

Isolation thermique biosourcée à base de fibre de chanvre : propriétés hygroscopiques et résistance fongique à l'échelle du bâtiment

Lily DEBORDE

Univ Rennes, Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, 3 rue du Clos Courtel, 35704 Rennes.

RESUME

L'intégration de matériaux biosourcés performants est un levier pour la réduction de l'impact environnemental de l'industrie du bâtiment. La fibre de chanvre, une ressource végétale locale et annuelle, est particulièrement adaptée aux applications d'isolation. L'étude porte sur le développement d'un isolant à base de fibre de chanvre : quelles sont ses performances in situ et est-ce que son caractère biodégradable présente un risque fongique ? La performance hygrothermique est étudiée à travers un suivi expérimental avant/après rénovation d'un comble d'une maison habitée, durant 18 mois. La température, l'humidité relative et le flux de chaleur sont enregistrés. Les données expérimentales permettent la comparaison avant/après sur une période chaude. Une modélisation WUFI® permet de compléter l'étude avec une comparaison avant/après sur une période froide. Les résultats montrent que l'isolation est performante et l'amélioration du confort d'été est notable. Le risque de développement fongique est étudié à l'échelle laboratoire en exposant la fibre de chanvre non traitée, avec inoculation fongique, aux conditions extrêmes rencontrées in-situ. Une isoplèthe de la fibre de chanvre est ainsi construite. Les conditions du comble ne présentent pas de risque de développement fongique.

Mots-clefs fibres de chanvre, propriétés hygrothermiques, développement fongique, mesures in situ, isoplèthe

I. INTRODUCTION

2024 a été l'année la plus chaude jamais enregistrée (WMO, 2025) et d'après le GIEC il est incontestable que 100 % du réchauffement climatique est dû aux activités humaines (IPCC, 2023). Pour limiter ce réchauffement, il est indispensable de réduire les émissions de gaz à effet de serre. La décarbonation du secteur du bâtiment est une opportunité sans pareil. En effet, il est le 3^{ème} poste d'émissions nationales (ADEME, 2024). Pour le neuf, les émissions se répartissent avec en moyenne 60 % lors de la phase de construction et 40 % lors de l'exploitation (BBCA, 2024). L'exploitation des bâtiments représente 47 % des consommations énergétiques françaises (ADEME, 2024). Face à ce bilan, l'isolation biosourcée permet de répondre doublement aux enjeux climatiques : réduction de la consommation énergétique des bâtiments et décarbonation des matériaux utilisés.

Le chanvre est une ressource végétale poussant sur nos territoires et renouvelable annuellement. En plus de séquestrer du CO₂, le chanvre présente des avantages agricoles dans la rotation des cultures, réduisant ainsi l'usage des engrais et des pesticides. Sa valorisation contribue au développement des territoires et favorise le développement d'activités en circuits courts. Dans le bâtiment la partie fibreuse peut être utilisée en isolant.

A l'échelle de bâtiments, plusieurs études ont été menées sur l'isolation biosourcée. Dans le cas de toiture, (Nelson, 2020; Montrose, 2021) ont instrumenté une isolation en feuilles de bananier et de cocotier, (Antczak et al., 2018) l'isolation de comble perdu avec des anas de lin. Grâce à des sondes de température (T) et humidité relative (HR) l'inertie hygrothermique a été quantifiée. Dans les travaux de (CTICM-ABL, 2022; Hoxha et al., 2022), l'instrumentation est complétée de fluxmètres afin d'évaluer la résistance thermique de panneaux isolants biosourcés selon différentes sollicitations. Nous n'avons pas trouvé d'étude portant sur l'isolation en fibres de chanvre en vrac. L'isolation en béton de chanvre a suscité plus de travaux, tels que (Boumediene, 2022) et (Malagoni de Almeida, 2022) qui ont instrumenté des rénovations de murs en béton de chanvre.

Dans ce contexte, est né le projet ADEME *INNOFIB*, porté par l'entreprise CAVAC Biomatériaux et le laboratoire GCGM de l'Université de Rennes. Le projet a pour but d'améliorer les performances des isolants à base de chanvre, d'un point de vue technique, énergétique, environnemental, sanitaire et économique. Cet article présente les travaux menés à l'échelle bâtiment sur le démonstrateur, l'instrumentation, l'analyse des données sur la période chaude, ainsi que la simulation sur WUFI® de la période froide. L'objectif est d'évaluer les performances hygrothermiques de l'isolant développé et d'évaluer le risque de développement fongique.

II. MATERIAUX ET IMPLANTATION

Les fibres de chanvre sont produites en Vendée par la coopérative agricole CAVAC, la variété est « *Futura 75* ». Les fibres sont obtenues par broyage de la paille de chanvre à travers plusieurs procédés d'affinage mécanique à sec. Pour le démonstrateur, un mélange de fibres de chanvre affinées et de fibres de coton recyclées est utilisé, appelé isolant *INNOFIB*. La composition exacte est confidentielle. La masse volumique apparente est de $17,2 \text{ kg/m}^3$. La conductivité thermique sèche (CT), mesurée par la méthode flux métrique (AFNOR, 2001) est de $51,2 \text{ mW.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. L'étude du risque de développement fongique est réalisée sur des fibres courtes de chanvre.

