



Projet ISO RHUM

Etude du comportement à l'eau des parois complexes verticales ou
combles en milieu tropical humide

Tache 3 - Comportement à l'eau des matériaux isolants et de leur régulation des conditions hygrothermiques dans les combles en milieu tropical



Rédaction : Julie BOSSU – Chargée de recherche CNRS, UMR EcoFoG

Date : 03/07/2025

Table des matières

1. Contexte de l'étude	3
1.1 Contraintes liées à l'utilisation des isolants en milieu tropical	3
1.2 Comportement à l'eau et régulation de l'humidité	3
1.3 Problématique et objectif général de l'étude	3
2. Méthodes développées	4
2.1 Matériaux isolants utilisés pour l'étude	4
2.2 Mesure du comportement à l'eau des matériaux isolants	5
2.2.1 A l'échelle microscopique – Sorption Dynamique Vapeur	5
2.3 Développement d'un prototype de terrain pour les essais de suivi de conditions hygrothermiques dans les combles isolés en conditions réelles	7
2.3.1 Dimensionnement, construction et installation des modules de terrain	7
2.3.2 Choix des capteurs, réglage et calibration	8
3. Résultats & Discussion	10
3.1. Comparaison du comportement à l'eau des matériaux isolants testés	10
3.1.1 A l'échelle microscopique (DVS) – isothermes de sorption/désorption	10
3.1.2 A l'échelle macroscopique – teneurs en eau d'équilibre obtenues par thermogravimétrie	11
3.2 Analyse des variations hygrothermiques au sein des isolants dans les dispositifs de terrain instrumentés	13
3.2.1 Evaluation du système de mesure et données acquises	13
3.2.2. Analyses des variations thermiques dans la pièce inférieure et évaluation des performances d'isolation des matériaux testés	14
3.2.3 Analyse des variations hygrothermiques dans les combles et les isolants et discussions quant à la régulation de l'humidité par les isolants	16
4. Conclusion	19

I. Contexte de l'étude

I.1 Contraintes liées à l'utilisation des isolants en milieu tropical

Les bâtiments en milieu tropical humide subissent d'importantes variations de température et d'humidité. En Guyane, l'humidité relative de l'air peut varier entre 50 et plus 95%.

De telles conditions imposent un risque de condensation à la surface des isolants en contact avec les parois qui peuvent alors se dégrader. Elles soumettent également les isolants à de constantes variations de teneur en eau des matériaux selon leur hygroscopicité. **La quantité d'eau contenu dans le matériau peut avoir un impact plus ou moins fort sur les propriétés thermiques, mécaniques et de durabilité des isolants.** Toutefois les matériaux isolants naturellement hygroscopiques, tels que la plupart des produits biosourcés, permettent une régulation de l'humidité relative ambiante en jouant le rôle de tampon hydrique.

L'ensemble de ces effets rendent complexe l'anticipation des conditions hygrothermiques dans les différentes zones des bâtiments isolés en milieu tropical.

I.2 Comportement à l'eau et régulation de l'humidité

Le comportement à l'eau des produits isolants est une propriété clé qu'il est nécessaire de connaître afin de mieux anticiper les échanges qui peuvent potentiellement se produire entre le matériau et l'air ambiant, au cours de sa mise en service dans le bâtiment. Cette propriété, qui renseigne sur la capacité d'un matériau à s'équilibrer avec son environnement en absorbant ou désorbant de l'eau sous forme vapeur, dépend à la fois de sa microstructure et de sa composition chimique. **La méthode et la durée du suivi de masse au cours de la prise d'eau, la taille et le type d'échantillon sélectionnés, ainsi que le choix des critères de stabilisation sont autant de paramètres qui conditionnent les résultats obtenus.**

Ajouté au manque de bibliographie concernant le comportement à l'eau des matériaux isolants et plus largement des matériaux biosourcés, il est difficile aujourd'hui d'anticiper comment les ceux-ci se comporteront dans les conditions spécifiques réelles de la Guyane.

I.3 Problématique et objectif général de l'étude

Cette étude vise, dans un premier temps à comparer le comportement à l'eau de différentes modalités de produits isolants, conventionnels et biosourcés. Plusieurs méthodes, à l'échelle microscopique comme macroscopique, sont envisagées pour permettre de rendre compte de la façon la plus exhaustive possible des différences de comportements observées.

Une seconde partie vise à utiliser ces mêmes isolants, au sein de prototypes de terrain instrumentés afin de répondre aux questions suivantes :

- quels sont les isolants les plus efficaces d'un point de vue thermique ?
- quel est l'impact des variations hygrothermiques environnementales sur la température et l'humidité relative de l'air de part et d'autre de l'isolant ainsi qu'en son cœur ?
- un déphasage thermique comme hydrique est-il observé ?
- les réponses des isolants ici mises en évidence peuvent-elle être mise en lien avec leur comportement à l'eau ?

II. Méthodes développées

II.1 Matériaux isolants utilisés pour l'étude

Plusieurs matériaux isolants, conventionnels ou biosourcés, locaux et importés, ont été sélectionnés pour permettre de tester un large panel de comportements. La **Table 1** détaille leur composition et origine.

Table 1 – Comparaison des modalités de produits isolants testés

Nom du matériau	Conventionnel/Bio	Type	Origine	Fabricant	Composition	Code rapport
Laine de roche	Conventionnel	rouleau	Métropole	Roulrock	Fibres minérales	
Laine de verre	Conventionnel	vrac	Métropole	Isover	Fibres minérales	
Polystyrène	Conventionnel	panneau	Guyane	Sagip	Pétro-sourcé	
Ouate de cellulose	Intermédiaire	vrac	Métropole	Climacell	Cellulose recyclée	
BioFib	Biosourcé	panneau	Métropole	BioFib	Chanvre/Coton/Lin	
Pavaflex	Biosourcé	panneau	Métropole	Pavatex	Fibres bois tempérés	
Isolair	Biosourcé	panneau	Métropole	Pavatex	Fibres bois tempérés	
Emerwall	Biosourcé	panneau	Martinique	Emerwall	Fibres canne à sucre	
GRI	Biosourcé	panneau	Guyane	R&D Labo	Fibres grignon (bois local)	
SIM	Biosourcé	panneau	Guyane	R&D Labo	Fibres simarouba (bois local)	



Figure 1 : photographies des panneaux isolants biosourcés testés dans l'étude. A à D : panneaux commerciaux ; A - BioFib, B - Pavaflex, C - Isolair, D - Emerwall. E et F : panneaux réalisés à partir de fibres de bois guyanais dans le cadre du projet ANR PANTHER²Guyane : E – Panneau de simarouba (*Simarouba amara*) ; F – Panneau de grignon (*Sextonia rubra*)

II.2 Mesure du comportement à l'eau des matériaux isolants

II.2.1 A l'échelle microscopique – Sorption Dynamique Vapeur

Cette méthode permet d'évaluer la capacité des fibres à stocker ou restituer de l'eau en fonction des conditions environnementales ambiantes. Elle donne une indication du caractère hygroscopique du matériau, soit de son affinité à l'eau. L'outil mesure la quantité d'eau absorbée ou restituée par un échantillon de quelques mg pour des conditions hygrothermiques données (de T : 5-45°C ; RH : 0-98%, +/-1%) ainsi que sa cinétique de sorption/désorption.

Le principe de la DVS est basé sur la gravimétrie : à l'aide d'une balance de haute précision positionnée au-dessus des paniers suspendus, la variation de masse de l'échantillon est suivie à mesure que la concentration en vapeur d'eau (ou l'humidité relative) entourant celui-ci est modifiée, en ajustant les flux d'azote sec et saturés dans la chambre de l'échantillon. Les variations de masse sont calculées en comparant la masse du panier qui est chargé avec l'échantillon («Sample») et celle d'un panier vide («Reference») (**Figure 2**). En comparaison de la méthode statique des solutions salines, cette technique présente l'avantage de fournir des résultats complets sur un laps de temps bien plus court.

La **Figure 3** détaille un résultat type issu du protocole de mesure utilisé pour cette étude balayant 11 paliers d'humidité relative (en pointillés rouges) entre 0% (état anhydre) et 95% (état saturé). On peut observer l'évolution de la masse de l'échantillon en fonction du temps (en bleu) au cours des différents paliers d'humidité relative : entre l'état initial anhydre et l'état saturé, l'échantillon se charge en eau (sorption) et entre l'état saturé et l'état final anhydre il relargue l'eau (desorption). Au cours de chaque palier, la masse évolue rapidement puis se stabilise plus ou moins rapidement selon la cinétique de sorption/désorption de l'échantillon testé. Le passage d'un palier à l'autre est conditionné par un critère de stabilisation de la masse ($dm/dt < 0.01\%$). Les mesures sont réalisées à 25°C.

