹¹ Source : <http://www.fibres-energivie.eu/fr/projet/aclibio>. Financé en 2020 pour une durée de 36 mois, il est coordonné par le CEREMA et implique : le CSTB, l'Université Gustave Eiffel, Pouget Consultants, le Pôle de compétitivité Fibres-Energivie et Karibati.

¹¹² Source : <https://www.cerema.fr/fr/actualites/emibio-projet-recherche-emissions-materiaux-biosources>. Consulté le 22/07/2022.

¹¹³ Site internet : <https://gdr-mbs.univ-gustave-eiffel.fr/accueil/>

¹¹⁴ Voir à ce sujet : <https://www.wki.fraunhofer.de/en/research-projects/2016/additional-benefits-of-insulation-materials-made-from-renewable-raw-materials.html>, <https://international.fnr.de/>.

Bibliographie

Face au nombre de ressources consultées, Etienne Samin propose une première sélection de documents, en vert, une seconde en jaune.

Adan, O.G.C. 1994. « On the fungal defacement of interior finishes ». Phdthesis, Eindhoven: The Netherlands.

Al Hallak, Mohamad, Thomas Verdier, Alexandra Bertron, Christine Roques, et Jean-Denis Bailly. 2023. « Fungal Contamination of Building Materials and the Aerosolization of Particles and Toxins in Indoor Air and Their Associated Risks to Health: A Review ». *Toxins* 15 (3): 175. <https://doi.org/10.3390/toxins15030175>.

Amziane, Sofiane, et Laurent Arnaud. 2013. *Les bétons de granulats d'origine végétale : Application au béton de chanvre by Sofiane Amziane ;Laurent Arnaud(2013-05-29)*. Hermes Science Publications. Collection Traité MIM - Mécanique et ingénierie des matériaux. Lavoisier.

Anagnost, S.E. 2011. « Wood Decay, Fungi, Stain and Mold » ». *Oneonta, New-York, Avr, 48*.

Anagnost, Susan E. 2011. « Wood Decay, Fungi, Stain and Mold ». In , 48. Oneonta, New-York.

Andersen, B., J.C. Frisvad, I. Søndergaard, I.S. Rasmussen, et L. S. Larsen. 2011. « Associations between Fungal Species and Water-Damaged Building Materials » ». *App/ Environ Microbiol* 77 (12) : 4180-4188,. <https://doi.org/10.1128/AEM.02513-10>.

Andersson, M A, M Nikulin, U Köljalg, M C Andersson, F Rainey, K Reijula, E L Hintikka, et M Salkinoja-Salonen. 1997. « Bacteria, Molds, and Toxins in Water-Damaged Building Materials ». *Applied and Environmental Microbiology* 63 (2): 387-93. <https://doi.org/10.1128/aem.63.2.387-393.1997>.

ANSES. 2016. « Avis et Rapport de l'Anses relatif aux moisissures dans le bâti ». 2014-SA-0016. ANSES - Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, Alimentation, environnement, travail. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2014SA0016Ra.pdf>.

ASEF. 2012. « Pollution de l'air intérieur de l'habitat. Orientation diagnostique et recommandations ». Association Santé Environnement France. https://www.asef-asso.fr/attachments/1141_Guide_air%20int%C3%A9rieur.pdf.

Ayerst, G. 1969. « The Effects of Moisture and Temperature on Growth and Spore Germination in Some Fungi » ». *Journal of Stored Products Research* 5 (2): 127-141,. [https://doi.org/10.1016/0022-474X\(69\)90055-1](https://doi.org/10.1016/0022-474X(69)90055-1).

Barnaure, Mircea, Stephanie Bonnet, et Philippe Poullain. 2021. « Earth Buildings with Local Materials: Assessing the Variability of Properties Measured Using Non-Destructive Methods ». *Construction and Building Materials* 281 (avril):122613. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122613>.

- Baughman, A., et Edward A. Arens. 1996. « Indoor Humidity and Human Health--Part I: Literature Review of Health Effects of Humidity-Influenced Indoor Pollutants ». <https://escholarship.org/uc/item/5kz1z9cg>.
- Bayon, I. Le, M. Draghi, M. Gabille, M. Préganac, J. Lamoulie, M. Jequel, M. Roger, et M. Kutnik. 2015. « Development of a Laboratory Test Method to Assess the Resistance of Bio-Based Insulation Materials against Moulds ». *Academic Journal of Civil Engineering* 33 (2): 605-12. <https://doi.org/10.26168/icbbm2015.93>.
- Beguin, Hugues, et Nicole Nolard. 1994. « Mould Biodiversity in Homes I. Air and Surface Analysis of 130 Dwellings ». *Aerobiologia* 10 (2): 157-66. <https://doi.org/10.1007/BF02459231>.
- Bellanger, A.-P., G. Reboux, S. Roussel, F. Grenouillet, E. Didier-Scherer, J.-C. Dolphin, et L. Millon. 2009. « Indoor fungal contamination of moisture-damaged and allergic patient housing analysed using real-time PCR ». *Letters in Applied Microbiology* 49 (2): 260-66. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2009.02653.x>.
- Berger, Julien. 2014. « Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments : application des méthodes de réduction de modèle ». Phdthesis, Université de Grenoble. <https://theses.hal.science/tel-01127189>.
- Berger, Julien, Thomas Busser, Thibaut Colinart, et Denys Dutykh. 2020. « Critical Assessment of a New Mathematical Model for Hysteresis Effects on Heat and Mass Transfer in Porous Building Material ». *International Journal of Thermal Sciences* 151 (mai):106275. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106275>.
- Bex, Valérie, Marjorie Boissier, Christine Fabre, Olivier Meunier, Annie Mouilleseaux, Nicole Nolard, Gabriel Reboux, Enric Robine, et Marie-France Roquebert. 2007. « Contaminations fongiques en milieux intérieur. Diagnostic : effets sur la santé respiratoire conduites à tenir ». Paris : Conseil Supérieur d'Hygiène Publique De France, Groupe de travail « moisissures dans l'habitat. https://aldeau.com/description_ouvrage.php?id=30.
- Bianco, Lorenza, Valentina Serra, Stefano Fantucci, Marco Dutto, et Marco Massolino. 2015. « Thermal insulating plaster as a solution for refurbishing historic building envelopes: First experimental results ». *Energy and Buildings*, Special Issue: Historic, historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality, 95 (mai):86-91. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.016>.
- « Biosourcés - Table Ronde Nationale Technique Et Juridiquecr-163e TRNTJ ». 2018. décembre 12. <http://cneaf.fr/wp-content/uploads/2018/12/CR-163eTRNTJ-du-25-octobre-2018.pdf>.
- Biseniece, Edite, Ritvars Freimanis, Reinis Purvins, Armands Gravelsins, Aivars Pumpurs, et Andra Blumberga. 2018. « Study of Hygrothermal Processes in External Walls with Internal Insulation ». *Environmental and Climate Technologies* 22 (1): 22-41. <https://doi.org/10.1515/rtuect-2018-0002>.
- Blumberga, Andra, Kristaps Kass, Edite Kamendere, Gatis Žogla, Agris Kamenders, Dagnija Blumberga, Armands Grāvelsiņš, et al. 2016. « State of the Art on Historic Building Insulation Materials and Retrofit Strategies ». WP1 RIBuild, 637268, D1.2. http://ribuild-web.sbi.aau.dk/sites/default/files/RIBuild_D1.2_1.0.pdf.
- Borderon, Julien, P Nussbaumer, et J Burgholzer. 2016. « On-site assessment of hygrothermal performance of historic wall before and after retrofitting with insulation ». In

EECHB 2016, 234-40. Proceedings. Bruxelles, Belgium : Belgian building research Institute. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01615891>.

Borsch-Laaks, Robert, et Paul Simons. 2012. « Rundumerneuerung eines Fachwerkgebäudes - Innendämmung und Feuchteschutz bei der Sanierung ». *Quadriga* 6/2012, 2012. <https://docplayer.org/75361743-Rundumerneuerung-eines-fachwerkgebaeudes-innendaemmung-und-feuchteschutz-bei-der-sanierung.html>.

Boudih, Sarah. 2011. « Identification des moisissures et de leurs métabolites secondaires colonisant des supports papiers : évaluation de la toxicité sur des cellules épithéliales respiratoires in vitro ». Phdthesis, Université Paris-Est. <https://theses.hal.science/tel-00781807>.

Branders, Aline, Arnaud Evrard, et André De Herde. 2010. « ISOLIN : Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines ». Guide d'aide à la conception. Cellule de recherche Architecture et Climat, Laboratorium Bouwfysica de la KUL (Katholieke Universiteit Leuven), le Service des Milieux Continus de l'ULB (Université Libre de Bruxelles) et le CTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction). <https://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/espace-documentaire/isolin-isolation-thermique-linterieur-des-murs-existants-en-briques-pleines>.

Brischke, Christian, Rolf Bayerbach, et Andreas Otto Rapp. 2006. « Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products ». *Wood Material Science & Engineering* 1 (3-4): 91-107. <https://doi.org/10.1080/17480270601019658>.