Le démonstrateur est situé en Vendée, il s'agit d'une maison, habitée, de plain-pied. La paroi étudiée correspond au plancher haut sur comble perdu. Avant la rénovation, celui-ci est isolé avec des fibres de verre en vrac sur des plaques de plâtre (FIGURE 1 a-b). Conformément aux règles de l'art de la construction française (CSTB, 2020), il n'y a pas de pare-vapeur. Les tuiles sont posées directement sur la charpente métallique. Le vent, au fil des années, a déplacé l'isolant vrac dans le comble, ainsi l'épaisseur de l'isolant n'est pas homogène sur toute la surface. Une pompe à chaleur couplée à un poêle à bois assure la régulation chaud/froid de l'ambiance intérieure.



FIGURE 1 : (a) phase avant, (b) sans l'isolant d'origine, (c) phase après, (d) positions des capteurs

Le bâtiment est instrumenté de mai 2022 à octobre 2023, soit 18 mois. De mai à octobre 2022 le comble est isolé avec la fibre de verre d'origine. Ceci constitue la phase **avant**. En octobre 2022, la laine de verre est retirée et l'isolant INNOFIB est soufflé avec une cardeuse *ISOBLOW Mini Plus*. D'octobre 2022 à octobre 2023 le démonstrateur est instrumenté avec la solution INNOFIB en place (phase **après**). L'acquisition des données de T et HR se fait au moyen de sondes *Sensirion SHT35*. Le flux de chaleur est mesuré avec un fluxmètre *Standard CAPTEC*. Le pas de temps de mesure est de 3 minutes. Les sondes de T et HR sont positionnées à différentes épaisseurs dans l'isolant et aux interfaces, le fluxmètre est positionné à l'interface plaque de plâtre - isolant (**FIGURE 1 d**). Des sondes d'ambiances extérieures, intérieures et dans le comble complètent l'instrumentation.

L'inertie de la paroi est caractérisée par le **déphasage** et le **facteur d'amortissement**. Ici, l'ambiance intérieure étant régulée, le déphasage et l'amortissement sont calculés entre l'ambiance du comble et l'interface plaque de plâtre - isolant (**FIGURE 2**). Les données sont également analysées à l'aide de **profils** tracés à différents instants. Cette représentation permet notamment de visualiser les pics d'adsorption et désorption au cœur de l'isolant.

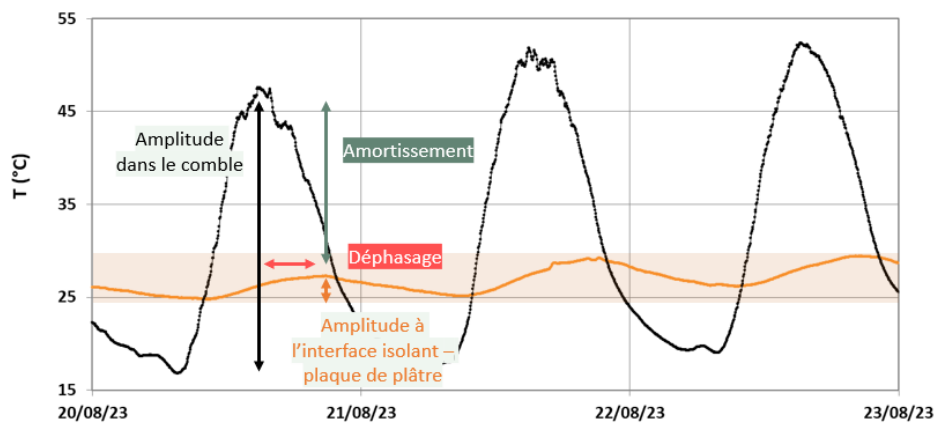


FIGURE 2 : calcul du déphasage et du facteur d'amortissement

A partir des données de T et HR, la **pression de vapeur** (P_v) est calculée en (Pa) selon l'équation :

$$P_v = HR \cdot \exp \left(18,986 - \frac{4052}{235,86 + T} \right) \quad (11)$$

La **résistance thermique** totale (R_{tot}) in situ est calculée selon la norme ISO 9869. Avec ΔT qui est calculé entre l'ambiance du comble et l'ambiance intérieure, Φ le flux de chaleur ($W.m^{-2}$), t est l'intervalle de calcul (3 minutes) et la période totale est de 1 mois.

