HAL
open science

Projet ADEME ACLIBIO : Etude du vieillissement d'isolants biosourcés dans une perspective de changement climatique

Lucile Soudani, Géraldine Garnier, Matthieu Cosnier, Nicolas Place, Etienne Gourlay

To cite this version:

Lucile Soudani, Géraldine Garnier, Matthieu Cosnier, Nicolas Place, Etienne Gourlay. Projet ADEME ACLIBIO : Etude du vieillissement d'isolants biosourcés dans une perspective de changement climatique. NOMAD 2022 - 4e conférence internationale francophone Nouveaux Matériaux et Durabilité, IMT Mines Alès; LMGC; LIFAM, Nov 2022, Montpellier, France. hal-03882095

HAL Id: hal-03882095

https://hal.science/hal-03882095

Submitted on 2 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Projet ADEME ACLIBIO : Etude du vieillissement d'isolants biosourcés dans une perspective de changement climatique

Lucile Soudani[1], Géraldine Garnier[1], Matthieu Cosnier[1], Nicolas Place[1], Etienne Gourlay[2]

[1] *CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Saint-Martin d'Hères*

[2] *CEREMA, Laboratoire de Strasbourg, 11 rue Jean Mentelin, BP 9, 67035 Strasbourg Cedex 2, France*

ABSTRACT Au cours des dernières années, l'utilisation de matériaux biosourcés dans les bâtiments s'est fortement développée en réponse à des préoccupations environnementales et sociétales toujours plus prégnantes. Malheureusement, le développement récent des matériaux isolants biosourcés fait que l'on a très peu de retours d'expérience sur la durabilité de leurs performances. Quelques études ont bien été menées sur les isolants en bétons de chanvre ou sur des isolants biosourcés mais on constate globalement un manque criant de données relatives au vieillissement des matériaux biosourcés. En outre, il n'existe pas, à l'heure actuelle en France, d'essai de vieillissement normalisé adapté aux isolants biosourcés, fortement hygroscopiques. Dans ce contexte, le projet ADEME ACLIBIO permet de contribuer au développement d'un protocole de vieillissement adapté aux matériaux biosourcés, de déterminer l'évolution des propriétés hygrothermiques de plusieurs typologies d'isolants et d'évaluer leur impact sur le confort d'été et le confort d'hiver des bâtiments à l'horizon 2050 dans une perspective de changement climatique.

Keywords propriétés hygrothermiques, vieillissement accéléré, changement climatique

I. INTRODUCTION

A. Enjeux autour de la durabilité des isolants biosourcés

De nombreux indicateurs montrent aujourd'hui que l'impact du secteur du bâtiment sur l'environnement est loin d'être neutre. Par exemple, le bâtiment représente environ 30% des émissions de CO2, 50% du total des ressources naturelles exploitées, 45% de la consommation totale d'énergie finale ou encore 40% des déchets produits. Ces différents impacts sont évidemment liés au fonctionnement des bâtiments, mais aussi aux matériaux utilisés pour leur construction, très souvent énergivores et avec un impact carbone important. Par conséquent, le choix des matériaux est un réel levier pour diminuer les impacts environnementaux des bâtiments.

Issus de la biomasse végétale et animale, les matériaux biosourcés peuvent représenter une réponse aux différents enjeux environnementaux du secteur du bâtiment. La prise de conscience de ces intérêts est réelle et les matériaux biosourcés sont de plus en plus employés dans le bâtiment : le marché affiche environ 10% de croissance par an, et plus d'un projet de construction

/ rénovation sur 10 en intègre. La gamme des produits biosourcés est aujourd'hui large et innovante. Leur utilisation concerne toutes les typologies du parc, depuis la rénovation du bâti ancien jusqu'aux bâtiments plus récents (notamment pour des isolations par l'extérieur) ainsi que pour les bâtiments neufs (constructions bois par exemple).

D'autre part, l'enjeu est important pour le parc immobilier Français d'avant 1974 (antérieur à la première Réglementation Thermique), qui représente environ deux tiers du parc résidentiel actuel en France. Les propriétés des matériaux biosourcés permettent de présenter des solutions d'isolation par l'intérieur compatibles avec des matériaux anciens tels que la pierre, la brique ou le pan de bois, là où d'autres solutions plus traditionnelles (comme les isolants à forte résistance à la diffusion de vapeur d'eau) peuvent potentiellement amener à une dégradation de l'équilibre hygrothermique, et parfois à une dégradation de l'enveloppe même du bâti.