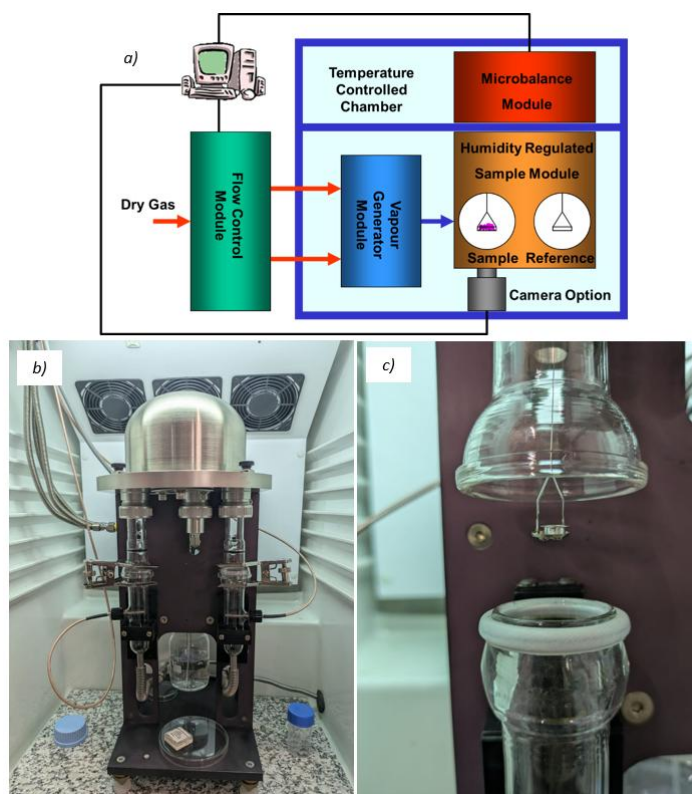


Figure 2 - a) schéma de fonctionnement ; b) chambre contrôlée en température ; c) zoom sur le panier de chargement de l'échantillon

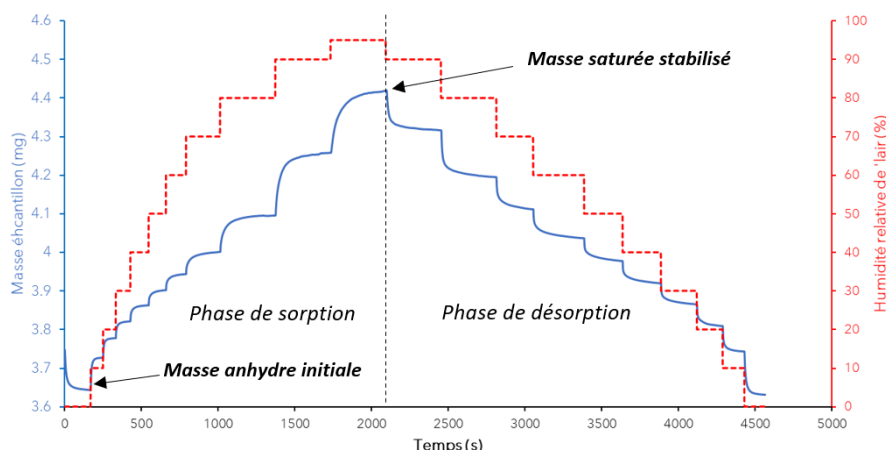


Figure 3 - Résultats bruts de DVS sur un échantillon de fibre de bois : données brutes de suivi temporel de masse (en bleu) issues d'un protocole de mesure balayant 11 paliers d'humidité relative (en pointillés rouges) entre 0% (état anhydre) et 95% (état saturé)

L'extraction des masses stabilisées permet de calculer les teneurs en eau d'équilibre de l'échantillon (**EMC** pour *Equilibrium Mass Content*) pour chaque palier d'humidité relative $x\%$, selon la formule suivante :

$$EMC = \frac{mx\% - m0\%}{m0\%} \quad (\text{Equ. 1})$$

Il est alors possible de tracer $EMC = f(x\%)$, afin de représenter l'isotherme de sorption/désorption de l'échantillon (teneur en eau d'équilibre pour chaque palier d'humidité relative lors de la sorption et désorption d'eau).

A l'échelle macroscopique – thermogravimétrie en enceinte climatique

Des échantillons macroscopiques ($5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^3$ pour les panneaux et entre 5 et 10 g pour les fibres en vrac) sont cette fois testés. Trois réplicas de chaque échantillon sont stabilisés en chambre climatique selon les trois conditions suivantes (**Figure 3**) :

- Humidité relative de l'air : 65% - Température : 25°C
- Humidité relative de l'air : 80% - Température : 25°C
- Humidité relative de l'air : 95% - Température : 25°C

Leur masse est mesurée sur une balance de précision (Sartorius, $\pm 0.01 \text{ mg}$) selon une échelle temporelle logarithmique (tous les jours au démarrage puis points de mesure de plus en plus espacés) jusqu'à ce qu'une stabilisation complète ($dm/dt < 0.1\%$) soit observée pour tous les échantillons. Les échantillons sont ensuite séchés 3 jours à 103°C pour obtenir leur masse anhydre, et recalculer leur teneur en eau d'équilibre pour chaque point de mesure, selon la même équation que celle détaillée pour la DVS (**Equ. 1**).



Figure 3 – a) Echantillons macroscopiques de matériaux isolants stabilisés en enceinte climatique (température et humidité relatives contrôlées) jusqu'à stabilisation ; b) Trois échantillons réplicas du panneau isolant à base de fibres de canne à sucre (Emerwall).

II.3 Développement d'un prototype de terrain pour les essais de suivi de conditions hygrothermiques dans les combles isolées en conditions réelles

II.3.1 Dimensionnement, construction et installation des modules de terrain

Les modules de terrains (**Figure 4**) ont été dimensionnés de façon à tester une isolation des combles sur le faux plafond. Cette technique d'isolation est la plus commune en Guyane. Elle vise à limiter l'échauffement dû au rayonnement solaire sur la toiture. Les techniques constructives (ossatures bois) et matériaux utilisés (bois locaux et toit en tôle ondulée) sont représentatifs des habitats guyanais. 6 prototypes ont été réalisés dans l'objectif de tester 6 matériaux différents dans des conditions environnementales équivalentes.

Afin d'éviter les ponts thermiques, les assemblages des différents volumes ont été jointés (colle PVC/silicone) et les espaces sous les ondes des tôles bouchés. Deux ouvertures sont usinées dans chaque box inférieur, simulant la pièce à vivre climatisée ou non, pour positionner les raccords électriques et l'arrivée de climatisation, également jointés au silicone pour éviter toute fuite. Les étapes de fabrication sont illustrées en **Figure 5**. Les dimensions des isolants testés sont de 35x35x3 cm³. Des films de protection (pare-pluie) peuvent être positionnés ou non de part et d'autre des matériaux isolants. Un système de fermeture latéral amovible permet de tester des combles ouverts (grilles perforées) ou fermés (plaques de plexiglass). Une porte coulissante permet d'ouvrir les modules afin de positionner les isolants et les capteurs. Un système de climatisation portable est ensuite réalisé (**Figure 6**), afin de distribuer de façon homogène l'air frais dans chacun des boxes inférieurs des 6 prototypes dans la configuration climatisée.

Les essais ont été menés sur les mois de Juin et Juillet sur un site d'essai située à 5km de la côte, en zone ouverte non ombragée mais protégée du vent, en milieu urbain et éloigné de la lisière de la forêt.

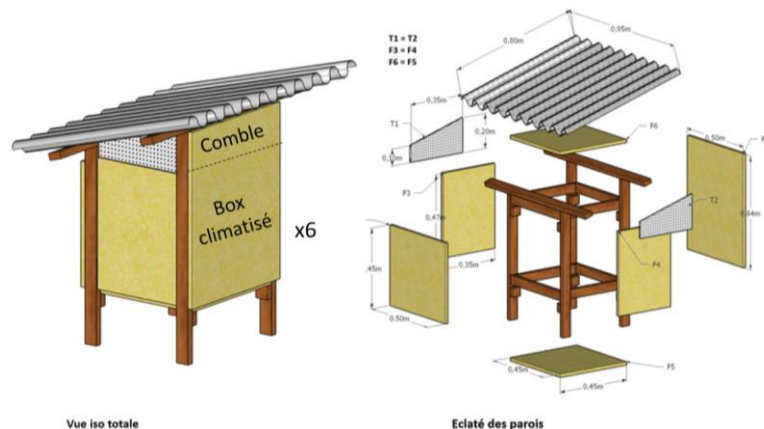


Figure 4 – Plan des prototypes de terrain, avec une partie comble qui accueille l’isolant et une partie inférieure climatisée.