Brischke, Christian, et Dennis Jones, éd. 2017. « 4 - Protection of the Bio-Based Material ». In *Performance of Bio-Based Building Materials*, 187-247. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100982-6.00004-5>.

Brown, A D. 1976. « Microbial water stress ». *Bacteriological Reviews* 40 (4): 803-46. <https://doi.org/10.1128/br.40.4.803-846.1976>.

Buttner, Mark P., Patricia Cruz, Linda D. Stetzenbach, et Tracy Cronin. 2007. « Evaluation of Two Surface Sampling Methods for Detection of *Erwinia herbicola* on a Variety of Materials by Culture and Quantitative PCR ». *Applied and Environmental Microbiology* 73 (11): 3505-10. <https://doi.org/10.1128/AEM.01825-06>.

C. Brischke, D.Jones. 2017. « 5 - Performance of the Bio-Based Materials » ». In *Performance of Bio-Based Building Materials*, 249-333. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100982-6.00005-7>.

Caudron, Cécile, Olivier Lemître, Samuel Gosset, et Lucie Deroo. 2022. « EmiBio. Emissions des matériaux biosourcés. Rapport final – Synthèse ». Bron : Cerema. <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/595876/emibio-emissions-des-materiaux-biosources-rapport-final>.

Center for Biofilm Engineering. s. d. « Biofilm Basics: Section 1 - Center for Biofilm Engineering | Montana State University ». Montana State University, Center for Biofilm Engineering. Consulté le 22 mai 2024. https://biofilm.montana.edu/biofilm-basics/what_are_biofilms.html.

Chabriac, Pierre-Antoine. 2014. « Mesure du comportement hygrothermique du pisé ». These de doctorat, Vaulx-en-Velin, Ecole nationale des travaux publics : ENTPE ; CNRS - LTDS (UMR 5513). <https://theses.hal.science/tel-01413611>.

- Clarke, J. A, C. M Johnstone, N. J Kelly, R. C McLean, J. A anderson, N. J Rowan, et J. E Smith. 1999. « A technique for the prediction of the conditions leading to mould growth in buildings ». *Building and Environment* 34 (4): 515-21. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(98\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(98)00023-7).
- Claude, Sophie. 2018. « Étude expérimentale et numérique de solutions basées sur les éco-matériaux pour la rénovation thermique du patrimoine bâti urbain ». These de doctorat, Génie civil, Toulouse, INSA. <https://theses.hal.science/tel-01884760>.
- Colinart, T., et P. Glouannec. 2017. « Temperature Dependence of Sorption Isotherm of Hygroscopic Building Materials. Part 1 : Experimental Evidence and Modeling ». *Energy and Buildings* 139 (mars):360-70. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.082>.
- _____. 2022. « Accuracy of Water Vapor Permeability of Building Materials Reassessed by Measuring Cup's Inner Relative Humidity ». *Building and Environment* 217 (juin):109038. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109038>.
- Colinart, T., P. Glouannec, M. Bendouma, et P. Chauvelon. 2017. « Temperature Dependence of Sorption Isotherm of Hygroscopic Building Materials. Part 2 : Influence on Hygrothermal Behavior of Hemp Concrete ». *Energy and Buildings* 152 (octobre):42-51. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.016>.
- Colinart, T., D. Lelievre, et P. Glouannec. 2016. « Experimental and Numerical Analysis of the Transient Hygrothermal Behavior of Multilayered Hemp Concrete Wall ». *Energy and Buildings* 112 (janvier):1-11. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.027>.
- Colinart, T., T. Vincelas, H. Lenormand, A. Hellouin de Ménilus, E. Hamard, et T. Lecompte. 2020. « Hygrothermal Properties of Light-Earth Building Materials ». *Journal of Building Engineering* 29 (mai):101134. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101134>.
- Colinart, Thibaut, Mathieu Bendouma, et Patrick Glouannec. 2019. « Simulation du comportement hygrothermique d'une façade opaque ventilée de bâtiment ». In .
- Colinart, Thibaut, et Patrick Glouannec. 2020. « On the importance of desiccant during the determination of water vapor permeability of permeable insulation material ». In *E3S Web of Conferences*. Vol. 172. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017214003>.
- _____. 2021. « Water vapor permeability of building materials : improved analysis of dry cup experiment ». In . <https://doi.org/10.14293/ICMB210017>.
- _____. 2022. « Accuracy of water vapor permeability of building materials reassessed by measuring cup's inner relative humidity ». *Building and Environment* 217 (avril):109038. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109038>.
- Colinart, Thibaut, M. PAJEOT, Théo Vincelas, A.Helloin de Ménilus, et Thibaut Lecompte. 2021. « Thermal conductivity of biobased insulation building materials measured by hot disk: Possibilities and recommendation ». *Journal of Building Engineering* 43 (juin):102858. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102858>.
- Colinart, Thibaut, Mathilde Pajeot, Théo Vincelas, Arthur Hellouin de Ménilus, et Thibaut Lecompte. 2021. « How Reliable is the Thermal Conductivity of Biobased Building Insulating Materials Measured with Hot Disk Device? » In . <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.287>.

Collet, Florence, Julien Chamoin, Sylvie Pretot, et Christophe Lanos. 2013. « Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes ». *Energy and Buildings* 62 (juillet):294-303. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010>.

Construction & Bioressources. 2012. « Etat des lieux des connaissances actuelles sur le fonctionnement hygrothermique des matériaux biosourcés ». Document Technique.

Construction & Bioressources. https://www.envirobat-oc.fr/IMG/pdf/c_b_-_doc_technique_hygrothermie_des_materiaux_biosources_dans_la_construction_-_decembre_2012.pdf.

Corry, J.E.L. 1987. « Relationships of Water Activity to fungal Growth (Chap 2) ». In *Food and beverage mycology*, édité par Larry R. Beuchat, Springer, 51-100. Westport, Conn. (USA) Avi Pub.

<https://books.google.fr/books?id=vMpVKtRLht4C&dq=Food+and+Beverage+Mycology+1987>

Costerton, J W, Z Lewandowski, D DeBeer, D Caldwell, D Korber, et G James. 1994. « Biofilms, the Customized Microniche ». *Journal of Bacteriology* 176 (8): 2137-42. <https://doi.org/10.1128/jb.176.8.2137-2142.1994>.

CSHPF. 2006. « Contaminations fongiques en milieux intérieur, Diagnostic : effets sur la santé respiratoire conduites à tenir ». Conseil Supérieur d'Hygiène Publique De France, Groupe de travail « moisissures dans l'habitat ». https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/Contaminations_fongiques_en_milieux_interieurs.pdf.

CSTB. 2015. « Moisissures dans votre logement ? Les éliminer en toute sécurité. Guide Pratique ». Santé.gouv.fr, Centre scientifique et technique du bâtiment. https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/guide-moisissures-cstb_2015.pdf.

———. 2021. « SimHuBat : Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiment ». PACTE - Programme d'action pour la qualité de la construction et de la transition énergétique. CSTB-Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. <https://www.programmepacte.fr/doc/determination-des-hypotheses-pour-les-simulations-de-transferts-couples-temperature-humidite>.

CSTB - GS 20. 2021. « Isolants à base de fibres végétales ou animales : Produits isolants destinés à l'isolation thermique par l'intérieur ». Guide technique spécialisé pour la constitution d'un dossier de demande d'Avis Technique Cahier 3713_V3 – Février 2021. Champ-sur-Marne : CSTB-Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. <https://www.ccfat.fr/groupes-specialises/telecharger/3713-v3-gts-isolants--base-de-fibres-vgtales-10033/>.

Curling, S. F., B. K. Stefanowski, E. Mansour, et G. A. Ormondroyd. 2015. « Applicability of Wood Durability Testing Methods to Bio-Based Building Materials ». In . [https://research.bangor.ac.uk/portal/en/researchoutputs/applicability-of-wood-durability-testing-methods-to-biobased-building-materials\(ae645bff-7dfb-47ed-8ed6-11b9fc9f709\).html](https://research.bangor.ac.uk/portal/en/researchoutputs/applicability-of-wood-durability-testing-methods-to-biobased-building-materials(ae645bff-7dfb-47ed-8ed6-11b9fc9f709).html).

Damay, J. 2014. « Développement de nouveaux traitements du bois basés sur le procédé d'imprégnation axiale ». Theses, Université de Lorraine. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01751081>.

Davies, David G., Matthew R. Parsek, James P. Pearson, Barbara H. Iglesias, J. W. Costerton, et E. P. Greenberg. 1998. « The Involvement of Cell-to-Cell Signals in the

Development of a Bacterial Biofilm ». *Science* 280 (5361): 295-98.
<https://doi.org/10.1126/science.280.5361.295>.

De Ligne, Liselotte. 2021a. « Fungal Susceptibility of Bio-Based Building Materials ». Phdthesis, Ghent, Belgique: Ghent University. <http://hdl.handle.net/1854/LU-8696441>.