Cependant, les mécanismes de vieillissement des isolants biosourcés étant actuellement peu étudiés, on peut s'attendre à l'accélération et à l'aggravation de leur vieillissement lorsqu'ils seront soumis à des climats plus chauds et plus humides, et exposés à des événements climatiques exceptionnels. Ces différents aspects peuvent être considérés comme rédhibitoires par la profession.

B. Description des objectifs du projet ACLIBIO

Afin de répondre aux différents enjeux techniques, socio-économiques et environnementaux du secteur du bâtiment, l'objectif du projet ADEME 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.

Différentes tâches ont été ou vont être menées à bien :

- Etude des conditions climatiques caractéristiques à l'horizon 2050
- Etablissement de protocoles de vieillissement accéléré en enceinte climatique pour les isolants biosourcés
- Comportement hygrothermique des parois et étude des conforts d'été et d'hiver en tenant compte de l'évolution des conditions climatiques et des caractéristiques hygrothermiques après vieillissement

II. EVOLUTION DU CLIMAT A L'HORIZON 2050

L'évaluation du confort d'été et du confort d'hiver en tenant compte du changement climatique nécessite la définition d'une année de référence qui va servir à modéliser les transferts hygrothermiques à venir. Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de se focaliser sur deux zones climatiques distinctes et a priori les plus extrêmes : la ville de Brest en zone H2a pour des conditions très humides ; la ville de Nice en zone H3 pour des conditions très chaudes.

A. Description et définition d'une année de référence

Si la notion d'année de référence est couramment utilisée dans le cadre des simulations énergétiques dynamiques et clairement détaillée dans la norme NF EN 15927, cette notion est beaucoup référencée dans le cadre des simulations détaillées des transferts d'humidité

(Salonvaara & al., 2010). Des informations contradictoires peuvent même être mentionnées à ce sujet dans les deux documents normatifs qui régissent l'évaluation des transferts d'humidité par simulations numériques que sont la norme européenne NF EN 15026 et la norme allemande WTA 6-2.

Ainsi, la norme NF EN 15026 précise que les années de références sont représentatives de conditions moyennes et qu'à ce titre elles peuvent ne pas convenir pour les calculs relatifs à l'humidité. Il est alors proposé prioritairement d'utiliser des données mesurées sur au moins dix ans et de préférence, d'utiliser une année de référence conçue pour entraîner des conditions les plus défavorables susceptibles de survenir une fois tous les dix ans telle que définie par l'annexe 24 de l'IEA (Rode, 1993), ou en dernier recours une année de référence au sens des simulations énergétiques en appliquant une variation de température annuelle de ±2°C à une moyenne de l'ensemble des données selon que c'est l'été ou l'hiver que la condensation est susceptible de poser un problème.

En parallèle la norme WTA 6.2 qui sert de référence à l'élaboration du logiciel de simulations de transfert d'humidité WUFI®, stipule que les climats extrêmes susceptibles d'intervenir une fois tous les 10 ans tels que ceux proposés dans la norme NF EN 15026 ne sont pas adaptés à l'évaluation à long terme des performances hygrothermiques des bâtiments, puisque des séquences pluriannuelles sont nécessaires dans ce cas et qu'une répétition d'années extrêmes de ce type génèrerait des résultats sans rapport avec ceux attendus dans le cadre d'une utilisation normale du bâtiment. Il est indiqué qu'il est dans la plupart des cas préférable d'utiliser des données de référence moyennes telles que définies dans le cadre de simulations énergétiques.

Fort de ce manque de consensus, plusieurs auteurs dans la littérature proposent des méthodologies de sélection de climats extérieurs basées sur l'analyse statistique de résultats de simulations sur des années climatiques successives d'une période donnée (Salonvaara & al., 2010). Ces méthodes sont toutefois réservées à des configurations de parois spécifiques et nécessitent des données climatiques sur une séquence d'années, indisponibles pour des climats futurs.

Dans le cadre de cette étude, il est proposé une solution combinant les deux approches mentionnées dans les deux références normatives citées. Les simulations de transfert d'humidité seront réalisées sur une période de 10 ans, constituées de 9 années de références moyennes entre lesquelles sera intercalée une année extrême combinant un hiver plus rigoureux et un été plus chaud.