$$R_{tot} = \frac{\sum \Delta T^t}{\sum \Phi^t} \quad (2)$$

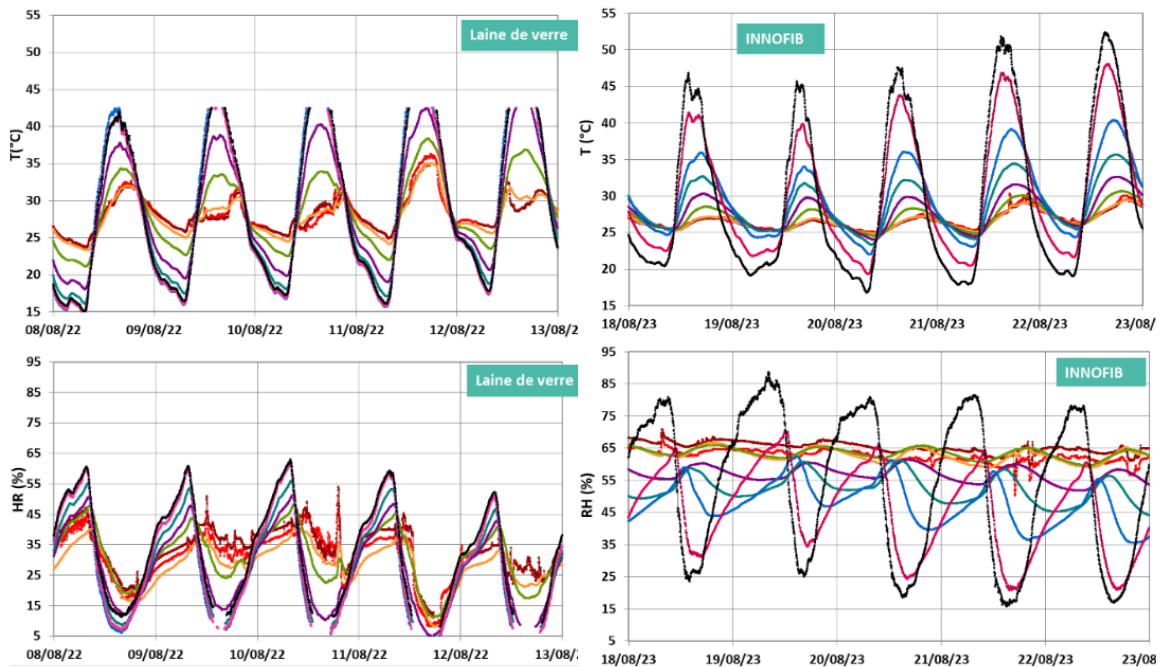
Les périodes de flux montant et descendant sont traitées séparément, les périodes d'inversion de flux sont écartées. Afin de remonter à la **CT de l'isolant**, R_{tot} est aussi calculé à partir de la somme des résistances thermiques de chaque composant de la paroi. Où, e_i est l'épaisseur du matériau i (m) et λ_i sa CT ($W.m^{-1}.K^{-1}$). R_{si} et R_{se} sont les résistances de surface de part et d'autre de la paroi.

Dans le cas d'un flux ascendant, $R_{si} = R_{se} = 0,10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Dans le cas d'un flux descendant, $R_{si} = R_{se} = 0,17 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (CSTB, 2012). Selon les données fabricants, l'épaisseur d'une plaque de plâtre est de 0,0125 m et sa CT est de $0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

$$R_{tot} = R_{si} + R_h + R_{se} ; R_h = \sum \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (3)$$

III. MESURES IN-SITU

Présentant des conditions météorologiques de T similaire, les canicules d'août 2022 et 2023 ont été sélectionnées pour la comparaison avant / après (FIGURE 3). Un problème sur les sondes fait que les signaux sont écrêtés au-delà de $42,5^\circ\text{C}$ en août 2022, pénalisant l'analyse. Vis-à-vis de l'inertie thermique, la plus grosse différence avant/après porte sur l'amortissement. Pour une T de combles similaires, la T maximum sous l'isolant est de 35°C en 2022 et $29,4^\circ\text{C}$ en 2023. L'amplitude sous l'isolant est de $7,4^\circ\text{C}$ en 2022 et $2,7^\circ\text{C}$ en 2023, conduisant à un amortissement de 0,09 en 2023. L'isolation après rénovation transmet nettement moins la chaleur. Sur le plan hygrique, il y a une plus forte amplitude dans le comble en 2023 qu'en 2022. Pourtant, avec l'isolation INNOFIB, l'HR reste stable sur une large profondeur alors qu'avec la laine de verre, l'HR fluctue sur toute l'épaisseur de l'isolant et suit l'HR du comble (FIGURE 3). Cette différence s'explique par des mécanismes d'adsorption / désorption, visibles sur l'évolution de la Pv. Dans la phase avant, les pics de Pv sont peu marqués. En revanche, dans la phase après, les pics de Pv inférieurs et supérieurs sont bien marqués et au-delà des valeurs des conditions ambiantes intérieures et extérieures. Les phénomènes de sorption / désorption sont associés à des échanges de chaleur latente, la propagation du flux de chaleur s'estompe du fait des consommations / libérations de chaleur. Cette inertie hygrothermique améliore le confort.