_____. 2021b. « Fungal Susceptibility of Bio-Based Building Materials ». Dissertation, Ghent University. <http://hdl.handle.net/1854/LU-8696441>.

De Ligne, Liselotte, Jan Van den Bulcke, Jan Baetens, Bernard De Baets, et Joris Van Acker. 2020. « Bio-Based Building Materials : How to Unravel the Role of Material Characteristics on Fungal Susceptibility? » In *XV International Conference on Durability of Building Materials and Components, (DBMC 2020), Proceedings*, 239-46. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). <https://doi.org/10.23967/dbmc.2020.195>.

De Ligne, Liselotte, Guillermo Vidal-Diez de Ulzurrun, Jan M. Baetens, Jan Van den Bulcke, Joris Van Acker, et Bernard De Baets. 2019. « Analysis of Spatio-Temporal Fungal Growth Dynamics under Different Environmental Conditions ». *IMA Fungus* 10 (1): 7.
<https://doi.org/10.1186/s43008-019-0009-3>.

De Muynck, W., N. De Belie, et W. Verstraete. 2010. « Antimicrobial Mortar Surfaces for the Improvement of Hygienic Conditions ». *Journal of Applied Microbiology* 108 (1): 62-72.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04395.x>.

Delannoy, G. 2018. « Durabilité d'isolants à base de granulats végétaux », These de doctorat ». Paris Est. <http://www.theses.fr/2018PESC1039>.

Delannoy, Guillaume. 2018. « Durabilité d'isolants à base de granulats végétaux ». These de doctorat, Paris Est. <http://www.theses.fr/2018PESC1039>.

Delannoy, Guillaume, Sandrine Marceau, Philippe Glé, Etienne Gourlay, Marielle Guéguen-Minerbe, Sofiane Amziane, et Fabienne Farcas. 2020. « Durability of Hemp Concretes Exposed to Accelerated Environmental Aging ». *Construction and Building Materials* 252 (août):119043. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119043>.

Dillon, H K, J D Miller, W G Sorenson, J Douwes, et R R Jacobs. 1999. « Review of methods applicable to the assessment of mold exposure to children. » *Environmental Health Perspectives* 107 (suppl 3): 473-80. <https://doi.org/10.1289/ehp.99107s3473>.

DIN. 2022. « Isolation thermique et économie d'énergie en bâtiments immeubles - Partie 8 : Évitement de pousse de moisssures ». Allemagne. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/din-ts-41088/isolation-thermique-et-economie-denergie-en-batiments-immeubles-partie-8-ev/eu176733/332428>.

Doll, S. C. 2002. « Determination of limiting conditions for fungal growth in the built environment ». These de doctorat, Harvard School: Harvard School of Public Health.

D'Orazio, M. 2012. « Materials Prone to Mould Growth » ». *Toxicity of Building Materials, Elsevier*, 334-50. <https://doi.org/10.1533/9780857096357.334>.

D'Orazio, Marco, Gianluca Cursio, Lorenzo Graziani, Lucia Aquilanti, Andrea Osimani, Francesca Clementi, Claude Yéprémian, Vincenzo Lariccia, et Salvatore Amoroso. 2014. « Effects of water absorption and surface roughness on the bioreceptivity of ETICS compared to clay bricks ». *Building and Environment* 77 (juillet):20-28.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.018>.

DREAL. 2013. « Connaissance de la filière des matériaux bio-sourcés pour la construction en Pays-de-la-Loire ». Analyses et connaissance, n° 74. Nantes : DREAL - service intermodalité, aménagement et logement. https://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Etude_filiere_des_materiaux_bio-sources_en_Pays_de_la_Loire.pdf.

Dubois, Samuel, Fionn McGregor, Arnaud Evrard, Andrew Heath, et Frédéric Lebeau. 2014. « An Inverse Modelling Approach to Estimate the Hygric Parameters of Clay-Based Masonry during a Moisture Buffer Value Test ». *Building and Environment* 81 (novembre):192-203. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.018>.

Edmonds, Jason M. 2009. « Efficient Methods for Large-Area Surface Sampling of Sites Contaminated with Pathogenic Microorganisms and Other Hazardous Agents: Current State, Needs, and Perspectives ». *Applied Microbiology and Biotechnology* 84 (juillet):811-16. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2136-z>.

Edmonds, Jason M., Patricia J. Collett, Erica R. Valdes, Evan W. Skowronski, Gregory J. Pellar, et Peter A. Emanuel. 2009. « Surface Sampling of Spores in Dry-Deposition Aerosols ». *Applied and Environmental Microbiology* 75 (1): 39-44. <https://doi.org/10.1128/AEM.01563-08>.

Ellringer, P.J., K. Boone, et S. Hendrickson. 2000. « Building Materials Used in Construction Can Affect Indoor Fungal Levels Greatly ». *AIHAJ - American Industrial Hygiene Association* 61 (6): 895-99. <https://doi.org/10.1080/15298660008984603>.

Evrard, Arnaud. 2008. « Transient Hygrothermal Behavior of Lime-Hemp Materials ». Thèse de doctorat, Louvain : Université Catholique de Louvain. <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:19675>.

Evrard, Arnaud, et André De Herde. 2010. « Hygrothermal Performance of Lime-Hemp Wall Assemblies ». *Journal of Building Physics* 34 (1): 5-25. <https://doi.org/10.1177/1744259109355730>.

Flannigan, B., P. R. Morey, C. Broadbent, S. K. Brown, T. Follin, K. M. Kelly, J. D. Miller, T. Nathanson, D. S. Walkinshaw, et W. C. White. 1996. « ISIAQ Guideline, Taskforce I: Control of moisture problems affecting biological indoor air quality ». *International Society of Indoor Air Quality and Climate, Espoo, Finland*, 70. https://mms.isiaq.org/members/store_product.php?orgcode=ISIA&pid=43593307.

Flannigan, Brian, Robert A. Samson, et J. David Miller, éd. 2017. *Microorganisms in Home and Indoor Work Environments: Diversity, Health Impacts, Investigation and Control, Second Edition*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press.

Forest Products Laboratory. 2007. « Difference between molds and wood destroyers ». US Forest Service. <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fpltn/fpltn-133.pdf>.

Freudenberg, Peggy. 2019. « Robust Internal Thermal Insulation of Historic Buildings ». RIBBuild D3.2. https://www.ribuild.eu/s/RIBBuild_D32_v10-gb36.pdf.

Fung, Frederick, et William G. Hughson. 2003. « Health Effects of Indoor Fungal Bioaerosol Exposure ». *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 18 (7): 535-44. <https://doi.org/10.1080/10473220301451>.

Galmiche, Véronique. 2016. « Isolants biosourcés : points de vigilance ». AQC. <https://qualiteconstruction.com/publication/isolants-biosources-points-de-vigilance/>.

Garat, William, Nicolas Le Moigne, Stéphane Corn, Johnny Beaugrand, Patrick lenny, et Anne Bergeret. 2021. « Swelling and Softening Behaviour of Natural Fibre Bundles under Hygro- and Hydrothermal Conditions ». In *EPNOE 2021 - The 7th International Polysaccharide Conference*. Nantes, France. <https://imt-mines-ales.hal.science/hal-03437068>.

Garat, William, Nicolas Moigne, Stéphane Corn, Johnny Beaugrand, et Anne Bergeret. 2019. « Processus de Gonflement des Fibres Végétales en Conditions Hygro/Hydrothermiques : Détermination des Coefficients d'Hygro/Hydroexpansion ». *Revue des composites et des matériaux avancés* 29 (4) : 225-32. <https://doi.org/10.18280/rcma.290406>.

Garat, William, Monica Francesca Pucci, Romain Leger, Quentin Govignon, Florentin Berthet, Didier Perrin, Patrick lenny, et Pierre-Jacques Liotier. 2021. « Surface energy determination of fibres for Liquid Composite Moulding processes: Method to estimate equilibrium contact angles from static and quasi-static data ». *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 611 (février):125787. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125787>.

Garnier, Géraldine. 2017. « Guide de recommandations techniques HUMIBATEX. Prise en compte des risques hygrothermiques en réhabilitation du bâti existant ». Recherche et expertise. Marne-la-Vallée : CSTB ; Cerema. <https://www.proreno.fr/documents/guide-humibatex>.

Gibson, Angela M., József Baranyi, John I. Pitt, Michael J. Eyles, et Terry A. Roberts. 1994. « Predicting fungal growth: the effect of water activity on *Aspergillus flavus* and related species ». *International Journal of Food Microbiology*, Special Issue Predictive Modelling, 23 (3): 419-31. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(94\)90167-8](https://doi.org/10.1016/0168-1605(94)90167-8).

Glass, Samuel V., Stanley D. Gatland, Kohta Ueno, et Christopher J. Schumacher. 2017. « Analysis of Improved Criteria for Mold Growth in ASHRAE Standard 160 by Comparison with Field Observations ». In *Advances in Hygrothermal Performance of Building Envelopes: Materials, Systems and Simulations*, par Phalguni Mukhopadhyaya et Diana Fisler, 1-27. ASTM International100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. <https://doi.org/10.1520/STP159920160106>.

