

Instrumentation d'un comble isolée en fibres végétales, données expérimentales et modélisations Wufi®

Deborde Lily^{1,2}, Florence Collet², Christophe Lanos ¹²

¹ Cavac Biomatériaux, 50 av des Rondais, 85210 Saint Hermine

² 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 l'étude d'un isolant (INNOFIB) à base de fibre de chanvre à l'échelle bâtiment. La performance hygrothermique est étudiée à travers un suivi expérimental avant / après rénovation du comble d'une maison habitée, durant 18 mois. La température (T), l'humidité relative (HR) et le flux de chaleur sont enregistrés. Le couplage de la T et de l'HR avec la mesure du flux de chaleur permet l'évaluation in situ de la conductivité thermique de l'isolant et l'observation de l'impact des phénomènes d'adsorption-désorption sur le flux de chaleur. Ces résultats confirment la valeur ajoutée du couplage hygrothermique au sein du matériau biosourcé sur le flux de chaleur et donc la conductivité thermique apparente. Pour compléter l'étude, une modélisation WUFI® est réalisée. La réponse numérique des parois avant / après est validée en reproduisant les conditions du démonstrateur. L'isolant INNOFIB est créé dans la bibliothèque matériaux avec les paramètres hygriques identifiés selon la méthode inverse développée au LGCGM. L'étude numérique du comble selon les deux configurations est réalisée sur une année type avec le climat de Bordeaux et selon une sollicitation sinusoïdale créée à partir des données climatiques mesurées. Le déphasage, l'amortissement, les déperditions, les apports thermiques ainsi que le bilan énergétique du plafond sont calculés et comparés avant / après. Les résultats montrent que l'isolation développée est performante.

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

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. L'exploitation des bâtiments représente 47 % des consommations énergétiques françaises (ADEME, 2024). 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). 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 les matériaux du 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 porte sur les travaux menés à l'échelle bâtiment sur le démonstrateur. Il s'agit d'une rénovation de l'isolation d'un plancher haut sur combles perdus. L'étude expérimentale comprend deux phases : avant et après rénovation. L'instrumentation, l'analyse des données sur la période chaude, ainsi que la simulation sur WUFI® sont présentés. L'objectif est d'évaluer les performances hygrothermiques de l'isolant développé.

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 in-situ est de 17,2 kg/m³. La conductivité thermique sèche (CT), mesurée par la méthode flux métrique (AFNOR, 2001) est de 51,2 mW.m⁻¹.K⁻¹.

Le démonstrateur est situé en Vendée, il s'agit d'une maison, habitée, de plain-pied. La paroi étudiée correspond au plancher haut sur combles perdus. Avant la rénovation, celui-ci est isolé avec des fibres de verre en vrac sur des plaques de plâtre (Fig. 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'isolation 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. En octobre 2022, la laine de verre est retirée et l'isolant INNOFIB est soufflé avec une cardeuse *ISOBLOW Mini Plus*. Des piges sont utilisées afin de maîtriser l'épaisseur mise en place (47 cm).



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, comprenant la phase **avant** de mai à octobre 2022 où le comble est isolé avec la fibre de verre d'origine et la phase **après**, d'octobre 2022 à octobre 2023, avec la solution INNOFIB. 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*, avec un signe positif lorsque le flux est ascendant. 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 (Fig. 1 - d), le fluxmètre est positionné à l'interface plaque de plâtre - isolant.

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

$$P_v = HR \cdot \exp \left(18,986 - \frac{4052}{235,86 + T} \right) \quad (1)$$

La **résistance thermique** totale (R_{tot}) in situ est calculée selon la norme ISO 9869. Avec ΔT l'écart de T entre l'ambiance du comble et l'ambiance intérieure, Φ le flux de chaleur ($W \cdot m^{-2}$), t 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 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). 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, $R_{si} = R_{se} = 0,10 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Dans le cas d'un flux descendant, $R_{si} = R_{se} = 0,17 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ (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 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

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

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 (Fig. 2). Les données sont également analysées à l'aide de **profils** de T et de Pv tracés à différents instants. Cette représentation permet notamment de visualiser les pics d'adsorption et désorption au cœur de l'isolant.

