



Projet ISO RHUM

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

Tache 3 - Qualification du comportement à l'eau des parois complexes sur banc d'essai



Rédaction : Laetitia ADELARD – Enseignante Chercheuse Laboratoire PIMENT
Jean CASTAING-LASVIGNOTTES – Enseignant Chercheur Laboratoire PIMENT
Siméon AHOHE – Stagiaire Master, Laboratoire PIMENT
Pierre LOIR – Stagiaire Master, Laboratoire PIMENT
Néjia FERJANI – Responsable de projet

Octobre 2025

Table des matières

I.	Contexte de l'étude.....	3
I.1.	Contraintes liées à l'utilisation des isolants en milieu tropical.....	3
I.2.	Comportement à l'eau et régulation de l'humidité	3
I.3.	Problématique et objectif général de l'étude	3
II.	Méthodes développées	4
II.1.	Matériaux isolants utilisés pour l'étude	4
III.	Développement d'un dispositif de laboratoire pour les essais de suivi de conditions hygrothermiques dans les parois complexes en conditions climatiques reproduites	5
III.1.	Principes généraux	5
III.2.	Démarche expérimentale	7
III.2.1.	Instrumentation.....	7
III.2.2.	Réalisation des parois expérimentales	8
III.2.3.	Mise en œuvre des expérimentations	10
III.2.4.	Analyse visuelle en fin d'expérimentation	11
III.2.5.	Application de la méthode statique	12
III.2.6.	Gestion des données expérimentales	12
IV.	Modélisation avec le logiciel Wufi	12
IV.1.	Objectifs de l'étude	13
IV.1.1.	Description de la paroi	13
IV.1.2.	Définition des conditions aux limites	16
IV.1.3.	Définition des conditions initiales pour la simulation	16
V.	Résultats & Discussion	17
V.1.	Analyse des données expérimentales	17
V.2.	Analyse des résultats de simulation	18
VI.	Conclusion	32

I. Contexte de l'étude

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. A La Réunion, comme en Guyane, l'humidité relative de l'air peut varier de 40 à 100%, avec des températures variant potentiellement de -5°C à 38°C, ce qui engendre une quantité d'eau conséquent dans l'air. De telles conditions imposent un risque de condensation dans les parois et les isolants mis en œuvre peuvent alors se dégrader.

Elles soumettent également les isolants à de constantes variations de teneur en eau selon leur hygroscopicité. La quantité d'eau contenue dans le matériau peut avoir un impact plus ou moins fort sur les propriétés thermiques, mécaniques et de durabilité des isolants. 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 [Cf Rapport Phase3 : étude du comportement à l'eau des matériaux isolants et de leur régulation des conditions hygrothermiques dans les combles en milieu tropical humide], toutefois, leurs conditions de désorption sont à vérifier. Mais dans un milieu tropical voir équatorial comme la Guyane, où le taux d'humidité ne baisse pas en fonction des saisons, ce rôle tampon est-il réel ? L'isolant arrive-t-il à relarguer l'humidité stockée ou reste-t-il en saturation ?

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

Comportement à l'eau et régulation de l'humidité

Le comportement à l'eau des produits isolants et des parois multicouches 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 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 de sa mise en œuvre dans les parois.

Pour ce faire, nous avons structuré l'étude des parois des bâtiments en quatre parties :

- Des analyses en laboratoire (objet de ce rapport), et
- Des campagnes de mesures organisées in-situ, dans des parois horizontales et des complexes de toiture
- Une étude par modélisation numérique des parois étudiées en laboratoire pour valider les hypothèses de la modélisation.
- Une étude par simulation numérique des configurations climatiques et des typologies de parois qui n'ont pas pu être testées en laboratoire.

Problématique et objectif général de cette tâche

Cette partie vise, dans un premier temps à comparer le comportement à l'eau de différentes parois mises en œuvre intégrant des 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.

Pour ce faire, nous avons structuré l'étude des parois des bâtiments en quatre parties :

- Des analyses en laboratoire (objet de ce rapport) et

- Des campagnes de mesures organisées in-situ, dans des parois horizontales et des complexes de toiture
- Une étude par modélisation numérique des parois étudiées en laboratoire pour valider les hypothèses de la modélisation.
- Une étude par simulation numérique des configurations climatiques et des typologies de parois qui n'ont pas pu être testées en laboratoire.