Gorny, R. L. 2004. « Filamentous Microorganisms and Their Fragments in Indoor Air - a Review ». *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 11 (2). <http://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-article-0b628193-7153-45d3-bc04-9add68f4a254>.

Gostinčar, Cene, Polona Zalar, et Nina Gunde-Cimerman. 2022. « No need for speed: slow development of fungi in extreme environments ». *Fungal Biology Reviews* 39 (mars):1-14. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.11.002>.

Gradeci, Klodian, Nathalie Labonnote, Berit Time, et Jochen Köhler. 2017. « A Probabilistic-Based Approach for Predicting Mould Growth in Timber Building Envelopes: Comparison of Three Mould Models ». *Energy Procedia* 132 (octobre):393-98. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.641>.

Grant, C., C.A. Hunter, B. Flannigan, et A. F. Bravery. 1989. « The Moisture Requirements of Moulds Isolated from Domestic Dwellings ». *International Biodeterioration* 25 (4): 259-284,. [https://doi.org/10.1016/0265-3036\(89\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0265-3036(89)90002-X).

Gutarowska, B., et Z. Żakowska. 2002. « Elaboration and application of mathematical model for estimation of mould contamination of some building materials based on ergosterol content

determination ». *International Biodeterioration & Biodegradation*, Biodel.of Constr. Materials, 49 (4): 299-305. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(02\)00063-X](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(02)00063-X).

Gutarowska, Beata. 2010. « Metabolic Activity of Moulds as a Factor of Building Materials Biodegradation ». *Polish Journal of Microbiology* 59 (2): 119-24.

Gutarowska, Beata, et Małgorzata Piotrowska. 2007. « Methods of mycological analysis in buildings ». *Building and Environment* 42 (4): 1843-50.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.02.015>.

Gutarowska, Beata, Michael Sulyok, et Rudolf Krska. 2010. « A Study of the Toxicity of Moulds Isolated from Dwellings ». *Indoor and Built Environment* 19 (6): 668-75.
<https://doi.org/10.1177/1420326X10378803>.

Halbwachs, Hans, et Josef Simmel. 2018. « Some like it hot, some not – Tropical and arctic mushrooms ». *Fungal Biology Reviews* 32 (3): 143-55.
<https://doi.org/10.1016/j.fbr.2018.04.001>.

Harper, Stephen H. T., et James M. Lynch. 1981. « The Chemical Components and Decomposition of Wheat Straw Leaves, Internodes and Nodes ». *Journal of the Science of Food and Agriculture* 32 (11): 1057-62. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740321103>.

Héberlé, Élodie. 2016. « Synthèse bibliographique des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux isolants biosourcés ». MEDDE/DGALN/DHUP/QC/QC2. Strasbourg : CEREMA. https://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/sites/creba/files/fichiers/2021/09/036_Bati_ancien_biosources_Cerema_Est.pdf.

Helmut, Künzel, Mitterer Christoph, Antretter Florian, et Piot Amandine. 2012. « Revue des standards internationaux pour le contrôle de l'humidité par la simulation hygrothermique de l'enveloppe ». In , 12. Rabat -Maroc.
<https://wufi.de/literatur/K%C3%BCnzel,%20Mitterer%20et%20al%202012%20-%20Revue%20des%20standards%20internationaux%20pour.pdf>.

Hens, H. L.S.C. 1999. « Fungal Defacement in Buildings: A Performance Related Approach ». *HVAC&R Research* 5 (3): 265-80.
<https://doi.org/10.1080/10789669.1999.10391237>.

Hoang, Chi P., Kerry A. Kinney, Richard L. Corsi, et Paul J. Szaniszlo. 2010. « Resistance of green building materials to fungal growth ». *International Biodeterioration & Biodegradation* 64 (2): 104-13. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.11.001>.

Hosseyni Moghaddam, Mahdieh S., Naser Safaie, Jalal Soltani, et Niloufar Hagh-Doust. 2021. « Desert-adapted fungal endophytes induce salinity and drought stress resistance in model crops ». *Plant Physiology and Biochemistry* 160 (mars):225-38.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.022>.

Hukka, A., et H. A. Viitanen. 1999. « A Mathematical Model of Mould Growth on Wooden Material ». *Wood Science and Technology* 33 (6): 475-85.
<https://doi.org/10.1007/s00260050131>.

Imken, Arne, Christian Brischke, Sebastian Kögel, Kim Klein, et Carsten Mai. 2020. « Resistance of different wood-based materials against mould fungi: a comparison of methods ». *European Journal of Wood and Wood Products* 78 (juillet).
<https://doi.org/10.1007/s00107-020-01554-5>.

Joblin, Y. 2011. « Elaboration d'un microsystème d'analyse de l'air destiné à la détection rapide d'un développement fongique dans les espaces clos ». phdthesis, Université Paris-Est. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00696618>.

Johansson, P. 2014. « Determination of the Critical Moisture Level for Mould Growth on Building Materials ».

Johansson, P., G. Bok, et A. Ekstrand-Tobin. 2013. « The Effect of Cyclic Moisture and Temperature on Mould Growth on Wood Compared to Steady State Conditions » ». *Building and Environment* 65 (juillet):178-184,. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.004>.

Johansson, P., A. Ekstrand-Tobin, et G. Bok. 2014. « An Innovative Test Method for Evaluating the Critical Moisture Level for Mould Growth on Building Materials » ». *Building and Environment* 81 (novembre):404-409,. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.002>.

Johansson, P., A. Ekstrand-Tobin, T. Svensson, et G. Bok. 2012. « Laboratory Study to Determine the Critical Moisture Level for Mould Growth on Building Materials » ». *International Biodeterioration & Biodegradation* 73 (septembre):23-32,. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.05.014>.

Johansson, P., L. Lång, G. Bok, et C.-M. Capener. 2020. « Threshold Values for Mould Growth: Critical Moisture Level of 21 Different Building Materials » ». *E3S Web of Conferences* 172 (janvier):20002,. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017220002>.

Johansson, P., L. Lång, et C.-M. Capener. 2021. « How Well Do Mould Models Predict Mould Growth in Buildings, Considering the End-User Perspective? » ». *Journal of Building Engineering* 40 (août):102301,. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102301>.

Johansson, P., I. Samuelson, A. Ekstrand-Tobin, K. Mjörnell, P. Sandberg, et E. Sikander. 2005. « Microbiological Growth on Building Materials - Critical Moisture Levels ». *State of the Art*, Janv.

Johansson, Pär, Stig Geving, Carl-Eric Hagentoft, Bjørn Petter Jelle, Egil Rognvik, Angela Sasic Kalagasisidis, et Berit Time. 2014. « Interior Insulation Retrofit of a Historical Brick Wall Using Vacuum Insulation Panels: Hygrothermal Numerical Simulations and Laboratory Investigations ». *Building and Environment* 79 (septembre):31-45. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.014>.

Johansson, Pernilla, Gunilla Bok, et Annika Ekstrand-Tobin. 2013. « The effect of cyclic moisture and temperature on mould growth on wood compared to steady state conditions ». *Building and Environment* 65 (juillet):178-84. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.004>.

Johansson, Pernilla, Lukas Lång, Gunilla Bok, et Carl-Magnus Capener. 2020. « Threshold values for mould growth: Critical moisture level of 21 different building materials ». *E3S Web of Conferences* 172 (janvier):6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017220002>.

Johansson, Pernilla, Lukas Lång, et Carl-Magnus Capener. 2021. « How well do mould models predict mould growth in buildings, considering the end-user perspective? » *Journal of Building Engineering* 40 (février):102301. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102301>.

Johansson, Pernilla, et Thomas Svensson. 2020. « Predicting Mould Growth on Building Materials- the PJ-Model ». In *E3S Web of Conferences*, édité par J. Kurnitski et T. Kalamees, 172:20001. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017220001>.