Figure 5 – Détail des étapes de fabrication d'un prototype de terrain (structure en grignon, parois en contreplaqué et toit en tôle ondulée). Dans cet exemple, le prototype est équipé du panneau Emerwall, pour une configuration combles fermés (plaques plexiglass).



Figure 6 – Dispositif de terrain complet assemblé, avec les 6 prototypes d'essai et la station de climatisation centrale. Les prototypes sont alignés selon l'axe N/S et les toitures sont inclinées face à l'est. Des systèmes de protection imperméables (tubes PVC gris fermés avec du plexiglass) permettent d'assurer le système électrique face aux intempéries et notamment aux pluies fortes.

II.3.2 Choix des capteurs, réglage et calibration

L'objectif du système d'instrumentation est de permettre la mesure, en temps réel, sur une période de 4 jours minimum :

- Des conditions environnementales extérieures
- De la température de surface sous tôle
- De l'humidité et de la température dans les combles (au-dessus, dans et sous l'isolant)
- De l'apparition de points de condensation sous tôle
- De l'humidité et de la température dans le box inférieur

La mesure de la température de surface de la toiture a été effectuée grâce à des thermocouples collés sur la surface métallique intérieure des tôles, reliés à une centrale d'acquisition autonome. Pour les capteurs installés dans les combles, le choix s'est porté sur des Raspberry équipés de caméras pour le suivi de la condensation, et sur des capteurs RH/T type DHT22 permettant une mesure plus précise de l'humidité et la température que les capteurs DHT11, connectés sur une carte d'acquisition ESP32, permettant à la fois

un volume de stockage de données importants et une transmission des données en temps réel par signal Wifi (**Figure 7**). Pour la mesure des conditions hygrothermiques dans les boxs inférieurs, des capteurs autonomes TinyTag ont été utilisés, programmés avant chaque essai. Afin de garantir l'acquisition de données précises, l'ensemble des capteurs ont été calibrés : les capteurs ont été positionnés dans une enceinte climatique régulée à 25°C et 65% RH puis à 85 % RH, pendant deux jours pour chaque palier. Une erreur statique indépendante des conditions a pu être observée et corrigée pour chaque capteur.

Trois prototypes ont été équipés du système ESP32 et trois autres du système Raspberry permettant en plus le suivi de la condensation par caméra. Le pas de mesure a été fixé à 5 minutes pour l'ensembles des capteurs. Chaque essai a duré un minimum de 4 jours. La **Figure 8** illustre la mise en place des capteurs au niveau des isolants et dans les prototypes.

Finalement le système d'acquisition a été conçu afin de garantir une bonne robustesse du système et la transmission et l'enregistrement des données acquises au cours de l'essai en temps réel sur le PC d'acquisition central. Le schéma d'implantation complet est présenté en **Figure 9**.

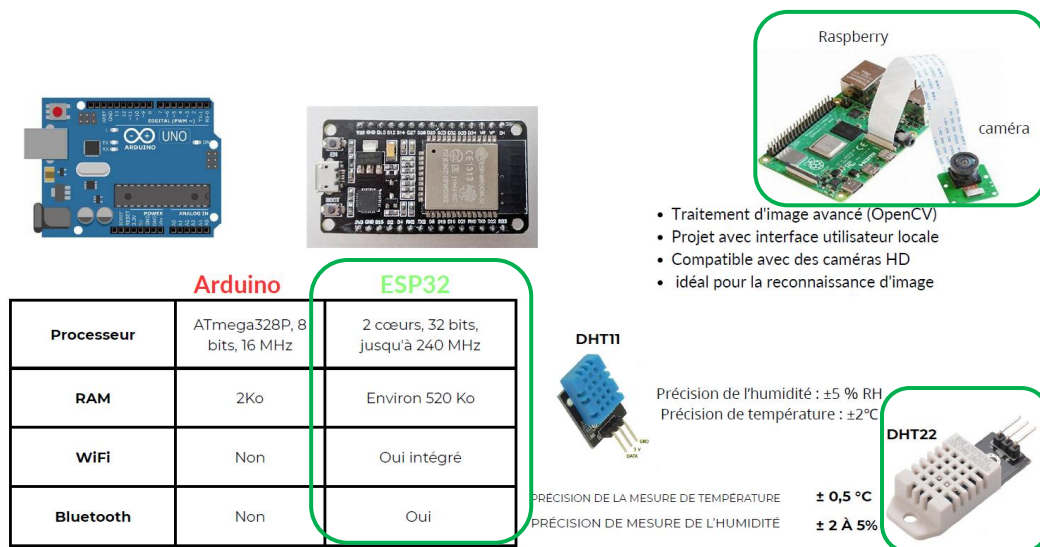


Figure 7 – Choix des capteurs et des systèmes d'acquisition retenus pour le développement de l'instrumentation

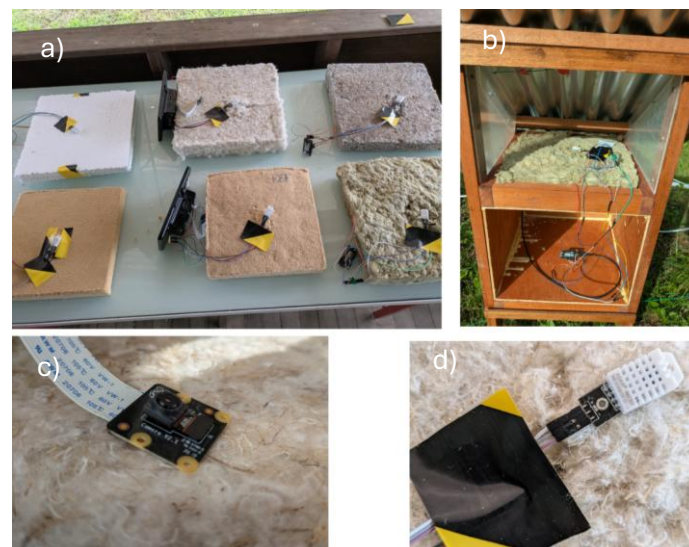


Figure 8 – a) Fixation des capteurs sous, dans (fraisage) et sur les isolants ; b) vue de l'isolant laine de roche et des capteurs installés dans les combles et le box inférieur et connectés à la carte ESP32 ; c) caméra connectée au Raspberry et installé dans les comble face tôle ; d) détail d'un capteur ESP22 sur l'isolant BioFib

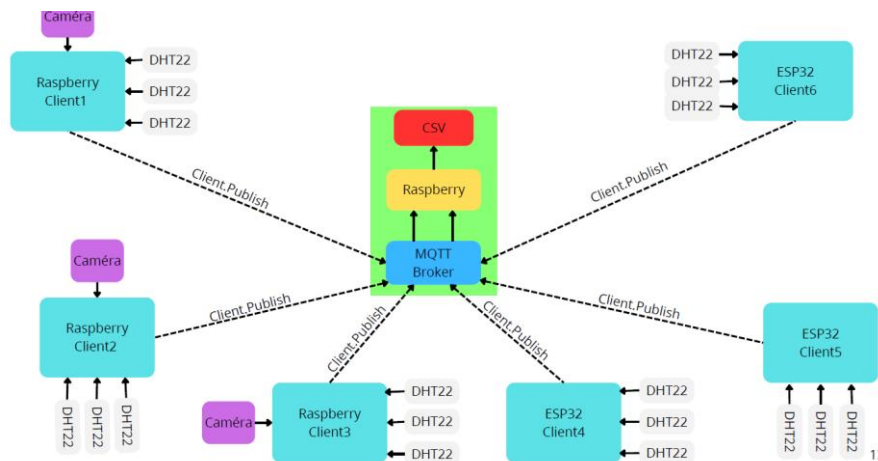


Figure 9 – Schéma d'implantation complet pour les 6 prototypes

III. Résultats & Discussion

III.1 Comparaison du comportement à l'eau des matériaux isolants testés

III.1.1 A l'échelle microscopique (DVS) – isothermes de sorption/désorption

Les essais DVS ont été réalisés sur l'ensemble des matériaux isolants testés dans l'étude. Chaque acquisition a duré environ une semaine pour permettre la bonne stabilisation des échantillons à chaque palier. Les paliers d'humidité relative au-dessus de 80% sont les plus longs (minimum 5h de stabilisation).