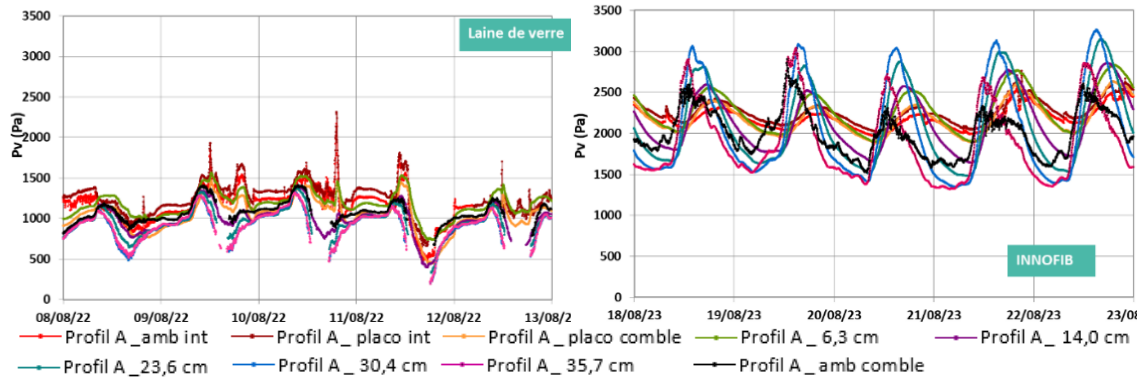
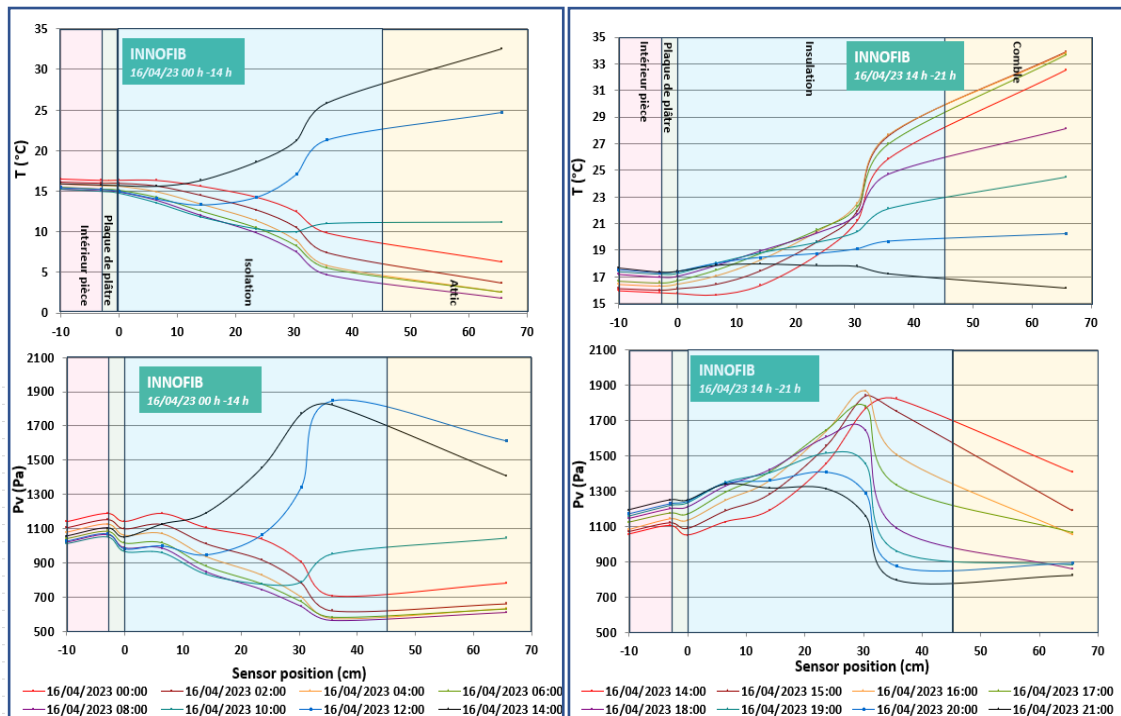