- Johansson, Pernilla, Thomas Svensson, et Annika Ekstrand-Tobin. 2013. « Validation of Critical Moisture Conditions for Mould Growth on Building Materials ». *Building and Environment* 62 (avril):201-9. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.01.012>.
- Jones, Dennis, et Christian Brischke, éd. 2017a. « 5 - Performance of the Bio-Based Materials ». In *Performance of Bio-Based Building Materials*, 249-333. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100982-6.00005-7>.
- _____. 2017b. « 7 - Test Methods for Bio-Based Building Materials ». In *Performance of Bio-Based Building Materials*, 385-481. Duxford: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100982-6.00007-0>.
- _____, éd. 2017c. « Performance of Bio-Based Building Materials ». Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04364-7>.
- _____. 2017d. *Performance of Bio-based Building Materials - 1st Edition*. Woodhead Publishing. <https://www.elsevier.com/books/performance-of-bio-based-building-materials/9780081009826>.
- Karoui, Romdhane. 2015. « Le Séchage - Introduction ». Université de Lille - Sciences et Technologies. https://tech-alim.univ-lille.fr/sechage/co/module_Sechage.html.
- Klöšeiko, Paul, Endrik Arumägi, et Targo Kalamees. 2014. « Hygrothermal Performance of Internally Insulated Brick Wall in Cold Climate: A Case Study in a Historical School Building ». *Journal of Building Physics*, mai. <https://doi.org/10.1177/1744259114532609>.
- Klöšeiko, Paul, Targo Kalamees, Endrik Arumägi, et Urve Kallavus. 2015. « Hygrothermal Performance of a Massive Stone Wall with Interior Insulation: An In-situ Study for Developing a Retrofit Measure ». *Energy Procedia*, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015, 78 (novembre):195-200. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.139>.
- Kopecky, P., K. Staněk, et J. Tywoniak. 2020. « Hygro-Thermal Performance of Wooden Beam Ends: Experimental Investigations of Uninsulated and Internally Insulated Brick Wall ». *E3S Web of Conferences* 172 (janvier):01009,. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017201009>.
- Krus, M., et K. Sedlbauer. 2007. « A New Model for Prediction and Its Application in Practice ». <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/357769>.
- Krus, M., K. Sedlbauer, W. Zillig, et H. Kuenzel. 2001. « A New Model for Mould Prediction and Its Application on a Test Roof ». *Janv.*
- Krus, Martin. 2005. « Mold Growth Prediction by Computational Simulation », 27.
- Krus, Miroslav, K. Sedlbauer, W. Zillig, et Hartwig Kuenzel. 2001. « A New Model for Mould Prediction and its Application on a Test Roof », janvier.
- Künzel, Hartwig M. 1995. « Simultaneous heat and moisture transport in building components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters ».
- _____. 2000. « Moisture Risk Assessment of Roof Constructions by Computer Simulation in Comparison to the Standard Glaser-Method ». In , 8. Eindhoven. <https://wufi.de/literatur/K%C3%BCnzel%202000%20-%20Moisture%20Risk%20Assessment%20of%20Roof.pdf>.
- Kutnik, M., E. Suttie, et C. Brischke. 2017. « Durability, Efficacy and Performance of Bio-Based Construction Materials: Standardisation Background and Systems of Evaluation and

Authorisation for the European Market ». In *Performance of Bio-Based Building Materials*, 593-610. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100982-6.00010-0>.

Laborel-Préneron, A. 2018. « Laboratory Test to Assess Sensitivity of Bio-Based Earth Materials to Fungal Growth ». *Building and Environment* 142 (septembre):11-21,. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.003>.

Laborel-Préneron, A., P. Faria, J.-E. Aubert, et C. Magniont. 2021. « Assessment of Durability of Bio-Based Earth Composites ». *Recent Progress in Materials* 03 (avril):1-1,. <https://doi.org/10.21926/rpm.2102016>.

Laborel-Préneron, Aurélie, Jean-Emmanuel Aubert, Camille Magniont, Christelle Tribout, et Alexandra Bertron. 2016. « Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review ». *Construction and Building Materials* 111 (mai):719-34. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119>.

Laborel-Préneron, Aurélie, Paulina Faria, Jean-Emmanuel Aubert, et Camille Magniont. 2021. « Assessment of Durability of Bio-based Earth Composites ». *Recent Progress in Materials* 03 (avril):1-1. <https://doi.org/10.21926/rpm.2102016>.

Laborel-Préneron, Aurélie, Kouka Ouédraogo, Alexis Simons, Matthieu Labat, Alexandra Bertron, Camille Magniont, Christine Roques, Christophe Roux, et Jean-Emmanuel Aubert. 2018. « Laboratory Test to Assess Sensitivity of Bio-Based Earth Materials to Fungal Growth ». *Building and Environment* 142 (septembre):11-21. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.003>.

Lacaze, Isabelle, Stéphane Moularat, Faisl Bousta, Marjorie Draghi, Philippe Silar, et Enric Robine. 2016. « Étude de la dynamique de colonisation microbienne de produits de construction ». *Matériaux & Techniques* 104 (5) : 507. <https://doi.org/10.1051/matech/2016035>.

Lamoulie, J. 2015. « Use of Bio-Based Insulation Materials in Buildings: Modelling of Hygrothermal Conditions in Use – Resistance of a Wood Fibre Material to Moulds According to Climatic Conditions ». *Academic Journal of Civil Engineering* 33 (2, Art. no 2). <https://doi.org/10.26168/icbbm2015.23>.

Lamoulie, J., I. Le Bayon, M. Draghi, M. Roger, C. Pompeo, M. Gabille, M. Préganac, M. Jequel, et M. Kutnik. 2015. « Use of Bio-Based Insulation Materials in Buildings: Modelling of Hygrothermal Conditions in Use – Resistance of a Wood Fibre Material to Moulds According to Climatic Conditions ». *Academic Journal of Civil Engineering* 33 (2): 149-55. <https://doi.org/10.26168/icbbm2015.23>.

Lappalainen, Sanna, Erkki Kähkönen, Päivi Loikkanen, Eero Palomäki, Outi Lindroos, et Kari Reijula. 2001. « Evaluation of priorities for repairing in moisture-damaged school buildings in Finland ». *Building and Environment* 36 (8): 981-86. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00082-2).

Latif, Eshrar, Simon Tucker, Mihaela Anca Ciupala, Devapriya Chitral Wijeyesekera, et Darryl Newport. 2014. « Hygric Properties of Hemp Bio-Insulations with Differing Compositions ». *Construction and Building Materials* 66 (septembre):702-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.021>.

Le Bayon, I. 2015. « Development of a Laboratory Test Method to Assess the Resistance of Bio-Based Insulation Materials against Moulds ». *Academic Journal of Civil Engineering* 33 (2, Art. no 2). <https://doi.org/10.26168/icbbm2015.93>.

Lelièvre, Dylan, Thibaut Colinart, et Patrick Glouannec. 2015. « Modeling the Moisture Buffering Behavior of a Coated Biobased Building Material by Including Hysteresis ». *Energy Procedia*, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015, 78 (novembre):255-60. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.631>.

Leong, S.L., A.D. Hocking, et E.S. Scott. 2006. « Effects of water activity and temperature on the survival of *Aspergillus carbonarius* spores in vitro ». *Letters in Applied Microbiology* 42 (4): 326-30. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2006.01871.x>.

Lopez Hurtado, Pablo, Antoine Rouilly, Christine Raynaud, et Virginie Vandenbossche. 2016. « The Properties of Cellulose Insulation Applied via the Wet Spray Process ». *Building and Environment* 107 (octobre):43-51. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.017>.

Lopez Hurtado, Pablo, Antoine Rouilly, Virginie Vandenbossche, et Christine Raynaud. 2016. « A Review on the Properties of Cellulose Fibre Insulation ». *Building and Environment* 96 (février):170-77. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.031>.

López, O., Isabel Torres, Ana Guimarães, João Delgado, et V. Freitas. 2017. « Inter-laboratory variability results of porous building materials hygrothermal properties ». *Construction and Building Materials* 156 (décembre):412-23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.184>.

Lugauskas, Albinas, Loreta Levinskait, et Dalia Pečiulyt. 2003. « Micromycetes as deterioration agents of polymeric materials ». *International Biodeterioration & Biodegradation* 52 (4): 233-42. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(03\)00110-0](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(03)00110-0).

Marceau, S., S. Caré, et P. Lesage. 2016. « Matériaux biosourcés et naturels pour une construction durable. Champ-sur-Marne ». France : IFSTTAR-CEREMA. <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01711725>.

Marceau, S., P. Glé, M. Gueguen, E. Gourlay, S. Moscardelli, I. Nour, S. Amziane, et L. Abdellaoui. 2015. « Assessment of the Durability of Bio-Based Insulating Materials ». *Academic Journal of Civil Engineering* 33 (2): 198-202. <https://doi.org/10.26168/ICBBM2015.30>.

Marceau, Sandrine, Sabine Caré, et Pilar Lesage. 2016. « Matériaux biosourcés et naturels pour une construction durable ». Synthèse de l'opération de recherche stratégique et incitative MaBioNat. Champ-sur-Marne : IFSTTAR, CEREMA. <https://enpc.hal.science/hal-01711725v1/document>.

Meer, Lucas van der. 2018. « Feuchteverteilung von flüssigen Wasser in Dämmstoffen einer Holzbaukonstruktion ». Bahelorarbeit, Hildesheim/Holzminden/Göttingen: HAWK Hochschule Hildesheim/Holzminden/Göttingen Fakultät Bauen und Erhalten. <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22004216>.

Méheust, Delphine. 2012. « Exposition aux moisissures en environnement intérieur : méthodes de mesure et impacts sur la santé ». Thèse de doctorat, Rennes : Université Rennes 1. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00768444>.