L'ensemble des données a permis de tracer les isothermes moyennes spécifiques à chaque matériau afin de les comparer (**Figure 10**). La classification de Brauner établit six différents types d'isothermes, correspondant chacun à un type spécifique de porosité et d'interaction avec la vapeur d'eau. On peut observer que l'ensemble des isothermes des matériaux biosourcés et de la ouate de cellulose suivent un régime de type II, caractéristique des milieux non poreux ou macroporeux avec une adsorption de type multimoléculaire (épaississement progressif de la couche adsorbée), résultat classiquement rencontré pour les matériaux biosourcés et notamment fibres végétales. Au sein de cette classe d'isolant, on peut observer **que les panneaux à base de fibres de bois (panneaux à base de fibres tempérées Pavallex et Isolair et panneaux à bases de fibres de bois guyanais de grignon et de simarouba) sont ceux qui captent le plus d'eau à saturation, avec un teneur en eau supérieure à 20% pour le palier d'humidité relative 95%. Les panneaux Emerwall, à base de canne à sucre, et BioFib, à base de lin, coton et chanvre, ceux qui présentent les plus faibles affinités à l'eau parmi la classe des biosourcés (avec une teneur en eau à saturation de 13.1% et 16.6% respectivement).**

Les panneaux conventionnels minéraux, théoriquement non hygroscopiques, captent une quantité d'eau bien moindre mais toutefois existantes. La laine de verre présente une forme d'isotherme de type III, proche du type II mais avec des interaction milieu-vapeur d'eau très faibles. Pour la laine de roche, les différents réplicas testés présentent tous le même artefact (perte de masse mesurée dans les paliers d'humidité élevés) que nous ne sommes pas parvenu à expliquer. On peut ici considérer que ce matériau ne capte pas d'eau.

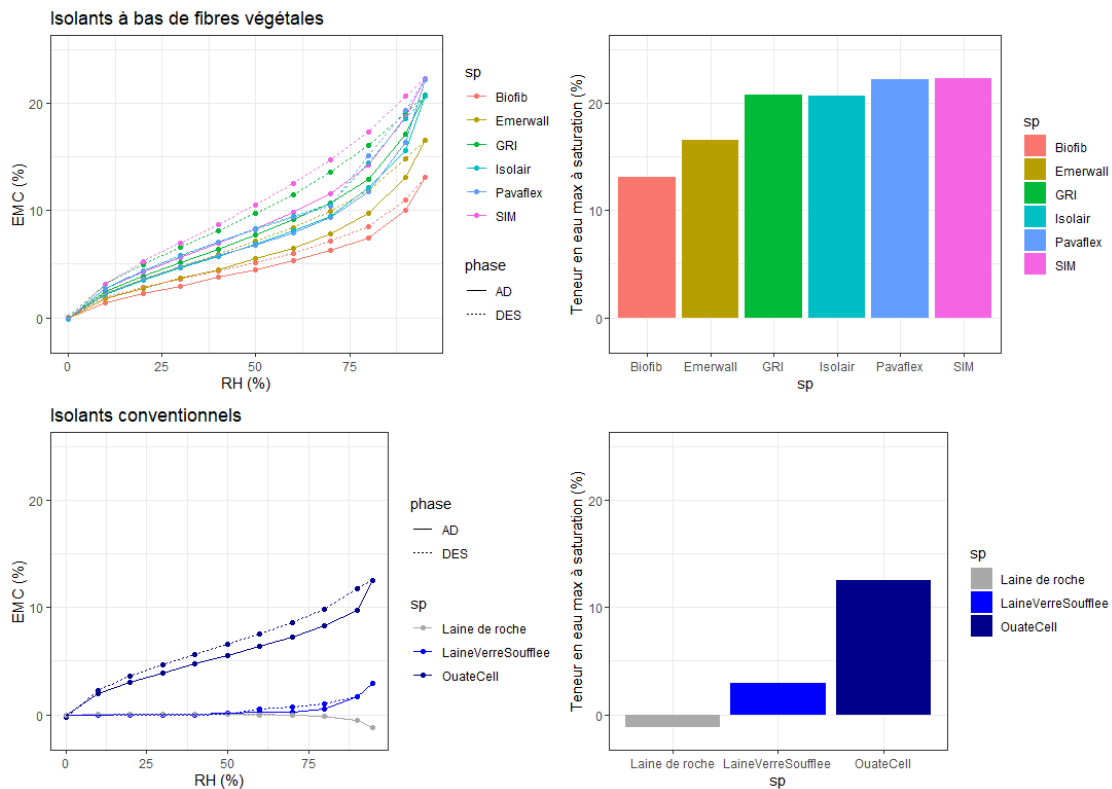


Figure 10 – Comparaison des isothermes de sorption/désorption et de la teneur en eau à saturation pour les différents matériaux

III.1.2 A l'échelle macroscopique – teneurs en eau d'équilibre obtenues par thermogravimétrie

Les essais de sorption à l'échelle microscopique ont été comparés à des essais de thermogravimétrie conduits sur les mêmes échantillons mais à l'échelle macroscopique afin de vérifier si le comportement à l'eau était conservé. L'évolution des teneurs en eau des échantillons a été calculée au cours de la stabilisation aux paliers d'humidité relative 80%, 95% et 65%, permettant de tracer une nouvelle isotherme pour chaque matériau (**Figure 11**).

Les teneurs en eau d'équilibre à l'échelle macroscopiques sont systématiquement plus faibles que celles relevées en DVS. La **Figure 12** présente les différences observées entre les deux méthodes pour le palier de saturation à 95%. Avec une surface d'échange plus faible pour les échantillons macroscopiques, la vapeur d'eau met probablement un temps plus long à pénétrer tout le volume des échantillons. En augmentant les temps de stabilisation, on approcherait probablement les valeurs obtenues en DVS. On peut toutefois noter que la méthode macroscopique est adaptée à la laine de roche, permettant l'obtention de résultats plus robustes. On peut d'ailleurs noter que, comme la laine de verre supposée hydrophobe, la laine de roche elle aussi capte une petite quantité d'eau à saturation, certainement au sein de sa porosité.

En comparant les deux méthodes, le résultat le plus important est que l'on observe toutefois une classification équivalente des matériaux selon leur comportement à l'eau, avec les panneaux de fibres de bois étant les plus hygroscopiques, suivis des panneaux à base de fibres végétales agro (BioFib et Emerwall). Une différence notable est toutefois remarquée pour la ouate de cellulose, qui capte une quantité d'eau proche de celle du panneau Emerwall à cette échelle.

Thermogravimétrie: suivi teneur en eau

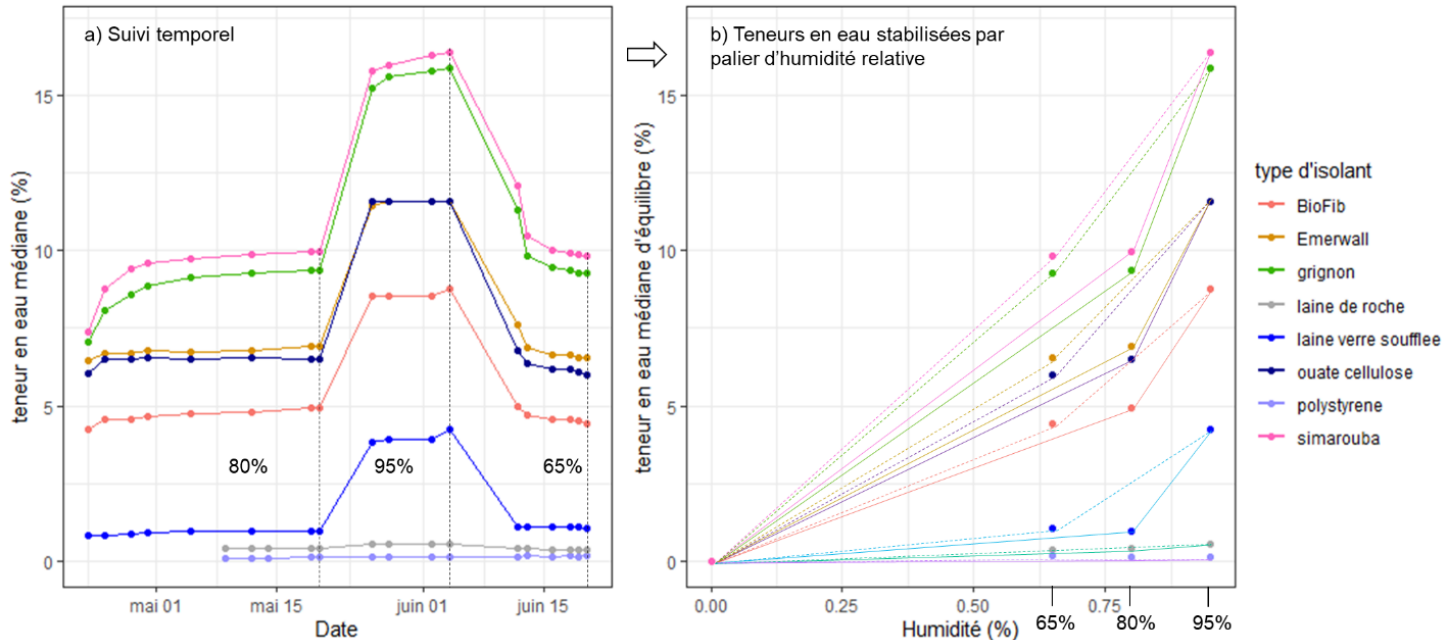


Figure 11 – Résultats obtenus à partir des essais de thermogravimétrie sur les échantillons macroscopiques : a) évolution des teneurs en eau des matériaux au cours des stabilisations dans les trois conditions hygrothermiques, régulées en enceinte climatiques ; b) représentation des isothermes obtenues à partir des trois teneurs en eau d'équilibre.