II. Méthodes développées

II.1 Matériaux isolants utilisés pour l'étude

La diffusion de vapeur dans une paroi d'épaisseur d sera d'autant plus importante que le matériau constituant la paroi sera perméable à la vapeur.

Ainsi le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur μ d'un matériau indique la facilité qu'aura la vapeur d'eau à traverser ce matériau comparé à celle d'une lame d'air.

La quantité de vapeur d'eau diffusant à travers l'épaisseur d d'un matériau dépend de son coefficient de résistance μ via l'épaisseur équivalente de diffusion μ (ou S) qui indique la résistance qu'offre une couche de matériau à la diffusion de vapeur d'eau,

$$\mu d = \mu \times d \text{ [m]}$$

μd d'une couche de matériau correspond à l'épaisseur en m de la couche d'air stationnaire qui exercerait la même résistance à la diffusion de vapeur que la couche de matériau.

La connaissance des capacités hygroscopiques des matériaux nécessite également la connaissance des isothermes de sorption et de désorption des matériaux, données plus complexes à obtenir d'un point de vue expérimental [Julie].

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

Nom du matériau	Conventionnel/Bio	Type	Origine	Fabricant	Composition	Code rapport
Laine de roche	Conventionnel	rouleau	Métropole	Roulrock	Fibres minérales	
Polystyrène	Conventionnel	panneau	Métropole	Sagip	Pétro-sourcé	
Ouate de cellulose	Intermédiaire	vrac	Réunion		Cellulose recyclée	
GRI	Biosourcé	panneau	Guyane	R&D Labo	Fibres grignon (bois local)	
SIM	Biosourcé	panneau	Guyane	R&D Labo	Fibres simarouba (bois local)	

Tableau 1 – Comparaison des matériaux isolants testés

Ces matériaux vont nous permettre d'élaborer les parois représentatives de celles utilisées en pratique sur les bâtiments à La Réunion, Mayotte et en Guyane. La paroi expérimentale composée de divers parements et de divers isolants tels que présentés à la figure 1 sera exposée à des sollicitations climatiques (température et humidité relative diverses, constantes ou variables).



Figure 1 : Paroi expérimentale avec parement bois, isolant à base de fibre de bois ou polystyrène, laine minérale

Les parements choisis sont définis dans le tableau 2, ainsi que les données physiques nécessaires à leur caractérisation hygrothermique.

Matériaux	BA13	Polystyrène (extrudé)	Fibre-ciment	Bois bardage	Fibre de bois	Laine de verre	Lame d'air
Conductivité thermique λ [W/m.K]	0,2	0,03	0,23	0,14	0,04	0,04	/
Epaisseur e [m]	0,0125	0,06	0,007	0,02	0,025	0,06	Variable
Masse volumique ρ [kg/m ³]	1000	40	1200	500	270	100	/
Résistance thermique R_t [m ² .K/W]	0,063	2	0,030	0,143	0,625	1,5	0,17
Coefficient de diffusion de vapeur μ	10	140	10	35	5	1	1
Résistance à la diffusion de vapeur S_d [m]	0,0875	8,4	0,07	0,7	0,125	0,06	0,02
Capacité thermique massique c [J/kg.K]	830	1450	1470	1880	2050	1030	1
Capacité thermique volumique [J/m ³ .K]	1050000	58000	1764000	940000	553500	103000	/
Porosité [%]	30-60	<5	<25	40	75	97	/

Tableau 2 : Données physiques de chaque matériau testé pour les parois.

III. Développement d'un dispositif de laboratoire pour les essais de suivi de conditions hygrothermiques dans les parois complexes en conditions climatiques reproduites

III.1 Principes généraux

L'objectif de cette manipulation est d'étudier le comportement de parois complexes verticales ou inclinées (toiture) à une échelle réduite. Pour réaliser les essais, une enceinte climatique à climat constant (mais qui peut être utilisée en climat variable) Memert HPPeco a été utilisée. L'enceinte a été paramétrée pour des conditions climatiques correspondant à l'extérieur du bâtiment, car elle permet de descendre à des températures inférieures à 10°C.