B. Prise en compte du changement climatique

La variabilité climatique correspond à l'évolution du climat par rapport à une tendance générale ou à une période de référence (souvent trois décennies). On peut parler de changement climatique pour les phénomènes cycliques uniquement si la modification de leurs fréquences se prolonge sur plusieurs décennies. Les paramètres climatiques comme la température, les précipitations, ou encore l'humidité varient à toutes les échelles spatio-temporelles. Si leurs statistiques se modifient durablement, sur plusieurs décennies, on parle de changement climatique. L'évolution climatique récente est attribuée à la combinaison de l'évolution naturelle du climat et de sa modification par les émissions de gaz à effet de serre engendrées par les activités humaines.

Les implications du changement climatique pour l'environnement et la société dépendront non seulement de la réponse du système Terre aux changements de forçages radiatifs, mais également de la façon dont les changements socio-économiques (économie, technologie, mode de vie, politiques publiques) évolueront. Afin d'analyser l'évolution future du climat, le Groupe intergouvernemental GIEC a donc vite éprouvé le besoin de s'appuyer sur des scénarios socio-économiques d'émission de gaz à effet de serre.

En 2007, le GIEC a proposé dans son rapport spécial sur les scénarios d'émission (SRES), des scénarios d'émissions basés sur des scénarios socio-économiques qui consistent à faire diverses hypothèses sur le développement économique futur et ses conséquences sur l'environnement. Quatre familles de scénarios sont distinguées :

- A1 : réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement économique sur le schéma actuel.
- B1 : réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable.
- A2 : développement hétérogène avec un développement économique sur le schéma actuel.
- B2 : développement hétérogène avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable.

En 2014, des scénarios dit RCP pour *Radiative Concentration Pathway* fournis par la communauté scientifique pour les besoins du GIEC ont été développés pour produire des projections climatiques. Les scénarios RCP sont quatre scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif sur la période 2006-2300.

L'application Climat-HD développée par Météo France sur le portail DRIAS$^{\text{les futurs du climat}}$ permet d'avoir une vision régionalisée du climat attendu en France au cours du 21ème siècle. Ces orientations s'appuient sur des projections climatiques issues d'un ensemble multi-modèles de climat issu du projet EUROCORDEX, corrigé sur la France par l'Institut Pierre Simon Laplace. Trois scénarios RCP ont été considérés : RCP 8.5, RCP 4.5 et RCP 2.6. Au vu de l'ensemble des projections climatiques fournies par le DRIAS$^{\text{les futurs du climat}}$, il est possible de conclure que :

- Le type de scénarios d'émissions joue assez peu sur les projections climatiques à l'horizon 2050 mais plus pour la fin du siècle.
- On s'attend à l'horizon 2050 à une augmentation généralisée des températures moyennes annuelles et saisonnières quelles que soient les régions.
- Les niveaux de précipitations annuelles et saisonnières évoluent peu d'ici 2050, de même que les précipitations extrêmes
- On s'attend à une augmentation du nombre de jours chauds et une diminution du nombre de gelées

C. Constitution d'une année de référence avec changement climatique

La définition des climats futurs repose sur une modélisation complexe incluant des scénarios climatiques globaux auxquels sont associés des modèles de descente d'échelle régionaux. De fortes incertitudes apparaissent alors. Nous choisissons pour définir nos climats futurs d'utiliser le logiciel largement reconnu Meteonorm, tout en gardant à l'esprit que ses résultats doivent corroborer les projections fournies pas le portail DRIAS[les futurs du climat].

Pour ce faire, les climats générés par Meteonorm selon les anciennes familles de scénarios sur la période allant de 2050 à 2100 sont comparés avec les projections climatiques du DRIAS[les futurs du climat] à l'horizon 2050. L'objectif est donc de définir parmi tous les climats proposés, celui qui, pour un site et un scénario de projection donné, sera considéré comme le plus représentatif des projections mensuelles fournies par le portail DRIAS[les futurs du climat].

Ainsi, nous obtenons les résultats présentés dans le Tableau 1.