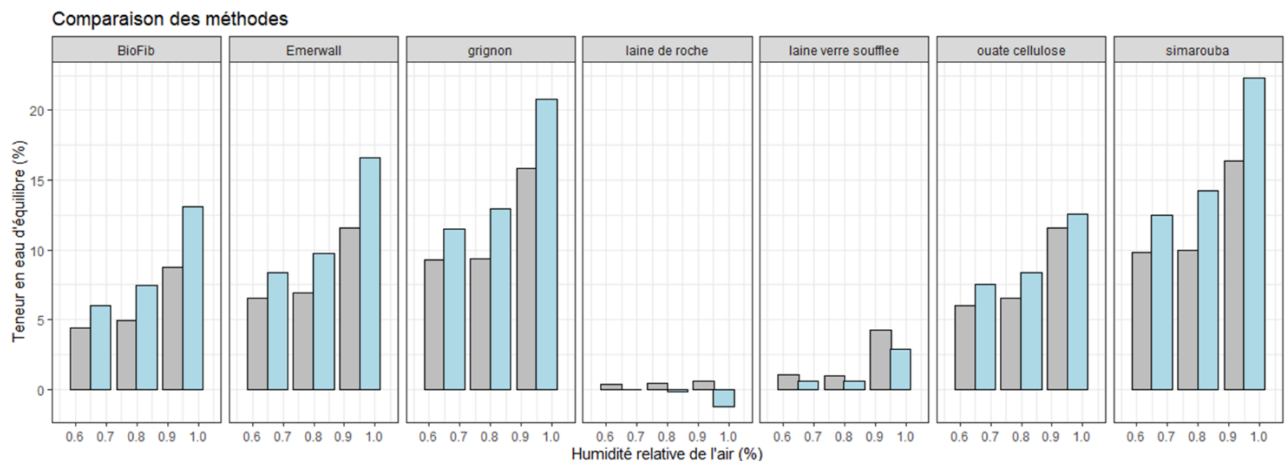


Figure 12 – Comparaison des teneurs en eau à l'équilibre à saturation (95%) pour la méthode microscopique par DVS (gris) et par thermogravimétrie sur échantillon macroscopique avec stabilisation en enceinte climatique (bleu)

III.2 Analyse des variations hygrothermiques au sein des isolants dans les dispositifs de terrain instrumentés

III.2.1 Evaluation du système de mesure et données acquises

Le schéma de branchement du réseau de capteurs ainsi que le code Python du système d'acquisition général du dispositif, développés spécifiquement pour cette étude, ont dû être améliorés pas à pas au cours de nombreux pré-essais, afin d'obtenir un enregistrement satisfaisant de l'ensemble des données capteurs sur toute la durée de l'essai. La **Figure 13** présente le compte des données RH/T acquises par prototype au niveau des isolants et au cours d'un essai de 4 jours, pour les trois montages finaux retenus. On peut observer que le montage final, le montage 3, permet une acquisition homogène du nombre de mesures relevées pour les trois positions de capteurs (sur, dans et sous l'isolant) sur toute la durée de l'essai et de façon équivalente pour chaque prototype. C'est ce système qui est retenu pour le lancement des essais finaux, présentés dans la suite de ce rapport. La seule modalité qui a été testée pour l'heure est celle de la configuration la plus critique : (i) sans pare pluie, (ii) sans climatisation et (iii) combles fermés. Les autres configurations sont en cours d'essai.



Figure 13 – Compte du nombre de mesures RH/T acquises par prototype, relevées pour les trois positions de capteurs (sur, dans et sous l'isolant) sur la durée d'un essai complet (4 jours).

Les relevés de températures sous tôle par thermocouples permettent de vérifier si l'ensemble des prototypes sont soumis à des conditions d'ensoleillement similaires. Les chutes de températures relevées permettent par ailleurs d'identifier les épisodes pluvieux au cours des essais. La comparaison des suivis de températures des thermocouples par prototype (**Figure 14**) indique des conditions comparables, mais il est à noter qu'au plus fort de l'ensoleillement (14h) deux prototypes présentent des températures de toiles plus faibles que les autres. L'allure des variations reste toutefois similaire. Ces deux prototypes n'étaient pourtant pas positionnés côte à côte (écartant l'hypothèse d'une zone d'ensoleillement moindre), et aucune erreur statique n'avait été observée pour ces capteurs (écartant l'hypothèse d'un artefact de mesure). Le positionnement précis du capteur sur la tôle ondulée (sur le haut ou le creux de l'onde) est peut-être à considérer pour éviter d'observer ce genre de différences. Dans la suite des essais, ces deux capteurs ont été repositionnés afin que tous les capteurs soient strictement fixés au même endroit.

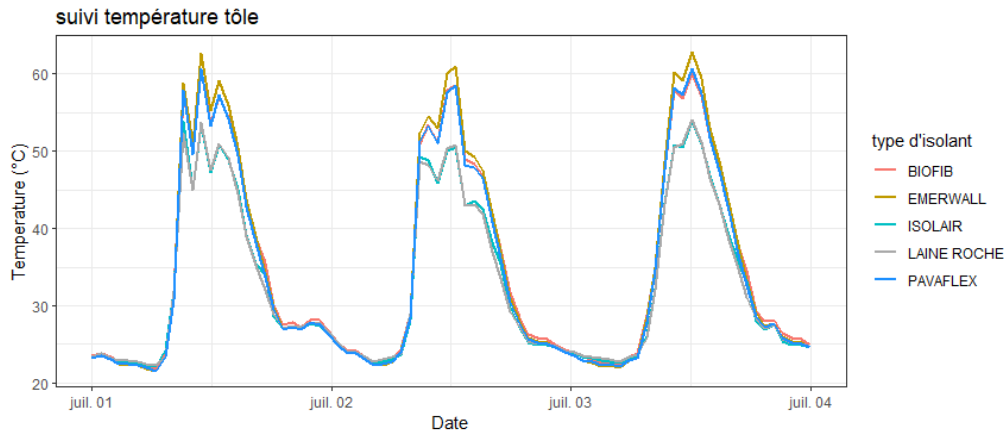


Figure 14 – Comparaison de l'évolution temporelle des températures de surface intérieure des tôles des différents prototypes

III.2.2 Analyses des variations thermiques dans la pièce inférieure et évaluation des performances d'isolation des matériaux testés

Une première analyse vise à comparer les suivis de température dans les boîtes inférieures non climatisées, situées sous les combles isolés, afin de comparer l'évolution des conditions hygrothermiques obtenues au cours de la journée selon l'ensoleillement et le type d'isolant testé (**Figure 15**). Pour rappel, les résultats présentés sont ceux obtenus pour une configuration combles fermés et sans climatisation. L'analyse des données est ici centrée sur les trois journées centrales de l'essai.

Le pic de température ressenti sous tôle, mesuré par les thermocouples, est d'environ 60°C (température de contact) et est situé entre 11h et 12h en moyenne chaque jour d'essai. On peut observer un décalage de ce pic de température dans le box inférieur, ressenti autour de 16h. On voit ainsi l'effet de l'isolation sur le déphasage des variations thermiques ressenties. Ce déphasage est équivalent pour l'ensemble des isolants testés.

Quant aux valeurs de température relevées dans le box inférieur, les amplitudes de températures relevées sont en moyenne de 14°C, comprises entre 23 et 37°C. De façon intéressante, si on observe peu de différences entre isolants testés aux heures les plus froides (**Figure 16b**), on peut noter une variation importante du pic de température selon l'isolant testé (**Figure 16a**). Ces différences indiquent que le panneau Pavaflex à base de fibres de bois est celui qui permet de maintenir la température la plus basse au pic de température (35.2°C) et semble donc constituer l'isolant dont les performances thermiques sont les meilleures. On retrouve ensuite les autres isolants biosourcés et la laine de roche au sein du même groupe, avec une température moyenne entre 36°C (BioFiB) et 36.5°C (Emerwall) au pic de température. Finalement le box isolé avec du polystyrène est le plus chaud avec 36.9°C de moyenne au pic de température.