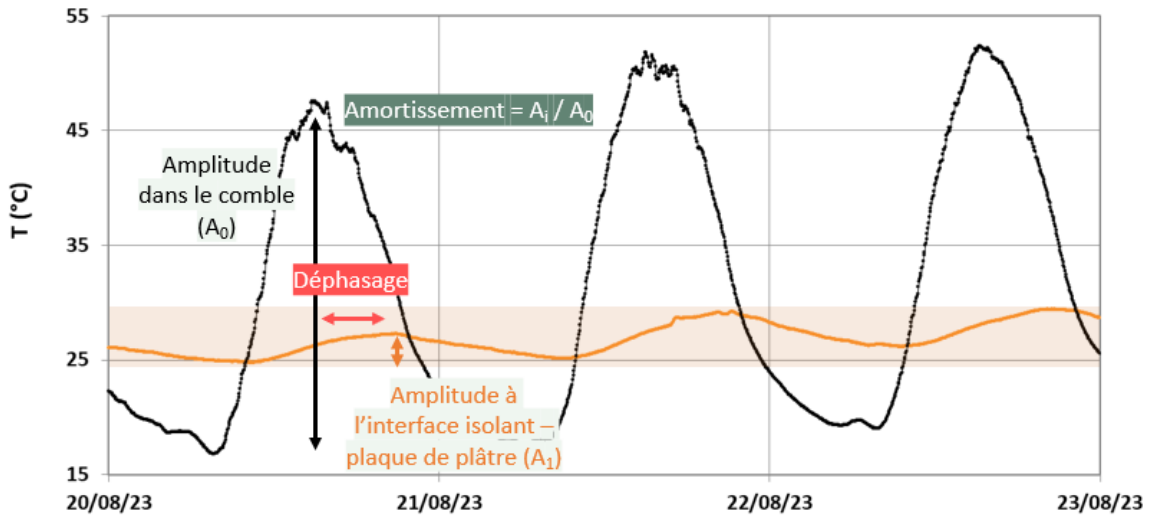


FIGURE 2. Calcul du déphasage et du facteur d'amortissement

II. MESURES IN-SITU

La CT est évaluée conformément à la norme ISO 9869 à partir des mesures de flux et de l'équation 3. 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.

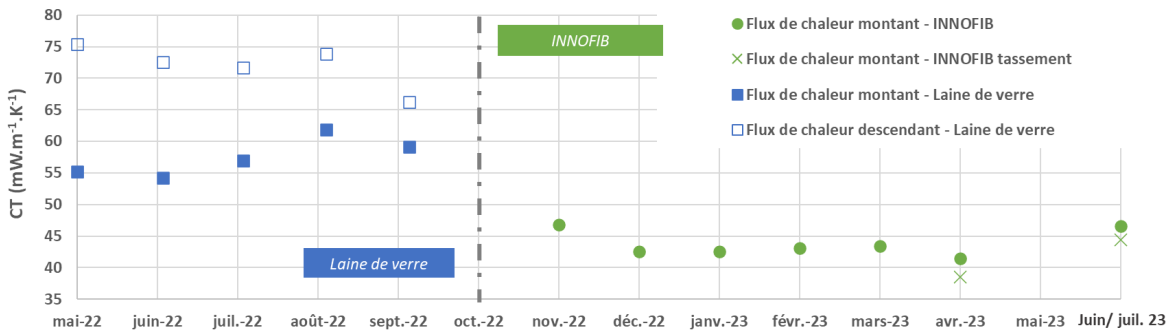


FIGURE 3. Moyenne mensuelle de la CT avant et après rénovation

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 Fig. 3. 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. Présentant des conditions météorologiques de T similaire, les canicules d'août 2022 et 2023 ont été sélectionnées pour la comparaison des cinétiques au sein des isolants avant / après (Fig.4).