TABLEAU 1. Couple des scénarios SRES / horizons temporels (Meteonorm) représentatifs des projections futures (DRIAS [les futurs du climat])

	Brest	Nice
RCP 4,5	A1B / 2070	B1 / 2080
RCP 8,5	A1B / 2090	A1B / 2070

Afin d'éprouver les isolants biosourcés dans les conditions les plus extrêmes, nous choisissons de considérer la projection RCP 8,5 pour les deux villes de Brest et de Nice.

Les graphiques de la Figure 1 représentent les différences entre les climats actuels et à l'horizon 2050 en termes de température et humidité relative, respectivement pour les villes de Brest et Nice.

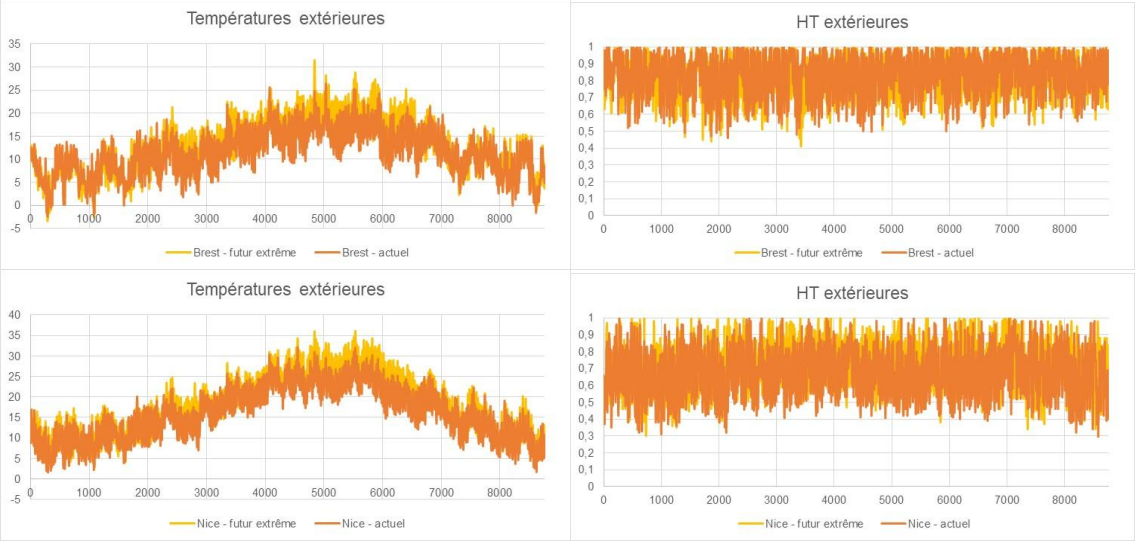

FIGURE 1. Températures et humidités relatives extérieures pour les villes de Nice et Brest

Les ambiances intérieures correspondantes sont calculées à partir des climats extérieurs en suivant la procédure détaillée dans le guide SimHuBat (PACTE, 2021) qui expose la détermination des hypothèses pour la simulation de transferts hygrothermiques dans les parois de bâtiment. Elles sont représentées dans les graphiques de la Figure 2, respectivement pour les villes de Brest et Nice.