FIGURE 3 : T, HR et Pv du salon durant la canicule d’août 2022 et 2023

Pour illustrer l’influence de ces mécanismes sur le flux de chaleur, une période de mi saison sans chauffage, ni climatisation et avec mesure du flux de chaleur est présentée FIGURE 4. En effet, le flux de chaleur maximal n’est pas synchronisé avec le ΔT maximal, sous l’effet combiné de la diffusion de chaleur et des phénomènes de sorption / désorption. Sur le profil, l’augmentation de la T du comble induit un saut de Pv visible autour de 35 cm à partir de la courbe de 10 h. La Pv à 35 cm devient alors plus élevée que dans le comble, traduisant de la désorption dans l’isolant. Cela coïncide avec le flux de chaleur maximum qui est atteint à 9 h 44 et reste constant jusqu’à 11 h 02 puis décroît alors que le ΔT est maximal à 15 h 51. **Le flux de chaleur a cessé d’augmenter quand la désorption a commencé alors que le ΔT continuait d’augmenter.** La CT apparente pourrait alors être réduite grâce aux phénomènes hygriques. Le phénomène de désorption consomme localement de la chaleur et réduit ainsi la transmission du flux de chaleur venant de l’extérieur. A l’inverse, l’adsorption d’eau, libère de la chaleur, réduisant le flux de chaleur partant de l’intérieur.



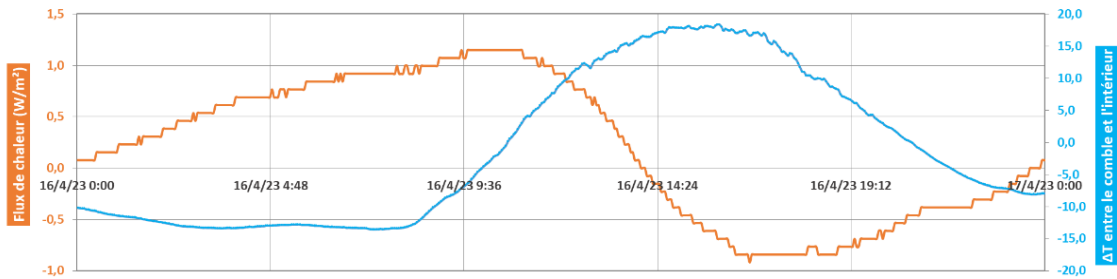


FIGURE 4 profils de T et Pv pour la journée du 16 avril 2023 et évolution du flux de chaleur et ΔT

Avant la rénovation, l'épaisseur d'isolant est inégale sur le plancher (de 13 à 30 cm). La mesure du flux de chaleur est réalisée au droit d'une couche de 30 cm d'isolation avant la rénovation et 47 cm après. L'amélioration apportée par la rénovation est quantifiée par l'augmentation de la résistance thermique (R). Pour un flux de chaleur ascendant (de la maison au comble) un facteur 2 est constaté : avant rénovation R est de $5,0 \pm 0,3 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, après R est de $10,5 \pm 0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$. Pour un flux de chaleur descendant, avant rénovation la R est de $3,9 \pm 0,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, en raison d'une panne du fluxmètre, il n'y a pas de valeur de flux thermique descendant après rénovation.

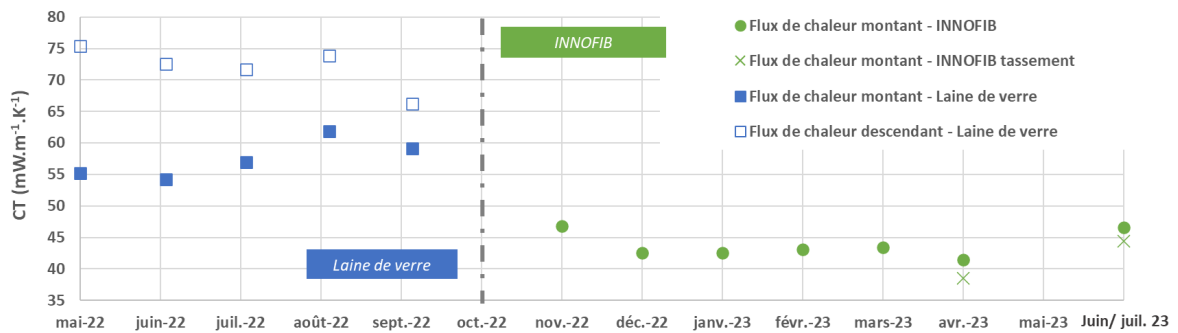


FIGURE 5 : moyenne mensuelle de la CT avant et après rénovation

Bien que les valeurs de CT ne soient pas évaluées lors des mêmes saisons, pour prendre en compte les différences d'épaisseur, la CT est calculée FIGURE 5. Avant rénovation, les CT obtenues sont de $57,5 \pm 3,1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour un flux de chaleur ascendant et $71,9 \pm 3,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour un flux de chaleur descendant. Après rénovation, pour un flux de chaleur ascendant la CT est de $43,8 \pm 2,1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Le tassement de l'isolant INNOFIB est pris en compte à partir d'avril 2023, quand la teneur en eau de l'isolant a réduit, avec le changement de saison. Il conduit à une CT plus faible, ce qui est en accord avec l'influence de la masse volumique sur la CT dans cette plage. Comme le montre la constance de la CT in situ au fil des mois FIGURE 5, les capacités de sorption/désorption de l'isolant biosourcé, observées précédemment, sont avantageuses tant vis-à-vis du confort d'été que du confort d'hiver.