Mendell, Mark J., Anna G. Mirer, Kerry Cheung, My Tong, et Jeroen Douwes. 2011. « Respiratory and Allergic Health Effects of Dampness, Mold, and Dampness-Related Agents: A Review of the Epidemiologic Evidence ». *Environmental Health Perspectives* 119 (6): 748-56. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002410>.

Mets, Timo De, et Antoine Tilmans. 2020. « Evaluation of the Risk of Decay of Wooden Beams Embedded in Internally Insulated Walls by Long-Term Measurements ». *E3S Web of Conferences* 172:01002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017201002>.

Mudarri, D., et W. J. Fisk. 2007. « Public Health and Economic Impact of Dampness and Mold ». *Indoor Air* 17 (3): 226-35. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00474.x>.

Mugnier, J., et G. Jung. 1985. « Survival of Bacteria and Fungi in Relation to Water Activity and the Solvent Properties of Water in Biopolymer Gels ». *Applied and Environmental Microbiology* 50 (1): 108-14. <https://doi.org/10.1128/aem.50.1.108-114.1985>.

Mühlsteff, Sophie. 2013. « Etude hygrothermique de parois dans les bâtiments à haute performance énergétique ». Master en ingénieur civil architecte, à finalité approfondie, Faculté des Sciences appliquées. Université de Liège.
<https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/2419>.

Mühlsteff, Sophie, et Université de Liège- ULg >. 2013. « Etude hygrothermique de parois dans les bâtiments à haute performance énergétique ».
<https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/2419>.

Enertech SCOP. 2018. « Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien - Synthèse bibliographique pour la rénovation performante à destination des concepteurs et des artisans ». OKTAVE. https://www.enertech.fr/wp-content/uploads/modules/catalogue/pdf/45/171221_Etude%20humidite%20b%C3%A2ti%20ancien_vfinale.pdf.

Nielsen, K.F., G. Holm, L.P. Uttrup, et P. A. Nielsen. 2004. « Mould Growth on Building Materials under Low Water Activities. Influence of Humidity and Temperature on Fungal Growth and Secondary Metabolism » ». *International Biodeterioration & Biodegradation* 54 (4): 325-336,. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2004.05.002>.

« Observatoire de la Qualité de la Construction : l'AQC présente son Flop 10 annuel ». 2021. <https://qualiteconstruction.com/communique-de-presse/observatoire-qualite-construction-2021-flop-10-cp-aqc-09-2021/>.

Ojanen, Tuomo, Ruut Hannele Peuhkuri, Hannu Viitanen, Kimmo Lähdesmäki, Juha Vinha, et Kati Salminen. 2011. « Classification of material sensitivity – New approach for mould growth modeling ». *Proceedings of 9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere*, juin.

Ojanen, Tuomo, Hannu Viitanen, Ruut Peuhkuri, Kimmo Lähdesmäki, Juha Vinha, et Kati Salminen. 2010. « Mold growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials: 11th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings, Buildings XI ». In .
<http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=84926522398&partnerID=8YFLogxK>.

Oliva, Jean-Pierre, et Samuel Courgey. 2010. *L'isolation thermique écologique conception, matériaux, mise en œuvre : neuf et réhabilitation*. [2001, Nouvelle édition revue et Augmentée]. Mens : Terre vivante.

Padfield, Tim. 1998. « The Role of Absorbent Materials in Moderating Changes of Relative Humidity ». These de doctorat, Danemark: Department of Structural Engineering and Materials, The Technical University of Denmark.
https://www.conervationphysics.org/phd/tp_phd.pdf.

Paic Lacaze, Isabelle. 2016. « Etude des mécanismes de colonisation des produits de construction par les micromycètes ». These de doctorat, Sorbonne Paris Cité. <https://theses.fr/2016USPCC047>.

Parra, R., et N. Magan. 2004. « Modelling the effect of temperature and water activity on growth of *Aspergillus niger* strains and applications for food spoilage moulds ». *Journal of Applied Microbiology* 97 (2): 429-38. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2004.02320.x>.

Pasanen, A. -L., T. Juutinen, M. J. Jantunen, et P. Kalliokoski. 1992. « Occurrence and moisture requirements of microbial growth in building materials ». *International Biodeterioration & Biodegradation* 30 (4): 273-83. [https://doi.org/10.1016/0964-8305\(92\)90033-K](https://doi.org/10.1016/0964-8305(92)90033-K).

Pasanen, A.-L. 2001. « A Review: Fungal Exposure Assessment in Indoor Environments ». *Indoor Air* 11 (2): 87-98. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2001.110203.x>.

Pasanen, A.-L., S. Rautiala, J.-P. Kasanen, P. Raunio, J. Rantamäki, et P. Kalliokoski. 2000. « The Relationship between Measured Moisture Conditions and Fungal Concentrations in Water-Damaged Building Materials ». *Indoor Air* 10 (2): 111-20. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2000.010002111.x>.

Pasanen, Anna-Liisa, Jukka-Pekka Kasanen, Sirpa Rautiala, Marko Ikäheimo, Jouko Rantamäki, Hannu Kääriäinen, et Pentti Kalliokoski. 2000. « Fungal growth and survival in building materials under fluctuating moisture and temperature conditions ». *International Biodeterioration & Biodegradation* 46 (2): 117-27. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(00\)00093-7](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00093-7).

Piot, Amandine. 2009. « Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique ». Phdthesis, INSA de Lyon. <https://doi.org/10/document>.

Portnoy, Jay M., Charles S. Barnes, et Kevin Kennedy. 2004. « Sampling for indoor fungi ». *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 113 (2): 189-98. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2003.11.021>.

Prescott, Lansing M., Joanne Willey, Linda Sherwood, et Christopher Woolverton. 2013. *Microbiologie [Prescott's Microbiology]*. Traduit par Jacques Coyette et Max Mergeay. 4e éd. Bruxelles : De Boeck.

Qin, Menghao. 2007. « Étude des phénomènes de transfert hygrothermiques dans les parois des bâtiments ». Thèse de doctorat, Université de La Rochelle. <https://theses.fr/2007LAROS196>.

Raiffaud, Christine. 2017. « Annexe 5. L'activité de l'eau (aw) ». In *Produits « bio »*. *De quelle qualité parle-t-on ?*, 3e éd, 192. Éducagri éditions (INESAAE). <https://www.cairn-sciences.info/produits-bio--9791027501427-p-192.htm>.

Raw, G, C. Aizlewood, et P. Warren. 1999. « Indoor Air 99. The 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Volume 4. », janvier. <https://www.aivc.org/resource/indoor-air-99-8th-international-conference-indoor-air-quality-and-climate-volume-4>.

Reiser, Thierry, Tristan Boissonneau, et Stéphane Moteau. 2018. « Migration d'humidité et de vapeur d'eau dans les parois du bâti ancien. Synthèse bibliographique pour la rénovation performante à destination des concepteurs et des artisans ». Pont de Barret : Enertech SCOP, Oktave, Région Grand Est, ADEME. <https://www.enertech.fr/wp->

content/uploads/modules/catalogue/pdf/45/171221_Etude%20humidite%20b%C3%A2ti%20ancien_vfinale.pdf.

Ritschkoff, Anne-Christine, Hannu Viitanen, et Kyösti Koskela. 2000. « The response of building materials to the mould exposure at different humidity and temperature conditions: Healthy Buildings 2000 ». *Healthy Buildings 2000: proceedings*, 317-22.

Ritz, K. 2005. « FUNGI ». In *Encyclopedia of Soils in the Environment*, édité par Daniel Hillel, 110-19. Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00147-8>.

Rode, Carsten. 2005. « Moisture Buffering of Building Materials ». BYG DTU-126 Report. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark. <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/2415500/byg-r126.pdf>.

Rose, Laura, Bette Jensen, Alicia Peterson, Shailen N. Banerjee, et Matthew J. Arduino. 2004. « Swab Materials and Bacillus anthracis Spore Recovery from Nonporous Surfaces ». *Emerging Infectious Diseases* 10 (6): 1023-29. <https://doi.org/10.3201/eid1006.030716>.

Samin, Etienne. 2016. « Rapport technique de capitalisation des résultats de la R&D à mi-parcours. Année 1 ». Mi-parcours. Année 1 Projet PNEEB / TYPHA. VEGETAL-E, Matériaux Biosourcés végétale, animale en éco-construction. CRATerre. <http://www.vegetal-e.com/fr/fiche/document-309/2016-craterre-pneeb-typha-rapport-technique.html>.

Santucci, R., O. Meunier, M. Ott, F. Herrmann, A. Freyd, et F. De Blay. 2007. « Contamination fongique des habitations : bilan de 10 années d'analyses ». *Revue Française d'Allergologie et d'Immunologie Clinique* 47 (6) : 402-8. <https://doi.org/10.1016/j.allerg.2007.02.105>.

Sautour, Marc, Philippe Dantigny, Charles Divies, et Maurice Bensoussan. 2001. « A temperature-type model for describing the relationship between fungal growth and water activity ». *International Journal of Food Microbiology* 67 (1): 63-69. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(01\)00471-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00471-8).