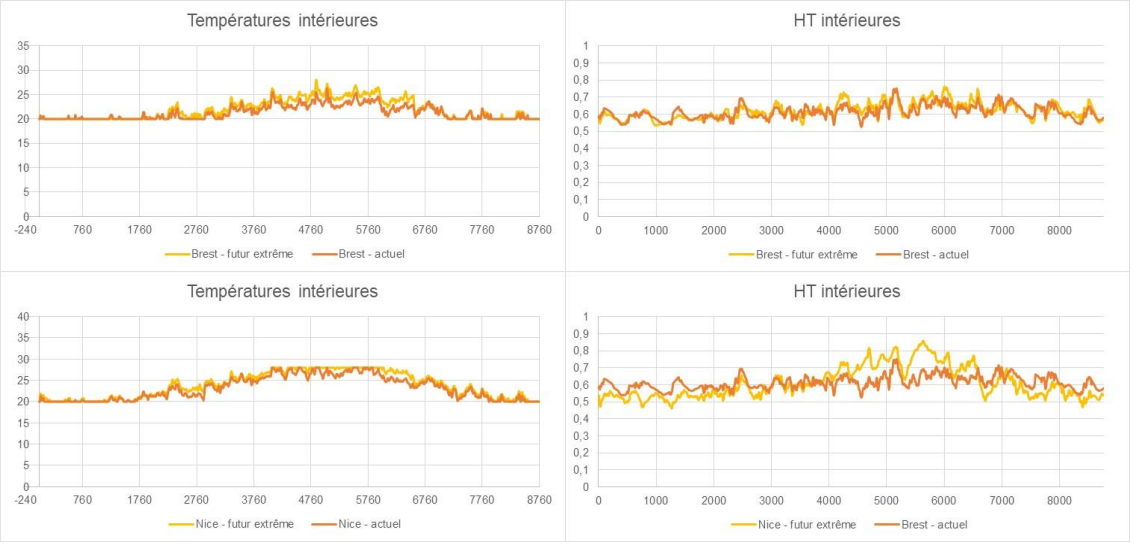

FIGURE 2. Températures et humidités relatives intérieures pour les villes de Nice et Brest

III. PROTOCOLE DE VIEILLISSEMENT ACCELERE

Les contraintes climatiques responsables du vieillissement de matériaux de construction sont nombreuses : rayonnement solaire, températures extrêmes et cycles de températures, humidité (sous forme de cycles d'humidité relative ambiante ou bien de pluie battante), vent, neige, pollution de l'air (polluants ou poussières), micro-organismes (moisissures notamment), etc. Cependant, pour des raisons de faisabilité dans le cadre de ce projet, nous nous restreindrons à l'impact des contraintes en termes de température et d'humidité relative. Après une revue des documents normatifs existants en France et à l'international, une sélection d'études publiées dans la littérature a été répertoriée afin de fournir différents exemples de vieillissements accélérés sur des matériaux biosourcés et provenant de différents pays. Cette revue nous a permis d'identifier les conditions en termes d'humidité relative et de température à appliquer dans le cadre de notre projet.

A. Documents normatifs

La norme NF ISO 15686-2 établie une méthode afin de s'assurer que les programmes d'exposition au vieillissement soient réalistes et met en garde dans le cas de généralisation d'études expérimentales afin de prévoir la durée de vie d'un bâtiment ou d'un composant de bâtiment. Elle ne propose cependant pas des sollicitations précises à imposer aux matériaux afin d'obtenir un vieillissement accéléré.

Plusieurs normes internationales décrivent des protocoles de vieillissement de matériaux de construction ou d'éléments de bâtiments (EOTA TR010, 2004) (Jelle, 2012). Cependant, ceux-ci se concentrent sur des contraintes climatiques liées au contact avec l'environnement extérieur (rayonnement solaire, pluie battante, vent, gel/dégel). Or ces contraintes ne sont pas adaptées aux matériaux isolants qui ne doivent pas être en contact avec l'extérieur.

Le référentiel TREMPLIN de l'ACERMI permet de caractériser le vieillissement de certaines familles de matériaux isolants. Il traite des propriétés thermiques des matériaux isolants avant et après vieillissement selon les protocoles suivants :

- Produits expansés : 6 mois à 70°C avec un point de mesure à 3 mois
- Produits sensibles au vieillissement humide : 50 jours à 35°C et 80% d'humidité relative
- Produits sous vide : 6 mois à 70°C et 90% d'humidité relative

B. Revue de la littérature

Dans la littérature, le vieillissement de différents isolants biosourcés a été étudié, dans des conditions accélérées ou naturelles. Etant donné que peu d'études portent spécifiquement sur la fibre de bois ou les fibres végétales, l'élaboration du protocole de vieillissement s'est faite en tirant parti des études faites sur les isolants biosourcés en général.

Guillaume Delannoy (Delannoy, 2001) : ces travaux de thèse ont porté sur deux formulations de bétons de chanvre, dont le vieillissement a été étudié. Les deux bétons de chanvre ainsi que la chènevotte brute ont été soumis à trois types de vieillissement pendant deux ans :

- Un vieillissement de référence afin d'avoir un suivi dans des conditions environnementales stables. Une température constante de 20°C et une humidité relative constante de 50% ont été choisies.
- Un vieillissement accéléré en enceinte climatique pendant deux ans. Etant donné le caractère hygrothermique du matériau, le choix a été fait d'appliquer une température constante ainsi que des cycles de variation d'humidité relative. Afin de ne pas écarter d'éventuelles apparitions de moisissures, la température constante a été fixée à 30°C. La durée des phases de séchage a été déterminée par compromis entre avoir une teneur en eau résiduelle faible et un plus grand nombre de cycles. Le choix a donc été fait d'imposer une humidité relative de 40% pendant 2 jours puis de 95% pendant 5 jours.
- Un vieillissement extérieur où les échantillons ont été exposés sur des grilles, ainsi soumis aux conditions climatiques extérieures.