IV. SIMULATION WUFI®

Afin de compléter les données expérimentales, le plafond isolé avant / après rénovation a été simulé sur le logiciel WUFI® Pro 6.8. Pour l'avant rénovation, la laine de verre ISOVER INTEGRA de la bibliothèque matériaux est utilisée, son épaisseur est ajustée afin que la réponse numérique

reproduire la réponse expérimentale aux différents points de mesure. Pour la paroi rénovée, l'isolant INNOFIB est créé. Ses paramètres sont définis à partir des données expérimentales mesurées à l'échelle laboratoire. Les paramètres hygriques sont identifiés à partir de la méthode inverse développée au LGCGM (Khaled, 2023), basée sur un essai MBV. Une fois la réponse numérique validée en simulant des périodes de mesures in situ, la simulation permet d'étendre l'étude pour les 2 configurations sur une année type, avec le climat de Bordeaux pour le côté comble et celui de la norme EN 15026 pour le côté intérieur. Les résultats (cf. FIGURE 6) mettent en avant les phénomènes notés expérimentalement : l'isolant INNOFIB conduit un meilleur amortissement T et HR que la laine de verre. Le bilan énergétique calculé entre le 1^{er} octobre et le 30 avril de l'année type indique des déperditions surfaciques de 9,5 kWh/m² avant et 6,3 kWh/m² après. Soit une diminution de 33,6 % des déperditions. A noter que la comparaison avant / après a été réalisée dans le cas le plus favorable pour la phase avant, en effet les comparaisons sont faites avec la partie du plafond la plus isolée (30 cm vs 20 cm au-dessus de la chambre et 13 cm au-dessus de la cuisine). Ainsi la réduction des déperditions thermiques est grandement sous-estimée. En termes de puissance de chauffe, la phase avant a un flux sortant moyen de $1,9 \pm 0,6$ W/m², avec un maximum à 3,6 W/m² et la phase après $1,2 \pm 0,4$ W/m², avec un maximum à 2,5 W/m². Dans ce cas où la T intérieure est régulée, la puissance de chauffage est ainsi plus faible de 36 % après rénovation. De plus, l'augmentation de la R conduit à une augmentation de la T de surface intérieure du plafond, permettant un même niveau de confort ressenti avec une T ambiante plus faible, et donc une diminution des consommations d'énergie.

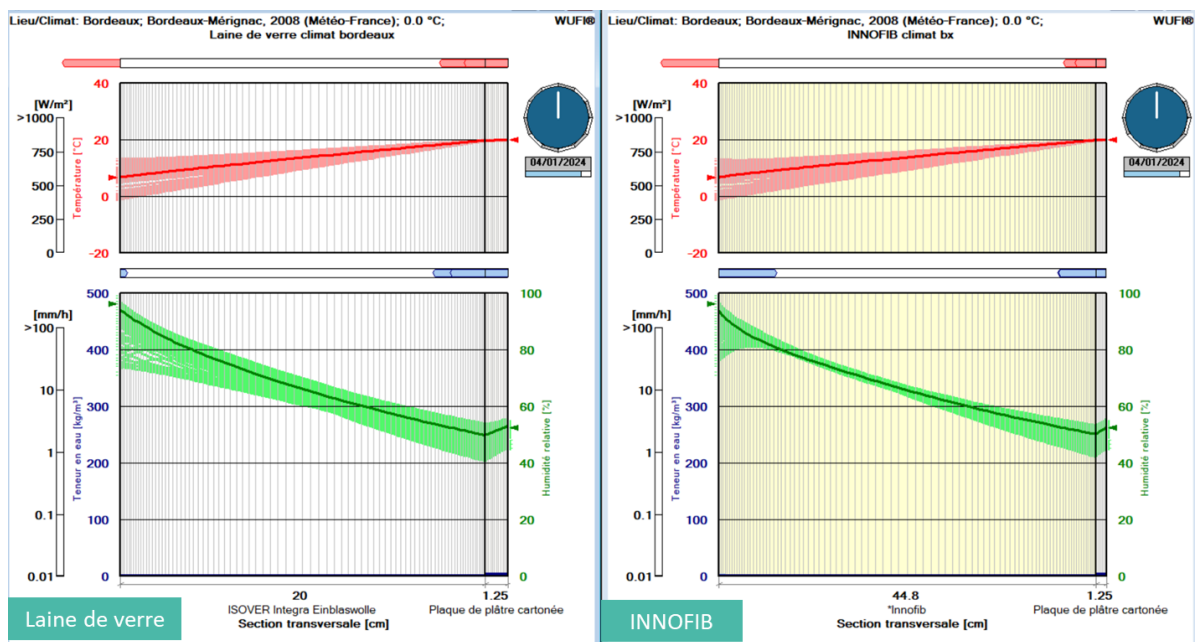


FIGURE 6 : variogrammes Wufi® dans les configurations avant (à gauche) et après rénovation (à droite), avec les courbes claires pour la plage explorée sur la période du 1 au 4 janvier, les courbes intenses pour les valeurs instantanées du 4 janvier à 12 h 00