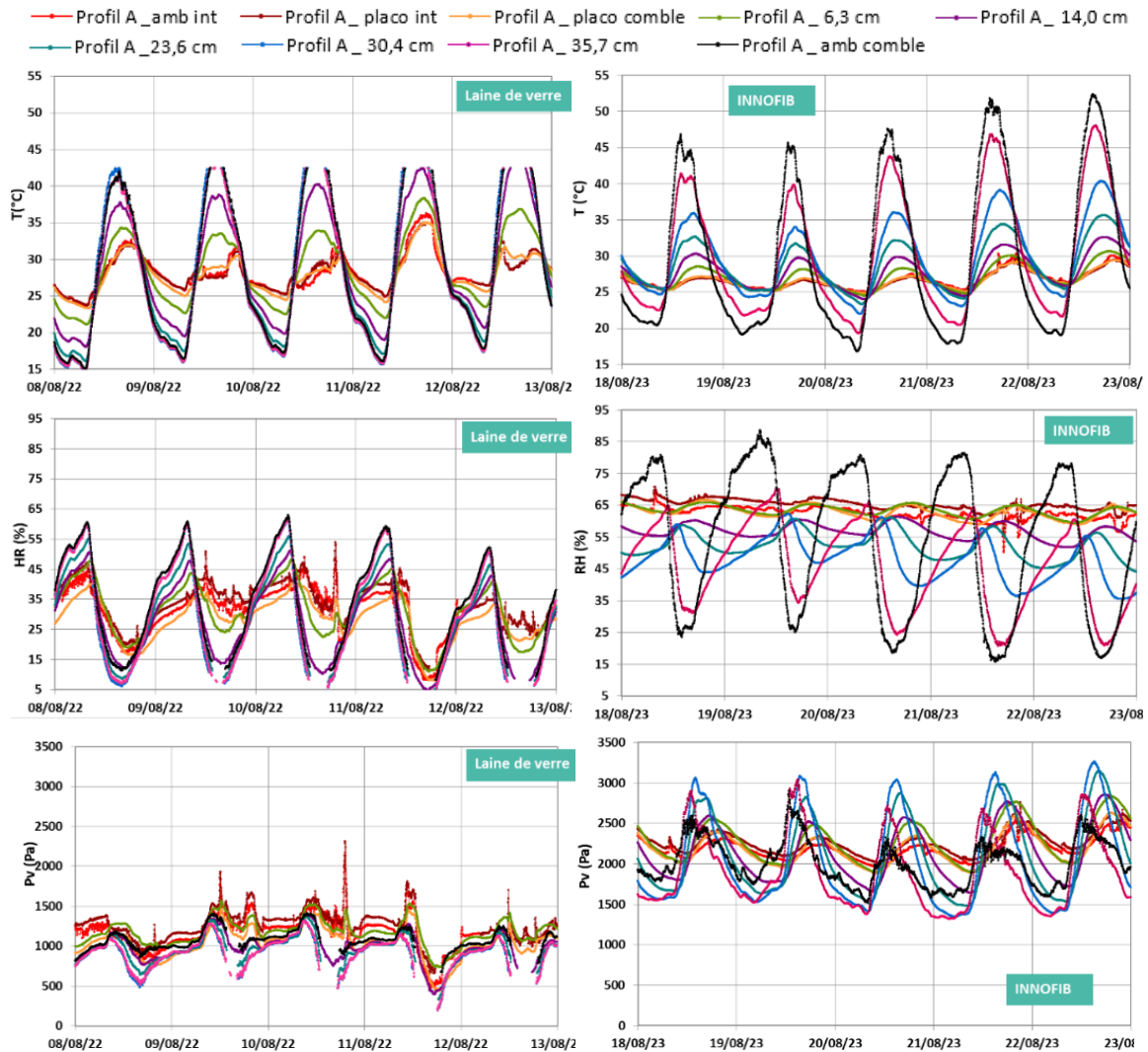


FIGURE 4. T, HR et Pv du salon durant la canicule d'août 2022 et 2023

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 (Fig. 4). 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 participe au confort en amortissant et en déphasant les amplitudes de T.