Hajer Rabii (Rabii, 2016) : ces travaux de thèse ont porté sur un matériau composite à base de polyéthylène renforcé par des fibres de lin. Après avoir identifié les faiblesses et les possibles détériorations du matériau, différents vieillissements sont étudiés séparément.

- Un vieillissement avec une température constante de 80°C
- Un vieillissement avec une température constante de 30°C et une humidité relative constante de 96±3%

- Deux vieillissements en immersion dans de l'eau distillée, à des températures constantes de 30°C et 80°C

D'autre part, un vieillissement microbiologique a également été étudié en conditions stériles, naturelles et ensemencées. Les matériaux après vieillissements ont été étudiés d'un point de vue mécanique et microstructural.

Camille Magniont (Magniont, 2010) : Lors de ces travaux de thèse, le vieillissement d'un composite renforcé par différentes fibres végétales (yucca, lin, chanvre) a été étudié. Les échantillons ont été soumis à une atmosphère contrôlée constante (une température de 20°C et une humidité relative de 95%) pendant une année et ce, afin d'étudier l'effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques de ces matériaux.

Anna Arizzi (Arizzi & al., 2016) : Le vieillissement du béton de chanvre a été étudié en soumettant des échantillons à trois climats types (méditerranéen, tropical et semi-aride) réduits d'une année type à 12 jours. Ils ont été soumis à des variations d'humidité relative, de température, de pluie battante avec ou sans sel. Il en ressort que les conditions climatiques testées dans cette étude ne génèrent pas de modifications macroscopiques significatives du béton de chanvre.

Pedreno-Rojas (Pedreno-Rojas & al.,2019) : Le vieillissement accéléré est étudié sur un matériau composite à base de plâtre et de résidu de bois. Les sollicitations imposées alternent une phase de séchage (30%HR et 55°C) avec une phase d'humidification (90%HR et 23°C). Ces cycles ont été répétés 5 fois, 10 fois et 15 fois. Ce vieillissement a été réalisé dans le but d'étudier l'évolution des propriétés mécaniques.

C. Description du protocole choisi

Pour rappel, les enjeux du choix d'un vieillissement accéléré efficace sont les suivants :

- Considérer une température suffisamment élevée pour accélérer les cinétiques de dégradation ayant naturellement lieu dans les matériaux
- Eviter l'endommagement des matériaux, lié notamment à une humidité relative trop importante, ce qui ne rendrait pas compte d'un état réaliste au vu des sollicitations durant sa vie au sein d'une paroi

Dans tous les cas, une étude de vieillissement nécessite d'avoir des sollicitations qui sortent du cadre normal d'exploitation des matériaux. Au vu des conclusions tirées de la revue bibliographique présentée précédemment, le protocole a été établi comme suit.

En ce qui concerne la température, elle est souvent considérée constante. Elle peut être fixée à 20°C (température ambiante) ou bien à 30°C afin de ne pas écarter les risques de développement fongique. L'étude du développement fongique faisant partie des volets étudiés dans ce projet et de manière à accélérer les processus de vieillissement dans le matériau, cette dernière température apparait plus adaptée. Nous choisirons une température constante égale à 30°C.

En ce qui concerne l'humidité relative, elle est soit considérée constante (souvent une valeur haute de 90%, 95% ou 98%), soit des cycles de variation d'humidité relative sont imposés, allant généralement d'une valeur basse (30% ou 40%) à une valeur haute (90% ou 98%) sur plusieurs jours. Les sollicitations changent suivant les paramètres mesurés avant et après vieillissement : les

humidités relatives fixes sont liées à des études de développement fongique alors que les cycles sont utilisés lors d'études de paramètres thermiques. Etant donnée la caractérisation hygrothermique complète prévue dans le projet, les cycles nous paraissent plus adaptés.

Pour fixer la durée des phases d'humidification et des phases de séchage, il convient de prendre en compte un temps de stabilisation en masse de l'échantillon, pour chacune des phases.