Scheiding, Wolfram, et Katharina Plaschkies. 2020a. « Insulating materials and mould fungi, Created as part of the FNR project “More than just insulation – added value by insulation materials made from renewable resources” ». FKZ 22004216. “More than just insulation – added value by insulation materials made from renewable resources”. Dresden, Germany: IHD - Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH.

_____. 2020b. « Studie- Dämmstoffe und Schimmelpilze ». FNR FNR project 18 S. IHD. https://www.ihd-dresden.de/fileadmin/user_upload/pdf/IHD/wissensportal/projektberichte/IHD-Studie_Daemmstoffe_und_Schimmelpilze_2020-10-29.pdf.

Schmidt, Olaf. 2006. *Wood and Tree Fungi. Biology, Damage, Protection, and Use*. Springer. Berlin: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-32139-X>.

Scott, W. J. 1957. « Water Relations of Food Spoilage Microorganisms ». In *Advances in Food Research*, édité par E. M. Mrak et G. F. Stewart, 7:83-127. Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2628\(08\)60247-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2628(08)60247-5).

Sedlbauer, K. 2001. « Prediction of Mould Fungus Formation on the Surface of and inside Building Components. » ».

Sedlbauer, K., W. Hofbauer, N. Krueger, F. Mayer, et K. Breuer. 2011. « Material Specific Isopleth-Systems as Valuable Tools for the Assessment of the Durability of Building Materials Against Mould Infestation – The “Isopleth-Traffic Light” » ».

Sedlbauer K., Krus M. 2013. « Biohygrothermal Method for the Prediction of Mould Growth: Procedure and Health Aspects ». Text. AIVC. 6 juillet 2013.

<https://www.aivc.org/resource/biohygrothermal-method-prediction-mould-growth-procedure-and-health-aspects>.

Sedlbauer, K., M. Krus, et Klaus Breuer. 2003. « Biohygrothermal Method for the Prediction of Mould Growth: Procedure and Health Aspects ». *Proceedings 7th International Conference (7th-11th December 2003) - National University of Singapore* 1 (janvier):666-72.
<https://www.aivc.org/resource/biohygrothermal-method-prediction-mould-growth-procedure-and-health-aspects>.

Sedlbauer, Klaus. 2001. « Prediction of Mould Fungus Formation on the Surface of and inside Building Components. »

Sedlbauer, Klaus, Wolfgang Hofbauer, Nicole Krueger, Florian Mayer, et Klaus Breuer. 2011. « Material Specific Isopleth-Systems as Valuable Tools for the Assessment of the Durability of Building Materials Against Mould Infestation – The “Isopleth-Traffic Light” », 8.

Simons, A. 2018. « Caractérisation et maîtrise de la prolifération microbienne dans des produits biosourcés pour des bâtiments sains et durables ». Toulouse III : Theses, Université Paul Sabatier. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02366368>.

Simons, Alexis. 2018. « Caractérisation et maîtrise de la prolifération microbienne dans des produits biosourcés pour des bâtiments sains et durables ». Theses, Université Paul Sabatier - Toulouse III. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02366368>.

Squinazi, F. 2002. « La pollution de l'air à l'intérieur des bâtiments (allergènes exclus) ». *Revue Française d'Allergologie et d'Immunologie Clinique* 42 (3) : 248-55.
[https://doi.org/10.1016/S0335-7457\(02\)00145-4](https://doi.org/10.1016/S0335-7457(02)00145-4).

Stefanowski, B. K., S. F. Curling, E. Mansour, et G. A. Ormondroyd. 2015. « Development of a Rapid Screening Method to Determine the Susceptibility to Mould Growth of Novel Construction and Insulation Products ». In .

[https://research.bangor.ac.uk/portal/en/researchoutputs/development-of-a-rapid-screening-method-to-determine-the-susceptibility-to-mould-growth-of-novel-construction-and-insulation-products\(1a8658ac-5757-4d1e-8569-a2bf5b32e5df\).html](https://research.bangor.ac.uk/portal/en/researchoutputs/development-of-a-rapid-screening-method-to-determine-the-susceptibility-to-mould-growth-of-novel-construction-and-insulation-products(1a8658ac-5757-4d1e-8569-a2bf5b32e5df).html).

Stefanowski, B.K., S.F. Curling, et G.A. Ormondroyd. 2017. « A Rapid Screening Method to Determine the Susceptibility of Bio-Based Construction and Insulation Products to Mould Growth ». *International Biodegradation & Biodegradation* 116 (janvier):124-32.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.025>.

Thomson, Andrew, et Pete Walker. 2014. « Durability characteristics of straw bales in building envelopes ». *Construction and Building Materials* 68 (octobre):135-41.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.041>.

Tobon, A.M., Y. Andres, et N. Locoge. 2020. « Impacts of Test Methods on the Assessment of Insulation Materials' Resistance against Moulds ». *Building and Environment* 179 (juillet):106963,. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106963>.

Tobon Monroy, Ana Maria. 2020. « Etude de la potentialité du développement de micro-organismes sur des matériaux d'isolation bio-sourcés et conventionnels utilisés dans la rénovation de batiments : impacts sur la qualité de l'air intérieur ». These de doctorat, Génie des procédés et bioprocédés, Nantes : Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique Bretagne Pays de la Loire. <https://theses.hal.science/tel-02947838>.

Tran Le, Anh D., Driss Samri, Omar Douzane, Geoffrey Promis, Anh T. Nguyen, et Thierry Langlet. 2020. « Effect of Temperature Dependence of Sorption on Hygrothermal Performance of a Hemp Concrete Building Envelope ». In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, édité par Saleem Hashmi et Imtiaz Ahmed Choudhury, 68-77. Oxford : Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10597-1>.

TYWONIAK, Jan, Kamil STANĚK, et Jan RICHTER. 2018. « Redistribution experiment ». In , 28.

Tywoniak, Jan, Kamil Staněk, et Jan Richter. 2019a. « Drying out Experiment. WKI 2019 ». Présentation, avril 15. <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22004216>.

———. 2019 b. « Redistribution Experiment. WKI 2019 ». Présentation, WKI 2019, avril 15. <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22004216>.

Unger, Achim, Arno P. Schniewind, et Wibke Unger. 2001. *Conservation of Wood Artifacts: A Handbook*. Natural Science in Archaeology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-06398-9>.

Vacher, Sébastien, Catalina Hernandez, Claire Bärtschi, et Nathalie Poussereau. 2010. « Impact of paint and wall-paper on mould growth on plasterboards and aluminum ». *Building and Environment* 45 (4): 916-21. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.09.011>.

Van den Bulcke, Jan, Joris Van Acker, et Marc Stevens. 2007. « Laboratory testing and computer simulation of blue stain growth on and in wood coatings ». *International Biodeterioration & Biodegradation* 59 (2): 137-47. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2006.08.009>.

Verdier, T., A. Bertron, et P. Johansson. 2016. « Overview of Indoor Microbial Growth on Building Materials ». Delft, Netherland.

Verdier, T., M. Coutand, A. Bertron, et C. Roques. 2014. « A Review of Indoor Microbial Growth across Building Materials and Sampling and Analysis Methods ». *Building and Environment* 80 (octobre):136-149,. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.030>.

Verdier, Thomas. 2015. « Elaboration de revêtements pour matériaux de construction visant à lutter contre la prolifération microbienne à l'intérieur des bâtiments : efficacité et mode d'action ». These de doctorat, Génie civil, bâtiment, Toulouse : Université Paul Sabatier - Toulouse 3. <http://thesesups.ups-tlse.fr/2880/1/2015TOU30191.pdf>.

Verdier, Thomas, Alexandra Bertron, et Pernilla Johansson. 2016. « Overview of Indoor Microbial Growth on Building Materials ». In , 18 p. Delft, Netherland. https://www.researchgate.net/publication/307904694_OVERVIEW_OF_INDOOR_MICROBIAL_GROWTH_ON_BUILDING_MATERIALS.

Verdier, Thomas, Marie Coutand, Alexandra Bertron, et Christine Roques. 2014. « A Review of Indoor Microbial Growth across Building Materials and Sampling and Analysis Methods ». *Building and Environment* 80 (octobre):136-49. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.030>.

Vereecken, E, H Janssen, et S Roels. 2013. « EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE LOCAL HEAT TRANSFER COEFFICIENT ». In , 23. Vienna, Austria.

Vereecken, E., et S. Roels. 2021. « Hygrothermal Performance of Internally Insulated Masonry Walls with Embedded Wooden Beam Heads: A Field Study on the Impact of Hydrophobisation ». *Journal of Physics: Conference Series* 2069 (1): 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012019>.