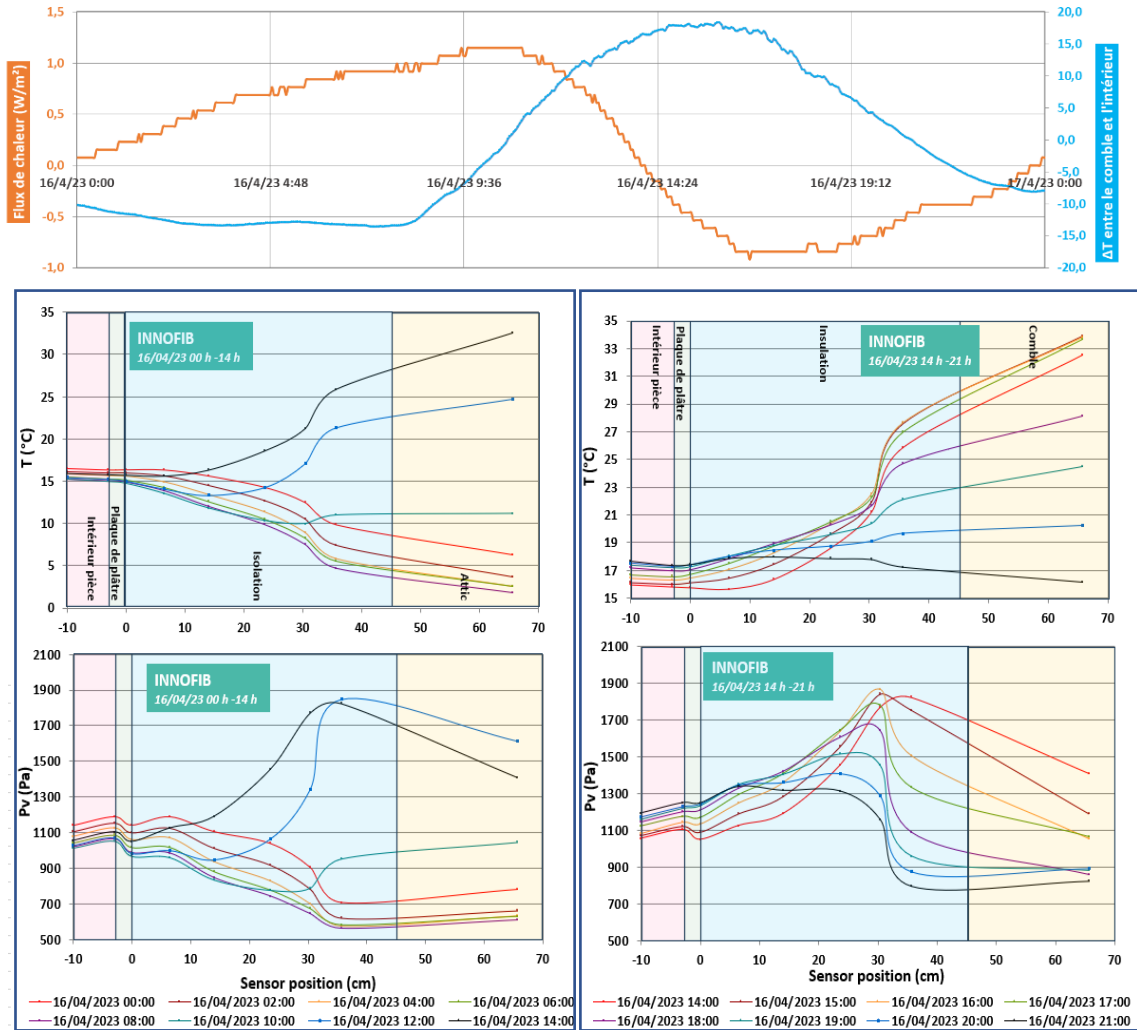


FIGURE 5. Evolutions du flux de chaleur et de ΔT et profils de T et Pv pour la journée du 16 avril 2023

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 Fig. 5. En effet, l'évolution du flux de chaleur n'est pas systématiquement coordonnée avec celle du ΔT . La nuit, le ΔT négatif est bien coordonné avec un flux ascendant, en fin de journée le ΔT positif induit un flux descendant. Dans les étapes de transition, entre 8 h et 15 h et entre 22 h et 23 h, le ΔT et le flux ne sont plus coordonnés. Le délai entre l'inversion du ΔT et l'inversion du sens de flux est plus

court le soir que le matin. Le flux de chaleur atteint son maximum à 9 h 44, puis reste constant jusqu'à 11 h 02 et s'inverse vers 14h. L'inversion de ΔT autour de 10 h est suivie d'une poursuite de l'augmentation de ΔT alors que le flux est stagnant puis décroissant. Le ΔT est maximal à 15 h 51. Ces effets s'expliquent par l'effet combiné de la diffusion de chaleur, caractérisée par une faible inertie au regard des propriétés thermiques de l'isolant, et des phénomènes de sorption / désorption. En effet, 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.

La CT apparente est ainsi 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.

III. 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 reproduise 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 (Deborde, 2025) en simulant des périodes de mesures in situ, la simulation permet d'étendre l'étude.

A. Période froide

Pour l'analyse de la période froide le climat de Bordeaux est utilisé pour le côté comble et celui de la norme EN 15026 pour le côté intérieur. Les résultats (Fig. 6) mettent en avant les phénomènes notés expérimentalement : l'isolant *INNOFIB* conduit un meilleur amortissement en 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 énergétiques 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 déperditions, 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 induite par les déperditions par le plafond 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.