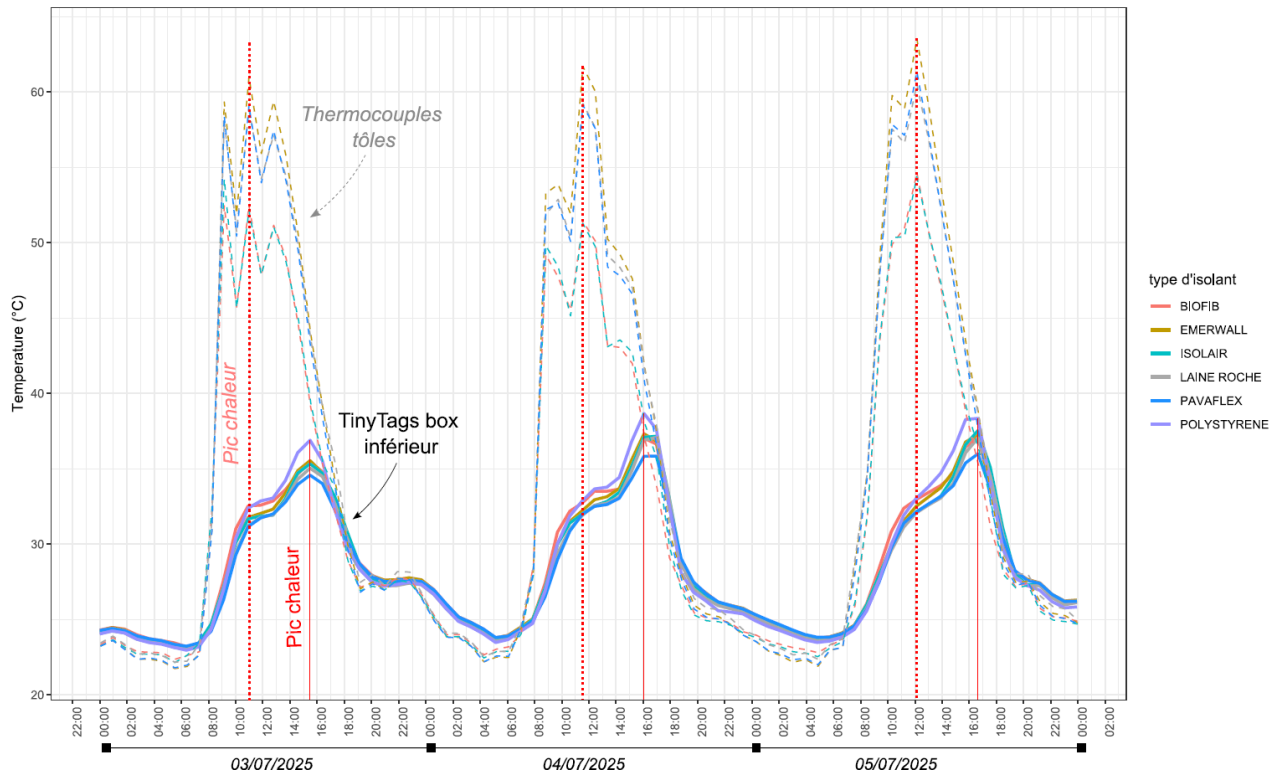


Figure 15 : Evolution des températures de contact relevées sur la face intérieure des tôles (traits pointillés) et des températures relevées dans les boxs inférieurs (traits pleins), en fonction du type d'isolant testé, sur les trois journées centrales de l'essai. Les heures des pics de température sont identifiées par les trait verticaux rouges pointillés (sous tôle) et pleins (box inférieur).

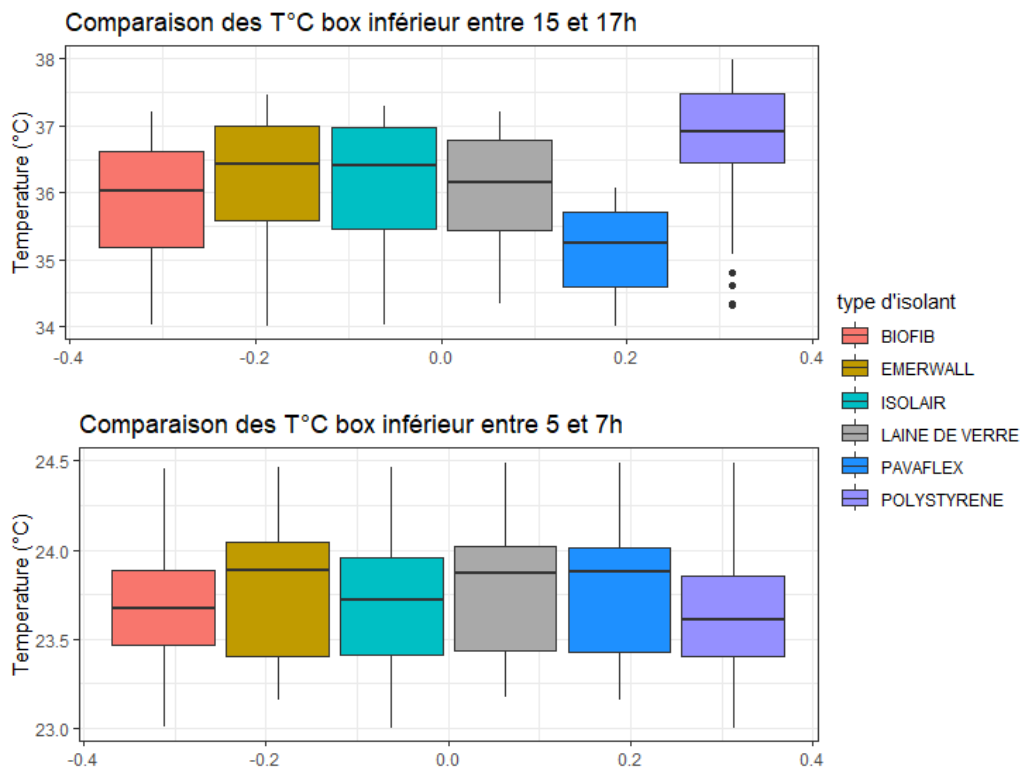


Figure 16 : a) Comparaison des températures moyennes (sur l'ensemble des jours d'essai) relevées dans les boxs inférieurs au moment du pic de température entre 15h et 17h, selon le type d'isolant testé ; b) Même analyse, aux heures les plus froides entre 5h et 7h.

III.2.3 Analyse des variations hygrothermiques dans les combles et les isolants et discussions quant à la régulation de l'humidité par les isolants

Cette analyse s'intéresse aux relevées des capteurs hygrothermiques situés dans les combles au niveau des isolants. Pour chaque dispositif, on considère dans un premier temps les suivis de température, selon la position des capteurs (sur dans et sous l'isolant). Pour rappel, dans la configuration testée, les isolants ne sont ici pas protégés par un pare pluie et les combles sont fermés.

S'il on observe les variations complètes relevées dans les combles au cours des 4 jours d'essai (**Figure 17**), on peut remarquer des amplitudes de températures de 20°C, comprises entre 23°C et 43°C (on obtient donc une diminution globale de la gamme de température de 6°C dans les boîtes inférieures par rapport aux combles). Les variations sur les 4 jours de mesures sont similaires, avec de faibles variations qui suivent les évolutions environnementales extérieures et suivent la même tendance d'un prototype à l'autre.

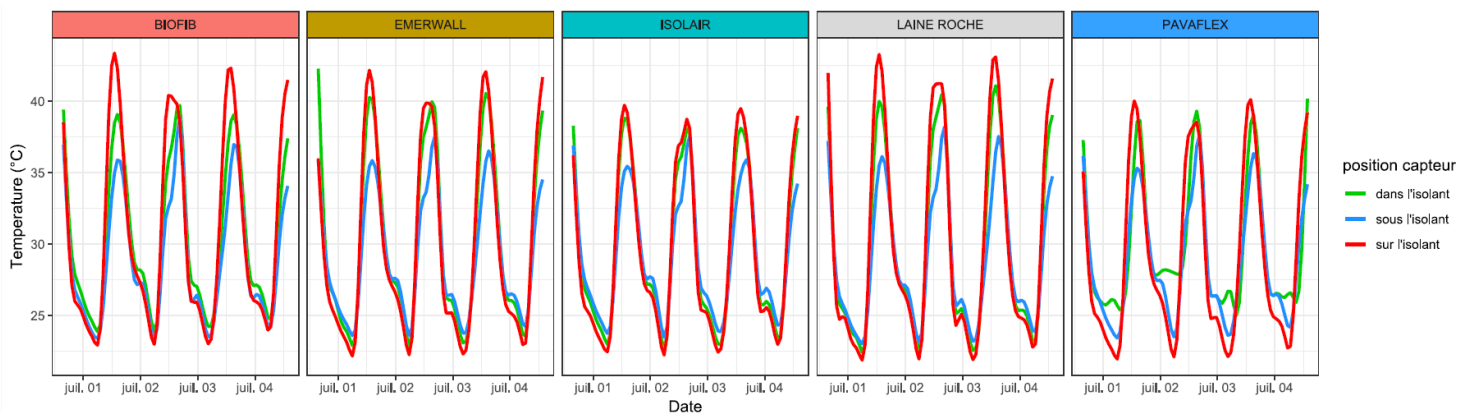


Figure 17 : Variations thermiques enregistrées dans les combles au cours des quatre jours d'essai, selon la position du capteur.