Des échantillons de parois composées de divers isolants et parements ont été mis en œuvre.

Elles sont représentatives des parois utilisées de façon générale à La Réunion, Mayotte ou la Guyane. Pour une paroi verticale « légère », le parement intérieur est généralement du placoplâtre. Les

parements extérieurs sont soit constitués de bardage en bois (pin sylvestre), soit en clins de fibrociment.

Les parois horizontales, sont composées d'une couverture en tôle acier (ou aluminium), d'un isolant et d'un parement intérieur en placoplâtre, contreplaqué bois ou lambris PVC.

Plusieurs configurations d'isolants internes existent

- Laine minérale, d'épaisseur 4 à 8 cm,
- Ouate de cellulose projetée,
- Polystyrène d'épaisseur 4 cm
- Présence potentielle de lame d'air entre parement extérieur et isolant, La lame d'air peut ou pas être ventilée.

L'utilisation d'isolants biosourcés mis à part la ouate de cellulose projetée sont peu répandus à La Réunion.

L'enceinte climatique a dans un premier temps été utilisée en contact avec l'air de la halle d'essai (via la paroi expérimentale testée). Pour déterminer les conditions climatiques initiales intérieures et extérieures, à l'aide du diagramme psychrométrique, on a cherché la droite reliant les points qui passaient au plus proche de la courbe de saturation. Ainsi, on a fixé 15°C et 95% de taux d'humidité relative pour les conditions initiales extérieures et 28°C et 73% d'humidité relative pour l'intérieur. L'hypothèse était de tester une variation importante de quantité d'eau dans l'air, et une grande variation de température. Pour ce faire, l'enceinte climatique équipée des parois expérimentales a été placée dans la halle d'essai. Ces conditions ne sont pas représentatives des conditions réelles occurrentes à La Réunion ou bien en Guyane et n'ont pas donné de point de condensation concret, bien que la méthode statique montre par ses calculs des points de condensation possibles. Cette phase nous a permis toutefois de faire des premiers tests, et de valider l'instrumentation définie.

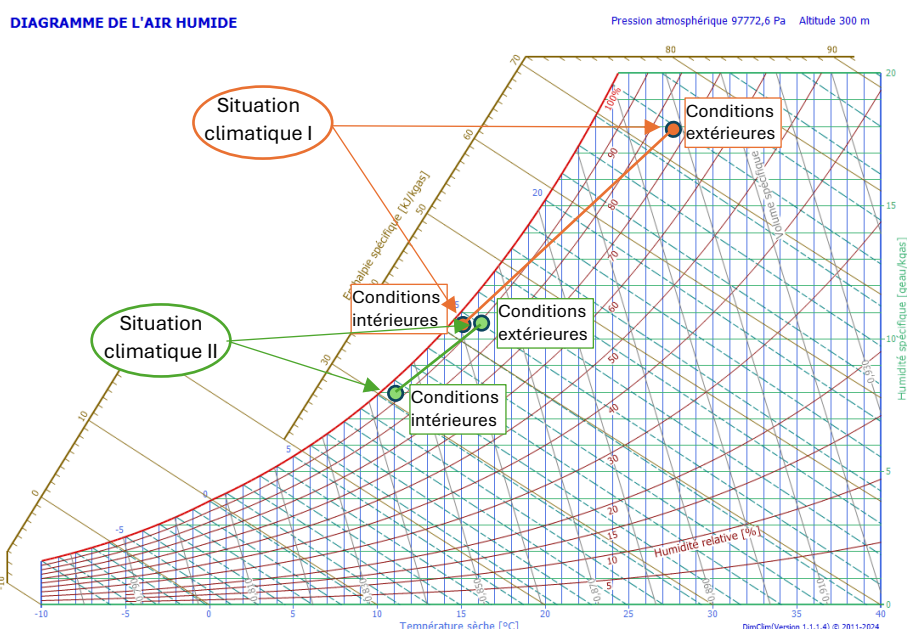


Figure 2 : Diagramme psychrométrique

Dans un second temps, l'enceinte climatique a été placée dans une seconde enceinte climatique le STATron (figure 3), ce qui nous a permis de fixer des conditions plus hivernales pour nos essais.

nous avons reparamétré l'enceinte climatique vers des conditions extérieures proches de 11°C, 70% d'humidité relative, et des conditions intérieures proches de 17° et 70% d'humidité relative au plus froid.