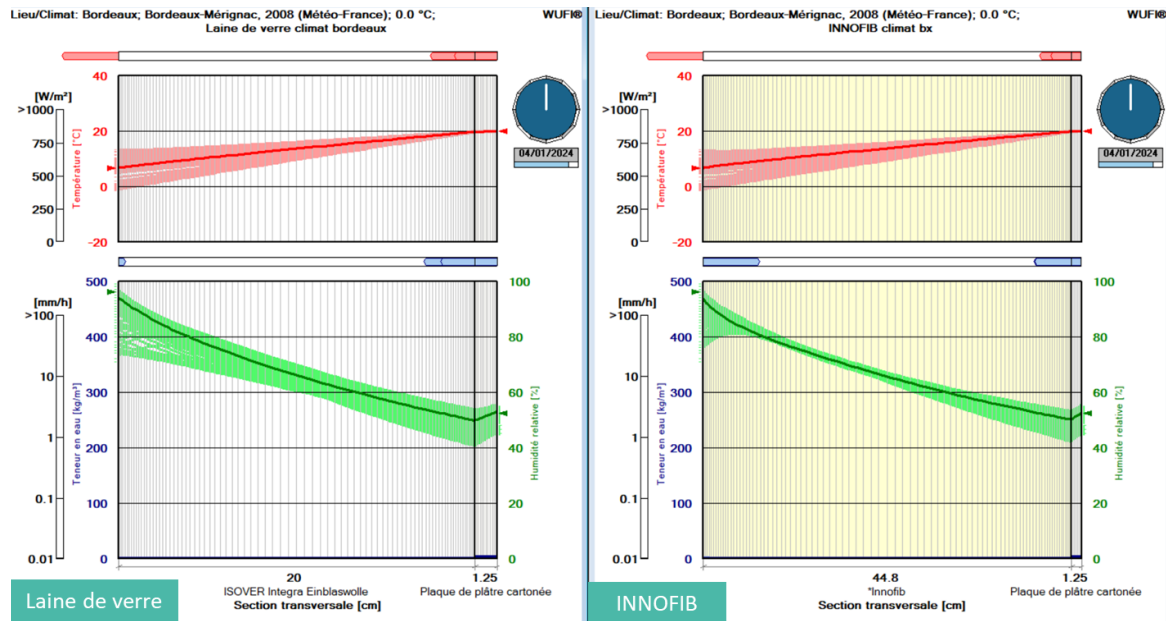


FIGURE 6. Variogrammes Wufi® dans les configurations avant (à gauche) et après rénovation (à droite) : courbes claires = 1 au 4 janvier, les courbes intenses = valeurs instantanées du 4 janvier à 12 h 00