On peut alors se concentrer sur la seconde journée de mesure, afin d'observer les variations thermiques avec plus de précision, en les comparant aux relevés des températures sous toiles des thermocouples (**Figure 18**). On observe logiquement que la température la plus élevée est celle relevée sur l'isolant (en rouge), associée à la température ambiante sous toile. Les pics de température de contact sous la face intérieure de la toile (pointillés) correspondent bien aux pics de température sur l'isolant. La température dans l'isolant (vert) est en moyenne proche de celle relevée sur l'isolant, légèrement plus faible avec une légère atténuation des pics de température et une progression un peu plus lente que celle observée sur l'isolant. La température sous l'isolant (bleu) est, elle, notablement plus faible, avec élévation de la température très progressive entre 11 et 16h. Cette inflexion de la courbe de température autour de 14h pourrait être liée au séchage des panneaux et donc à l'évaporation de l'eau, processus endothermique.

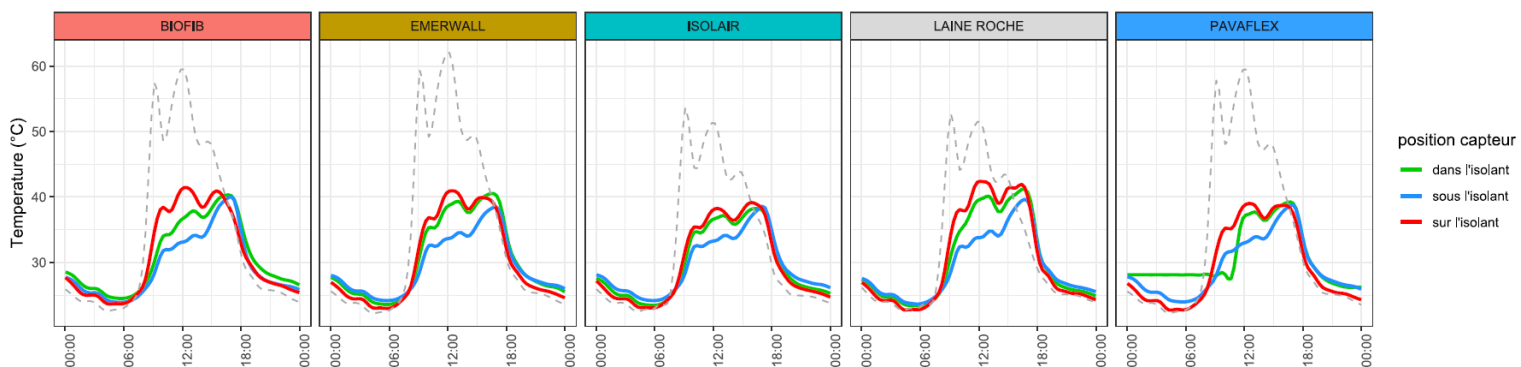


Figure 18 : Variations thermiques (centrées sur le second jour de suivi) dans les combles selon la position des capteurs (traits pleins) et comparaison aux températures de contact sur la face intérieure des toiles par les thermocouples (traits pointillés).

La **Figure 19** permet finalement de comparer les températures observées au niveau des capteurs de même position. Elle permet une visualisation plus fine des différences observées entre isolants. On peut alors observer que les isolants Isolair, Pavaflex et Emerwall sont ceux qui permettent d'obtenir les températures les plus faibles sous isolant, avec une température maximale de 37.3°C contre 38.5°C pour les panneaux Laine de verre et BioFib.

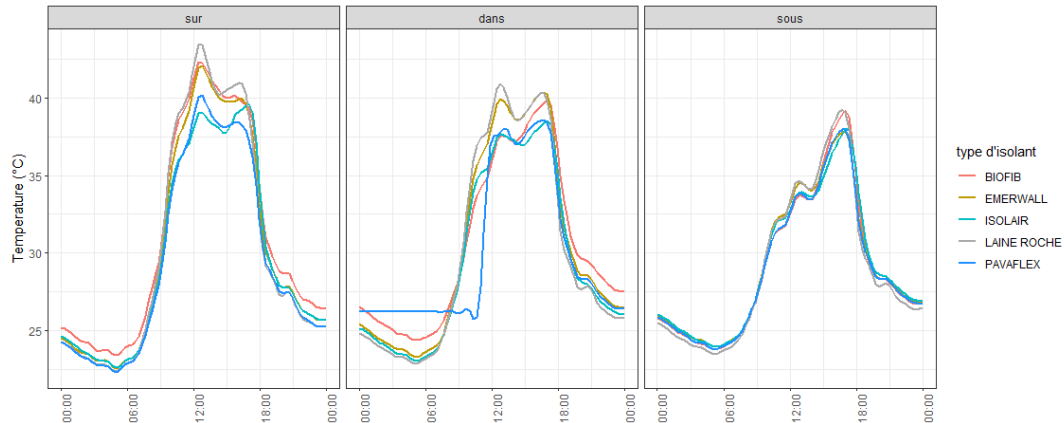


Figure 19 : Suivi de température par position de capteur (centrées sur le second jour de suivi), afin de comparer les différents isolants

Quant à l'humidité relative, les différences observées entre dispositifs sont bien plus marquées. S'il on observe l'ensemble des données obtenues sur les 4 jours d'essais, on observe des variations contrastées des suivis d'humidité relative au niveau des différents capteurs (**Figure 20**) :

- L'humidité relative la plus élevée est logiquement celle mesurée sur le panneau, mais avec des différences notables entre prototypes. Les humidités relatives dans et sous les isolants sont plus faibles et proches ;
- Les gammes de variation d'humidité relative sont plus faibles pour les biosourcés et notamment pour le panneau Isolair (entre 45 et 85% d'humidité relative, tous capteurs confondus). A l'inverse les variations observées pour le panneau Laine de roche sont les plus fortes (entre 40 et 100%) ;
- Au fil des jours de suivi, les variations dans et sous les isolants sont plus faibles et sont progressives (en tendant vers des valeurs de plus en plus élevées) pour les isolants Emerwall, Isolair et Pavaflex (et particulièrement pour l'isolant Isolair), qui sont aussi les matériaux les plus hygroscopiques selon l'étude de comportement à l'eau.
- A l'inverse, les fluctuations d'humidité relatives dans et sous les isolants sont plus importantes et cycliques, et suivent les variations observées sur les isolants pour les panneaux BioFib et Laine de roche, qui sont les matériaux les moins hygroscopiques.

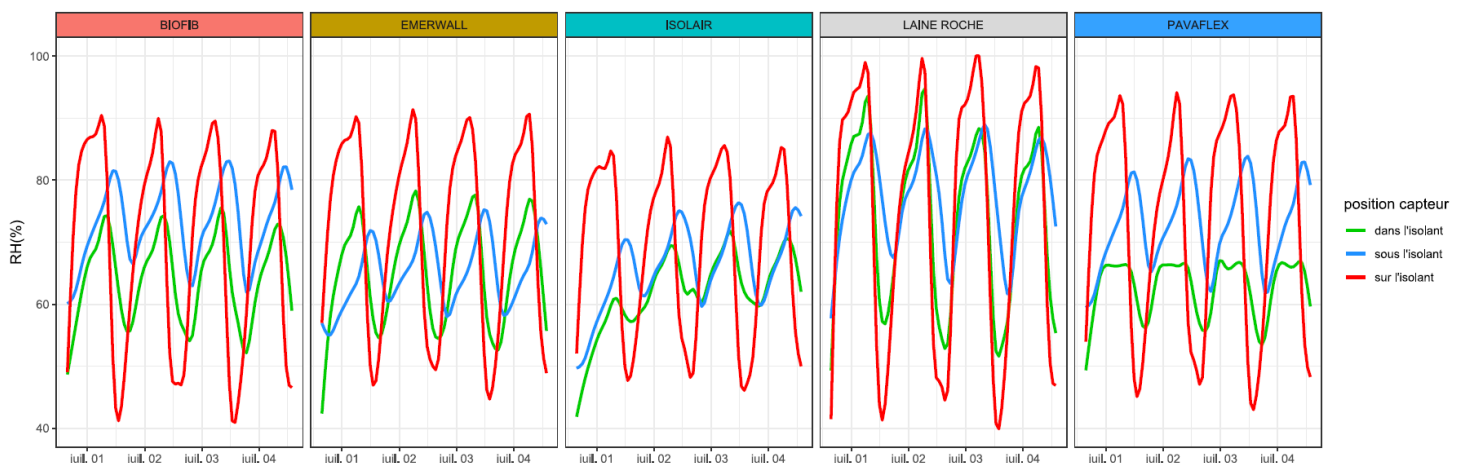


Figure 20 : Variations hygriques enregistrées dans les combles au cours des quatre jours d'essai, selon la position du capteur.
Rmq : capteur RH dans l'isolant du dispositif Pavaflex défectueux avec une saturation au-dessus de 67%.