V. DURABILITE

Le tassement in situ de l'isolant INNOFIB mesuré après 1 an est de 4,6 %. A 2 ans et 3 mois, il est de 14,3 %. Il est noté que, contrairement à la laine de verre, les fibres n'ont visuellement pas bougé sous l'action du vent dans le comble. Il n'y a pas d'irrégularité visible en surface. La longueur des fibres permet probablement un emmêlement du réseau fibreux qui empêche la partie du dessus d'être déplacée. Cet effet d'emmêlement a pu être observé lors du retrait de l'instrumentation.

Pour évaluer si les conditions d'usage de ce comble, sans pare vapeur, conduisent à un risque de développement fongique, l'isoplèthe de la fibre de chanvre a été construite (Deborde et al., 2024). Le démonstrateur a fourni les conditions atteintes dans les combles et dans l'isolant au cours des 4 saisons. Les variations de T et d'HR suivent des cycles distincts, la T fluctue plus rapidement. Ainsi, les valeurs moyennes hebdomadaires de T et d'HR, indiquent les conditions extrêmes rencontrées in-situ. Le risque fongique est étudié en évaluant la croissance fongique sur des fibres de chanvre inoculées par un mélange de spores (*Aspergillus Niger* et *Penicillium*) et exposées à ces conditions extrêmes (Deborde et al., 2024). Les HR minimales en fonction de la T pour déclencher un développement fongique sont ainsi déterminées. La FIGURE 7 montre que pour avoir un développement fongique sur des fibres de chanvre à 10°C, l'HR minimum est entre 93,0 et 96,4 %. A 18°C, l'HR minimale est entre 81,1 et 89,0 % pour une durée de 20 à 35 j et entre 89,0 et 94,8 % pour une durée de 7 à 20 j. A 20°C, l'HR minimale est entre 83,2 et 94,5 % pour une durée de 7 à 20 j. A 23°C, l'HR minimale est entre 85,6 et 90,4 % pour une durée de 7 à 20 j. Comme le montrent les données in-situ (FIGURE 7-b), les conditions rencontrées ne conduisent pas à un risque de développement fongique.

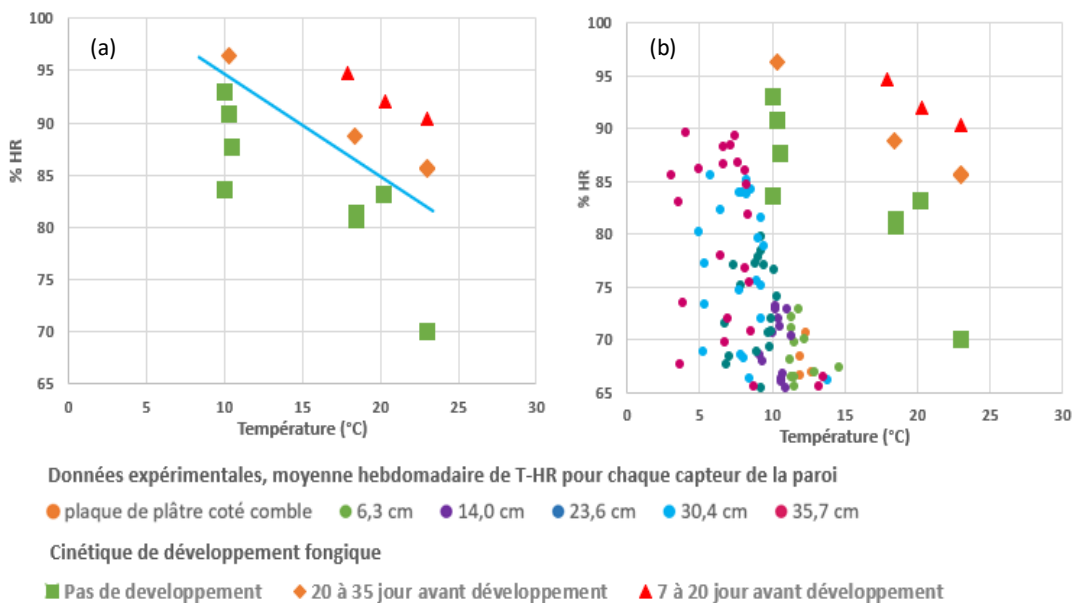


FIGURE 7 : (a) isoplèthe des fibres de chanvre, (b) superposition de l'isoplèthe avec les données in situ