Ce protocole a permis d'atteindre des points de condensation et de débiter une comparaison des divers isolants.



Figure 3 : Enceinte climatique à effet Peltier (à gauche) et enceinte climatique à échelle réelle (STATron)

III.2 Démarche expérimentale

III.2.1 Instrumentation

Lors des essais sur les divers échantillons de parois, deux types de capteurs ont été utilisés :

- les capteurs hygro-boutons, permettant la mesure de l'humidité relative et de la température d'air dans les matériaux isolants et en surface. Les hygro-boutons intègrent des puces qui enregistrent les données de température, humidité relative et température de rosée. Le logiciel Thermo Track et son support de communication permet le paramétrage des capteurs hygro-boutons. Il permet de renseigner de paramétrer la durée ainsi que le pas de temps de l'enregistrement.
- les thermocouples de type T, utilisés pour mesurer les températures de surface, connectés à une centrale d'acquisition (précision de 0.5°C, et fréquence d'acquisition de 1s.).

- Dimensions	Diamètre 16 mm, épaisseur 6 mm
Fréquences de mesure	1 seconde à 273 heures
Précision	± 0,5°C / ± 5 % HR
Résolution	0,5°C ou 0,1°C / 0,1 % HR

Tableau 3 : Performances des capteurs boutons thermo-hygromètres

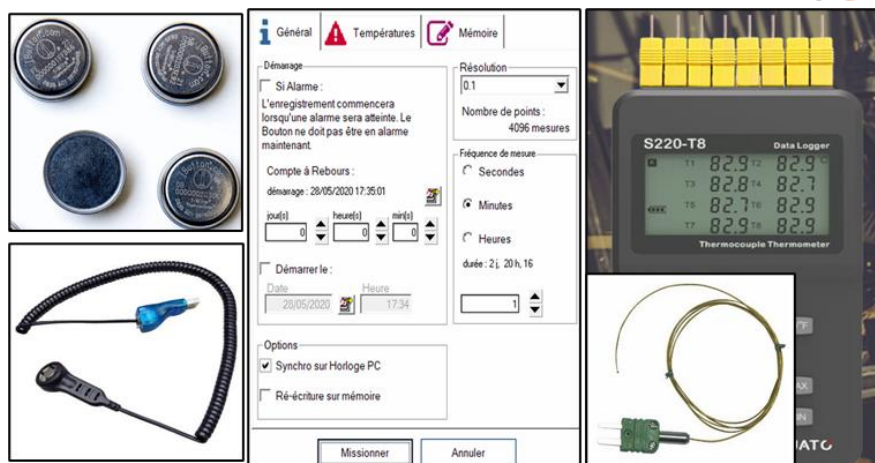


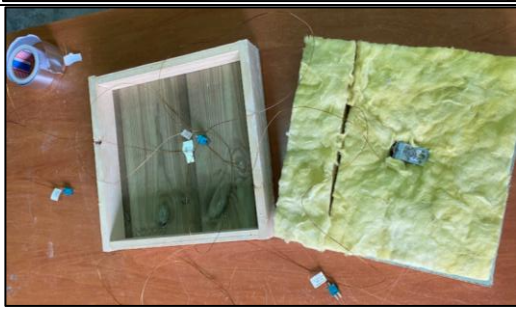
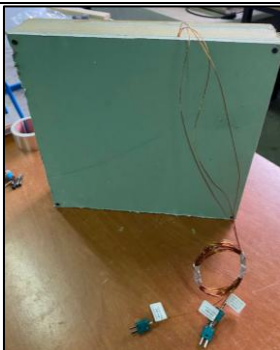
Figure 4 : Capteurs hygro-boutons, logiciel thermo track, centrale d'acquisition et thermocouple

III.2.2 Réalisation des parois expérimentales

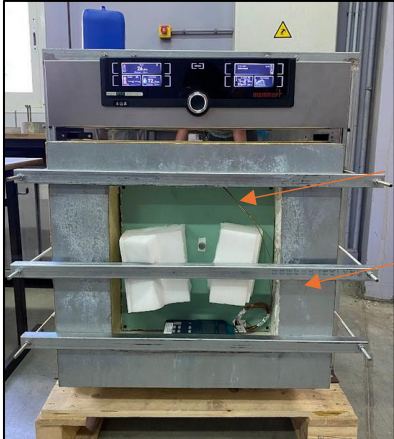
La réalisation des divers échantillons de parois étant la même, seul l'échantillon équipé de laine minérale est présenté ci-dessous.