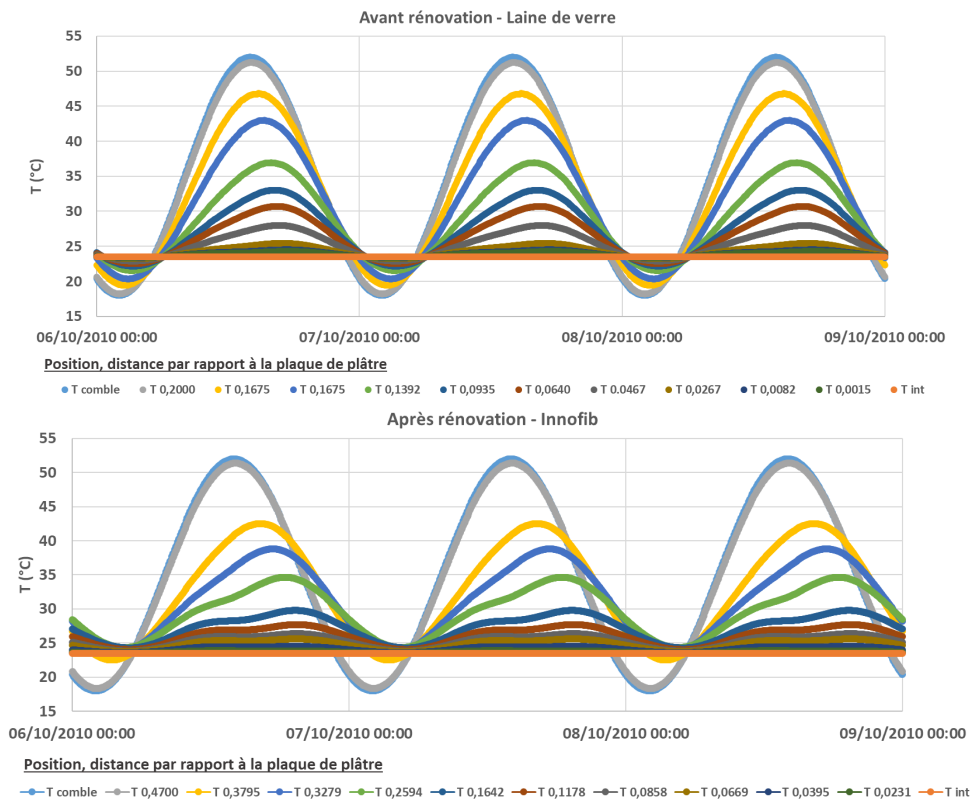


FIGURE 7. Cinétiques de températures sous sollicitations sinusoïdales avant et après rénovation

B. Période chaude

L'étude numérique en période chaude est réalisée sur une sollicitation sinusoïdale dont la moyenne et l'amplitude correspondent à celle mesurées in situ lors de la canicule 2023. La Fig. 7

présente la réponse de la paroi avant et après rénovation. Les effets des transferts couplés et des phénomènes de sorption, importants dans le cas de la solution INNOFIB, se traduisent par des courbes d'évolution de la T perdant le caractère sinusoïdal au sein de la couche isolante. Ces courbes de T permettent d'estimer le déphasage maximum de l'onde de chaleur du comble vers l'intérieur, avec un déphasage de 3 h 27 avant rénovation et 5 h 32 après, soit une amélioration de 38 %. Atteindre des valeurs de 5 à 6 heures permet de mieux gérer les conditions de confort l'été.

La distribution de l'amortissement au sein de la couche d'isolant peut être visualisée sur la Fig. 8 où l'amplitude relative de l'amortissement est tracée en fonction de la position relative dans la couche d'isolant. Un matériau sans couplage hygrothermique est caractérisé par une droite. L'étape avant rénovation est caractérisée par une réponse linéaire, résultat attendu pour une laine de verre. Pour la solution biosourcée INNOFIB, les phénomènes de couplage agissent principalement sur la moitié supérieure de l'épaisseur, comme observé sur les profils de T et de Pv (Fig. 4).

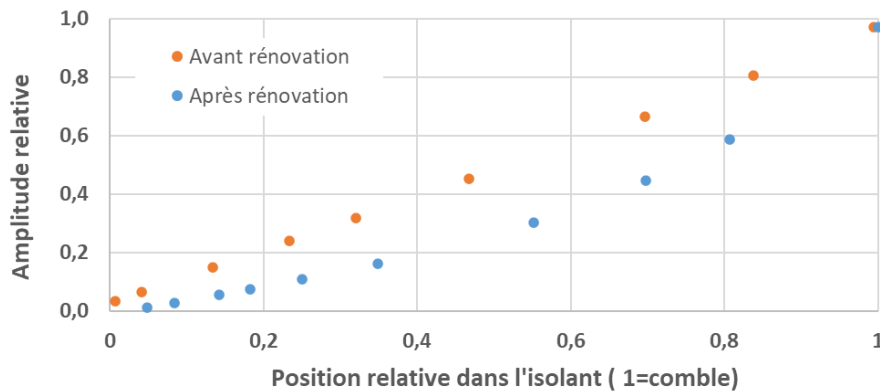


FIGURE 8 . Amplitude relative en fonction de la position dans l'isolant

IV. CONCLUSION

L'instrumentation implantée sur le démonstrateur a permis d'étudier les performances en période chaude avant et après rénovation. Les transferts couplés dans la solution INNOFIB permettent une amélioration des performances à la fois en termes de conductivité thermique apparente et d'inertie. L'avantage le plus significatif repose sur l'amélioration de l'amortissement par un facteur 3. L'instrumentation en place permet de mettre en évidence l'impact de l'adsorption et la désorption sur le flux de chaleur, ce qui conduit à une conductivité thermique apparente inférieure à celle mesurée en laboratoire. 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®, validée antérieurement sur les données expérimentales, permet de compléter l'étude par différentes modélisations. 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. En été, la modélisation permet de mieux évaluer les déphasages (amélioration de 38 %) et les contributions des phénomènes hygriques sur le comportement de la paroi.

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., Defer, 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., 2025. L'isolation thermique biosourcée, de la formulation au démonstrateur : performances hygrothermiques, comportement ignifuge et résistance fongique (These de doctorat). Université de Rennes (2023-....).

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).