Si on se concentre sur le jour 2 de suivi, on peut observer les fluctuations d'humidité relative avec plus de précision (**Figure 21**). On peut alors noter un déphasage intéressant de l'humidité relative depuis la surface supérieure du panneau vers le centre puis la surface inférieure du panneau. Cet effet est d'autant plus marqué pour les panneaux les plus hygroscopiques à base de fibres de bois : Isolair et Pavaflex. A l'inverse pour la laine de roche on observe que l'humidité relative n'est que très peu contrôlée par le panneau.

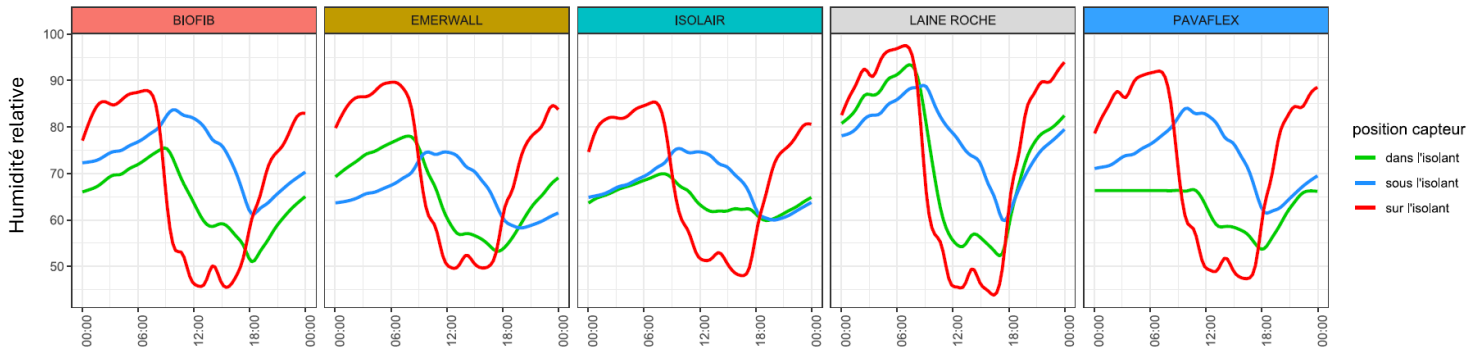


Figure 21 : Variations hygriques (centrées sur le second jour de suivi) dans les combles selon la position des capteurs.
Rmq : capteur RH dans l'isolant du dispositif Pavaflex défectueux avec une saturation au-dessus de 67%.

Si on compare maintenant, pour une même position de capteur, les données obtenues pour les différents matériaux (**Figure 22**) on confirme bien que le panneau Laine de roche est celui pour lequel on observe les plus fortes valeurs d'humidité relative, avec un pic d'humidité relative sous isolant approchant les 90%. A l'inverse, tous les matériaux biosourcés permettent une atténuation de l'humidité relative, avec une humidité relative la plus basse au cœur de l'isolant pour Pavaflex et Isolair et sous l'isolant pour Emerwall et Isolair.

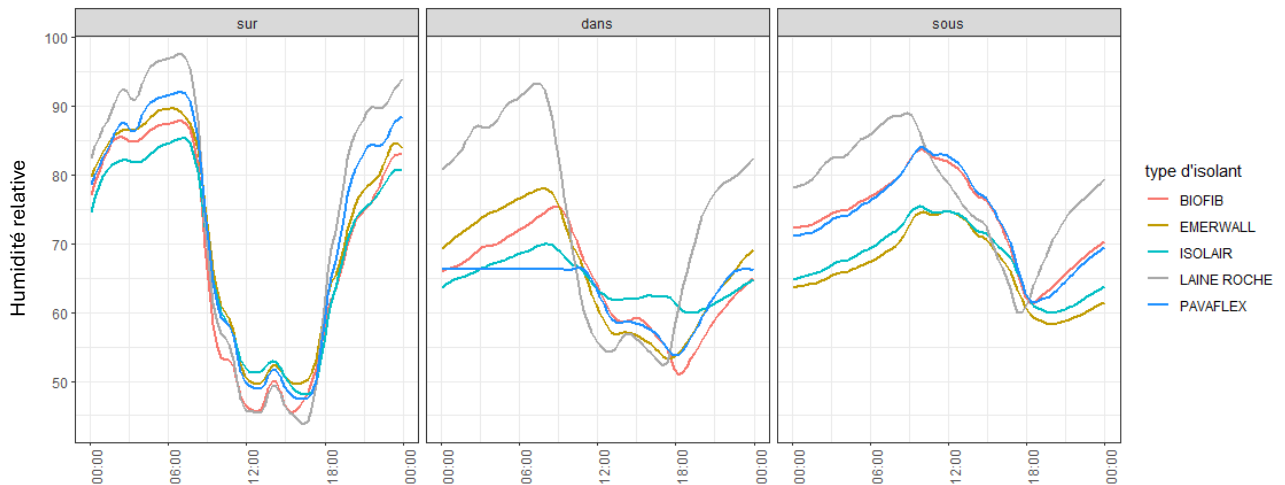


Figure 22 : Suivi d'humidité relative par position de capteur (centrées sur le second jour de suivi), afin de comparer les différents isolants

IV. Conclusion

Cette étude a permis une caractérisation fine du comportement à l'eau des différents isolants, mettant en valeur différentes classes de comportements. Les matériaux biosourcés sont bien hygroscopiques mais caractérisés par des teneurs en eau d'équilibre variables selon leur composition. Les panneaux à base de fibres de bois présentent les plus fortes hygroscopicités. Les matériaux conventionnels théoriquement non hygroscopiques captent malgré tout de petites quantités d'eau dans les paliers d'humidité relative élevés.

La technique de mesure par thermogravimétrie sur échantillons macroscopiques, plus représentative de la réalité mais plus difficile à mettre en œuvre, donne des teneurs en eau légèrement plus faible que celles obtenues par la méthode standard DVS sur échantillons microscopiques, mais les tendances observées sont les mêmes. Ces résultats confirment l'intérêt de la DVS pour ce type d'analyse, malgré les petits volumes testés.

Les prototypes de terrain et systèmes d'instrumentation finaux développés pour cette étude ont démontré leur capacité à proposer des modèles d'étude répliquables et une bonne robustesse pour l'acquisition, le transfert et l'enregistrement des données. Néanmoins, le système de caméras n'a pas permis l'acquisition de photographies exploitables pour permettre l'analyse d'image qui était visée afin d'identifier les plages de condensation. Une amélioration du système est en cours pour palier à ce problème.

Les données obtenues ont permis de mettre en avant les propriétés intéressantes des panneaux d'isolation biosourcés en comparaison au panneau à base de laine minérale. En permettant une atténuation et un déphasage des pics de températures, ces matériaux apparaissent comme efficaces du point de vue de leurs performances thermiques. Par ailleurs les matériaux les plus hygroscopiques permettent aussi une meilleure régulation de l'humidité relative, en limitant largement la présence de vapeur d'eau sous le panneau et donc potentiellement le risque de condensation au niveau du faux plafond. Les quantités d'eau absorbées sont tout de même pas critiques du point de vue de la durabilité des matériaux. Les gammes d'humidité relative mesurées à cœur des isolants biosourcés varient entre 50 et 75%, ce qui correspond selon les résultats de caractérisation de leur comportement à l'eau à des teneurs en eau entre 5 et 15%, soit bien en dessous du seuil critique de 20% présenté comme à risque pour les attaques fongiques. A l'inverse le panneau de laine de roche ne régule pas l'humidité relative, directement transmise au niveau de la paroi, ce qui pourrait expliquer les défauts de moisissures des parois observées par les constructeurs avec ce type d'isolant.

En perspective, de nouveaux essais sont programmés au cours des prochains mois afin de tester de nouvelles conditions d'essai, en testant notamment les configurations suivantes :

- Combles ouverts protégés uniquement par des grilles perforées
- Protection des isolants avec un pare pluie, situé sur ou sous l'isolant
- Variations du niveau de climatisation du box inférieur
- Nouveaux sites d'étude : proche littoral et en lisière de forêt