- Vereecken, E., D. Saelens, et S. Roels. 2011a. « A Comparison of Different Mould Prediction Models ». *Undefined*. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-comparison-of-different-mould-prediction-models-Vereecken-Saelens/56a9b4320b2c99fa9556cf0e92d91c55cc8ee790>.
- _____. 2011b. « A comparison of different mould prediction models », undefined ». <https://www.semanticscholar.org/paper/A-comparison-of-different-mould-prediction-models-Vereecken-Saelens/56a9b4320b2c99fa9556cf0e92d91c55cc8ee790>.
- Vereecken, E., K. Vanoirbeek, et S. Roels. 2015a. « A Preliminary Evaluation of Mould Prediction Models Based on Laboratory Experiments » ». *Energy Procedia* 78 (novembre):1407-1412,. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.162>.
- _____. 2015b. « Towards a More Thoughtful Use of Mould Prediction Models: A Critical View on Experimental Mould Growth Research » ». *Journal of Building Physics* 39 (2): 102-123,. <https://doi.org/10.1177/1744259115588718>.
- Vereecken, Evy, Hans Janssen, et Staf Roels. 2013. « Experimental Determination of the Local Heat Transfer Coefficient ». In , 751-58. Vienna, Austria: OKK-EDITIONS.
- Vereecken, Evy, et Staf Roels. 2012. « Review of Mould Prediction Models and Their Influence on Mould Risk Evaluation ». *Building and Environment* 51 (mai):296-310. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.003>.
- _____. 2014. « A Comparison of the Hygric Performance of Interior Insulation Systems: A Hot Box–Cold Box Experiment ». *Energy and Buildings* 80 (septembre):37-44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.033>.
- _____. 2019. « Wooden Beam Ends in Combination with Interior Insulation: An Experimental Study on the Impact of Convective Moisture Transport ». *Building and Environment* 148 (janvier):524-34. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.060>.
- Vereecken, Evy, Kristof Vanoirbeek, et Staf Roels. 2015. « Towards a More Thoughtful Use of Mould Prediction Models: A Critical View on Experimental Mould Growth Research ». *Journal of Building Physics* 39 (2): 102-23. <https://doi.org/10.1177/1744259115588718>.
- Viel. 2019. « Resistance to Mold Development Assessment of Bio-Based Building Materials » ». *Composites Part B: Engineering* 158 (février):406-418,. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.063>.
- Viel, Marie. 2018. « Développement de composites bio-sourcés destinés à l'isolation des bâtiments ». These de doctorat, Rennes : Université Rennes 1. <http://www.theses.fr/2018REN1S122>.
- Viel, Marie, Florence Collet, Yann Lecieux, François Marc, Valentin Colson, Christophe Lanos, Atif Hussain, et Mike Lawrence. 2019. « Évaluation de la durabilité de matériaux de construction biosourcés ». *Academic Journal of Civil Engineering* 36 (1): 60-63. <https://doi.org/10.26168/AJCE.36.1.15>.
- Viitanen, H., M. Krus, T. Ojanen, V. Eitner, et D. Zirkelbach. 2015. « Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models » ». *Energy Procedia* 78 (novembre):1425-1430,. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.165>.
- Viitanen, Hannu, Juha Vinha, Kati Salminen, Tuomo Ojanen, Ruut Peuhkuri, Leena Paajanen, et Kimmo Lähdesmäki. 2010. « Moisture and Bio-Deterioration Risk of Building

Materials and Structures ». *Journal of Building Physics* 33 (3): 201-24.
<https://doi.org/10.1177/1744259109343511>.

Vinceslas, Théo, Thibaut Colinart, Hélène Lenormand, Arthur Héllouin de Ménilles, Erwan Hamard, et Thibaut Lecompte. 2019. « Hygrothermal properties of light earth insulation materials: evaluation of uncertainties and consequences ». In , 6. Belfast.

Walker, Rosanne, et Sara Pavía. 2015. « Thermal performance of a selection of insulation materials suitable for historic buildings ». *Building and Environment* 94 (décembre):155-65.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.033>.

Wiktor, V. 2008. « Biodétérioration d'une matrice cimentaire par des champignons : Mise au point d'un test accéléré de laboratoire » ».

Wiktor, V., F. De Leo, C. Urzi, R. Guyonnet, Ph. Grosseau, et E. Garcia-Diaz. 2009. « Accelerated Laboratory Test to Study Fungal Biodeterioration of Cementitious Matrix ». *International Biodeterioration & Biodegradation* 63 (8): 1061-65.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.09.004>.

Wiktor, V., F. Leo, C. Urzi, R. Guyonnet, Ph Grosseau, et E. Garcia-Diaz. 2009. « Accelerated Laboratory Test to Study Fungal Biodeterioration of Cementitious Matrix » ». *International Biodeterioration & Biodegradation* 63 (8): 1061-1065,.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.09.004>.

Wiktor, Virginie. 2008. « Biodétérioration d'une matrice cimentaire par des champignons : Mise au point d'un test accéléré de laboratoire ».

Woese, C R, O Kandler, et M L Wheelis. 1990. « Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. » *Proceedings of the National Academy of Sciences* 87 (12): 4576-79. <https://doi.org/10.1073/pnas.87.12.4576>.

Xie, Yanjun, Callum A. S. Hill, Zaihan Jalaludin, Simon F. Curling, Rajesh D. Anandjiwala, Andrew J. Norton, et Gary Newman. 2011. « The Dynamic Water Vapour Sorption Behaviour of Natural Fibres and Kinetic Analysis Using the Parallel Exponential Kinetics Model ». *Journal of Materials Science* 46 (2): 479-89. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4935-0>.

Zhou, Xiaohai, Dominique Derome, et Jan Cameliet. 2022. « Analysis of Moisture Risk in Internally Insulated Masonry Walls ». *Building and Environment* 212 (mars):108734.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108734>.

Zirkelbach, Daniel, Tobias Schöner, Eri Tanaka, Heike Sonntag, Ulrich Ruisinger, Christian Conrad, Eric Stöcker, Timo de Mets, et al. 2022. « Consistent European Guidelines for Internal Insulation of Building Stock and Heritage ». Final Report IGF-Project 247 EBG / Project Convention no 1810202. Holzkirchen / Dresden / Limelette: IBP, TUD-IBK, BBRI.
https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/CORNET_In2EuroBuild_FinalReport.pdf.

Zirkelbach, Daniel, Tobias Schöner, Eri Tanaka, Heike Sonntag, Ulrich Ruisinger, Christian Conrad, Eric Stöcker, Timo De Mets, et al. 2022. « Consistent European Guidelines for Internal Insulation of Building Stock and Heritage - CORNET Final Report, IN2EuroBuild ».

Zirkelbach, Daniel, et Beate Stöckl. 2021. « Hygrothermal Conditions in Constructions with Natural Fiber Insulation under Critical Climatic and Operation Conditions in Europe ». IBP-Report HTB-038/2021. Valley: Fraunhofer Institute for Building Physics IBP.

Zirkelbach, Daniel, et Eri Tanaka. 2021. « Evaluation of Decay Resistance of Wood Fibre Insulation Based on Hygrothermal Simulation and Comparative Laboratory Tests ». In

Evaluation of Decay Resistance of Wood Fibre Insulation Based on Hygrothermal Simulation and Comparative Laboratory Tests, 2. ScienceOpen. <https://doi.org/10.14293/ICMB210075>.

L'ADEME EN BREF

Au cœur des missions qui lui sont confiées par le ministère de la Transition écologique, le ministère en charge de l'Energie et le ministère en charge de la Recherche, l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - partage ses expertises, coordonne le financement et la mise en œuvre de projets de transformation dans plusieurs domaines : énergie, économie circulaire, décarbonation, industrie, mobilité, alimentation, adaptation et sols.

Elle mobilise les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, et leur donne les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse. Résolument engagée dans la lutte contre le changement climatique et la dégradation des ressources, l'ADEME conseille, facilite et aide au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions. Elle met ses capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un Établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC).

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



EXPERTISES



LOT 5 SENSIBILITE A LA CROISSANCE FONGIQUE DES ISOLANTS BIOSOURCES MIS EN ŒUVRE PAR L'INTERIEUR

L'étude rappelle que le risque fongique est principalement dû à l'**activité de l'eau (humidité)** maintenue au niveau du substrat. Malgré l'atout des Isolants Biosourcés (IBS) — leur **effet de tampon hydrique** —, la **cinétique de séchage** de la paroi est plus déterminante que leur putrescibilité intrinsèque. Une humidité bloquée augmente le risque, quel que soit l'isolant.

Le rapport pose les limites des **outils d'évaluation actuels** (protocoles statiques, modèles), car ils ne parviennent pas à reproduire les **conditions hygrothermiques dynamiques réelles (in situ)**, menant souvent à une surévaluation ou une sous-estimation du risque selon le contexte.

Le Lot 5 démontre que l'intégration des Isolants Biosourcés en Isolation par l'Intérieur est techniquement sécurisable. L'enjeu clé n'est pas la nature du matériau, mais la maîtrise des transferts d'humidité et la capacité de séchage de la paroi. Pour accélérer la transition vers des matériaux écologiques, il est crucial de mettre à jour les outils d'évaluation et d'ancrer dans les pratiques une conception qui garantit la gestion dynamique de l'humidité. L'expertise et la formation sont la garantie d'une rénovation biosourcée performante et durable.