Les durées de sollicitations sont globalement longues, mais restent assez variables, sans doute en fonction des contraintes expérimentales et des durées de projet. Celles-ci peuvent aller de quelques semaines à deux ans.

Nous choisirons ici d'imposer des cycles d'humidité relative allant de 40% d'HR pendant 2 jours, puis de 90% d'HR pendant 5 jours. Ce cycle sera répété pendant 6 mois.

IV. EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES HYGROTHERMIQUES

A. Description des isolants biosourcés choisis

L'étude a porté sur trois isolants utilisés pour différentes typologies de paroi :

- un isolant en fibre de bois rigide utilisé en isolation par l'extérieur
- un isolant en fibre de bois semi-rigide utilisé en isolation par l'intérieur
- un isolant en fibres végétales composant les parois en ossature bois

B. Caractérisation hygrothermique

La caractérisation de l'évolution des matériaux sélectionnés avant et après vieillissement s'est faite à travers différents essais en laboratoire.

- des essais thermiques : conductivité thermique à sec, en fonction de la température et en fonction de l'humidité relative ; la capacité thermique spécifique
- des essais hydriques : absorption d'eau par immersion partielle, résistance à la diffusion de la vapeur d'eau, isotherme de sorption
- des essais sanitaires : résistance au développement de moisissures

V. CONCLUSION

La question de la durabilité des matériaux biosourcés pour le bâtiment est un enjeu majeur pour garantir la transition écologique du secteur du bâtiment tout en permettant de s'assurer de la pérennité des ouvrages.

Les travaux présentés précédemment décrivent d'une part la méthode d'estimation de constitution de climats réalistes à l'horizon 2050, et d'autre part la procédure employée pour vieillir de façon accélérée les matériaux étudiés dans ce projet.

Les tâches à venir permettront de répondre à la question de l'évolution des performances des isolants après vieillissement et d'évaluer numériquement l'impact pour le confort des occupants.

REFERENCES

ARIZZI, Anna, VILES, Heather, MARTÍN-SANCHEZ, Inés, et al. Predicting the long-term durability of hemp–lime renders in inland and coastal areas using Mediterranean, Tropical and Semi-arid climatic simulations. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 542, p. 757-770.

ACERMI, 2013. Référentiel TREMPLIN. In https://www.acermi.com/fr/documents-reference/referentiels-acermi/, consulté le 17/11/2020.

Climat HD, disponible à http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd

Delannoy, G. (2001). Etude des techniques de production de condensats de Bose-Einstein: évaporation multi-fréquence et refroidissement sympathique (Doctoral dissertation, Paris 11).

DRIAS[les futurs du climat], disponible à http://www.drias-climat.fr/

EOTA TR 010 Technical Report: Exposure procedure for artificial weathering, Mai 2004

EOTA TR 010 Technical Report: Exposure procedure for accelerated ageing by heat, Mai 2004

Guide « Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiment », Programme PACTE, Octobre 2021

Jelle, B. P. (2012). Accelerated climate ageing of building materials, components and structures in the laboratory. *Journal of materials science*, 47(18), 6475-6496.

Magniont, C. (2010). Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources (Doctoral dissertation, Toulouse 3).

NF EN 15026, Evaluation du transfert d'humidité par simulation numérique, Afnor, 2008

NF ISO 15686-2, Bâtiments et biens immobiliers construit – Conception prenant en compte la durée de vie – Partie 2 : procédures pour la prévision de la durée de vie, Août 2012

PEDREÑO-ROJAS, Manuel Alejandro, MORALES-CONDE, María Jesús, RUBIO-DE-HITA, Paloma, et al. Impact of Wetting–Drying Cycles on the Mechanical Properties and Microstructure of Wood Waste–Gypsum Composites. *Materials*, 2019, vol. 12, no 11, p. 1829.

Rabii, H. (2016). Étude du vieillissement de composites renforcés par des fibres naturelles: application bâtiment (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).

Rode C. Reference years for moisture calculations, Denmark. Report T2-DK-93/02, IEA Annex 24, HAMTIE, 1993

Salonvaara, M., Sedlbauer, K., Holm, A., & Pazera, M. (2010). Effect of selected weather year for hygrothermal analyses. *Proceedings of thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings XI. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*

WTA Guideline 6-2, Simulation of heat and moisture transfer, 2014