CONCLUSIONS

Malgré quelques dysfonctionnements, l'instrumentation implantée sur le démonstrateur a généré suffisamment de données pour étudier les performances en période chaude avant et après

rénovation. Le couplage de T et HR a montré l'amélioration du confort d'été avec le changement de l'isolation. L'avantage le plus significatif repose sur l'amélioration de l'amortissement par un facteur 3. L'un des principaux points forts de la solution d'isolation développée est son comportement hygrothermique exceptionnel. L'instrumentation en place permet d'observer l'impact de l'adsorption et la désorption sur le flux de chaleur. L'évaluation in situ de la CT du matériau conduit à des valeurs de CT apparente inférieures à celles obtenues en laboratoire. Ces résultats confirment la valeur ajoutée du couplage hygrothermique au sein du matériau biosourcé sur la conductivité thermique. Les phénomènes d'adsorption et de désorption de l'eau sont clairement mis en évidence par l'analyse des évolutions de Pv. Les chaleurs latentes associées interagissent avec le transfert thermique, ce qui permet de lisser les signaux apportant ainsi à la fois une inertie hygrique et une inertie thermique. Ceci est également confirmé par un meilleur confort ressenti par les occupants de la maison. La simulation du comportement hygrothermique du plafond, réalisée avec le logiciel WUFI®, a été validée sur les données expérimentales. En hiver, la simulation pour une année type avec le climat de Bordeaux indique que les flux et les déperditions thermiques, par le plafond, sont réduits de 36 et 30 % avec le changement d'isolation. Le démonstrateur a permis d'identifier les conditions de T et HR atteintes dans les combles et dans la couche d'isolation. Ces valeurs ont été reproduites en laboratoire pour vérifier que la croissance des moisissures n'est pas initiée dans de telles conditions. L'isoplèthe de fibres de chanvre non traitées est ainsi construite pour des plages de 10 à 23°C et de 70 à 98 %HR. La comparaison entre l'isoplèthe de la fibre de chanvre non traitée et les données du démonstrateur indique que les conditions de développement fongique ne sont pas réunies dans l'épaisseur de l'isolant, ni à l'interface entre la plaque de plâtre et l'isolant pour les espèces étudiées.

Pour aller plus loin, il serait intéressant d'étendre la numérisation et l'évaluation du risque fongique à d'autres climats.

REFERENCES

- ADEME, 2024. Décarboner le chauffage : quelle place pour les pompes à chaleur? Agence Transit. Écologique. URL <https://www.ademe.fr/presse/communique-national/decarboner-le-chauffage-quelle-place-pour-les-pompes-a-chaleur-lademe-publie-un-avis-dexpert/> (accessed 1.25.25).
- AFNOR, 2001. NF EN 12667 : Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits de haute et moyenne résistance thermique.
- Antczak, E., Mounir, A., Brachelet, F., Brue, F., Defier, D., 2018. Etude du comportement hygrothermique d'anas de lin utilisés comme isolant en vrac de combles perdus. Bordeaux, France.
- BBCA, 2024. Référentiel de labélisation des bâtiment neufs (No. V3.2). Association BBCA.
- Boumediene, N., 2022. Comportement hygrothermique de matériaux biosourcés à l'échelle de la paroi en ambiance contrôlée et in-situ (phdthesis). Université de Rennes ; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie).
- CSTB, 2020. CPT 3815 : Guide sur les dispositions et règles de calcul relatives aux systèmes d'étanchéité à la vapeur d'eau pour les combles.
- CSTB, 2012. Règles Th-U Fascicule 2 : Matériaux.
- CTICM-ABL, 2022. Couverture acier avec isolants biosourcés - Rapport de synthèse - Pro'Réno.
- Deborde, L., Andres, Y., Lanos, C., Collet, F., 2024. Assessment of fungal development risk on bio-based thermal insulation. *Ind. Crops Prod.* 222, 119889. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119889>
- Hoxha, D., Ismail, B., Rotaru, A., Izabel, D., Renaux, T., 2022. Assessment of the Usability of Some Bio-Based Insulation Materials in Double-Skin Steel Envelopes. *Sustainability* 14. <https://doi.org/10.3390/su141710797>

- IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 184. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Khaled, S., 2023. Contribution au développement d'une méthode inverse pour la caractérisation hygrique des matériaux de construction (thesis). Université de Rennes (2023-....).
- Malagoni de Almeida, M., 2022. Etude de la rénovation hygrothermique de parois anciennes utilisant des matériaux biosourcés (Theses). INSA de Toulouse.
- Montrose, G., 2021. Study of the Thermal Performance of Bio-Sourced Materials Used as Thermal Insulation in Buildings under Humid Tropical Climate.
- Nelson, A.P., 2020. Etude de matériaux biosourcés pour l'isolation thermique des bâtiments en climat tropical humide. Université des Antilles, Antilles.
- WMO, 2025. L'OMM confirme que 2024 est l'année la plus chaude jamais enregistrée [WWW Document]. Organ. Météorologique Mond. URL <https://wmo.int/fr/media/news/lomm-confirme-que-2024-est-lannee-la-plus-chaude-jamais-enregistree-avec-une-temperature-superieure> (accessed 1.25.25).