Etapes de réalisation de l'échantillon de paroi	Photographies des étapes
Une plaque de plâtre est découpée aux dimensions du bâti¹ (40×40 cm). Le bâti sera ensuite positionné à l'entrée de l'enceinte climatique, positionnant ainsi la paroi à l'interface des deux conditions climatiques (intérieures et extérieures).	
L'isolant laine de verre est découpée aux mêmes dimensions que la plaque de plâtre. Le complexe plaque de plâtre et laine de verre est pesé avant l'expérimentation.	

¹ Le bâti est une paroi isotherme permettant d'intégrer l'échantillon étudié à l'enceinte climatique

Etapes de réalisation de l'échantillon de paroi	Photographies des étapes
Le parement extérieur constitué d'un bardage de bois (pin sylvestre) est fixé sur cadre constitué de tasseaux de 5 cm d'épaisseur. L'ensemble présente les mêmes dimensions que la plaque de plâtre (40 X40 cm). Le complexe bardage et tasseaux est pesé avant l'expérimentation.	
Pour l'instrumentation, un support permettant de recevoir les 3 hygro-boutons² paramétrés selon la durée d'expérimentation choisie. Un thermocouple est placé au milieu du support des hygro-boutons. L'ensemble des capteurs est placé dans l'isolant laine de verre.	 
Un thermocouple est collé sur la plaque de plâtre avant le positionnement la laine de verre. Un autre thermocouple est placé sur la face intérieure du parement extérieur de la paroi (ici un bardage constitué de clins en bois de type pin sylvestre).	
Le parement extérieur est assemblé à la plaque de plâtre en faisant attention aux thermocouples. Afin d'éviter les ponts thermiques, les assemblages des différents volumes ont été jointés (colle PVC/silicone).	 

² Les 3 hygro-boutons sont placés sur chaque surface ainsi qu'au milieu de l'isolant comme pour l'expérimentation in situ

Etapes de réalisation de l'échantillon de paroi	Photographies des étapes
L'échantillon dans le bâti. Placer le bâti sur l'enceinte climatique qui a été paramétrée en amont. Placer un hygro-bouton sur la face visible de la plaque de plâtre permettant d'enregistrer les conditions climatiques dans la halle ou le STATron.	 Paroi échantillon Le bâti support de l'échantillon

Le schéma proposé à la figure 5 permet de mieux visualiser le positionnement des capteurs sur un échantillon de paroi testé :

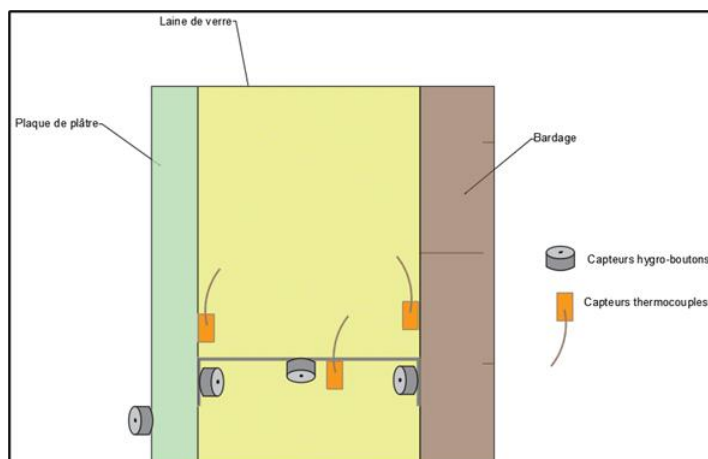


Figure 5 : Schéma de l'échantillon de paroi étudié avec la position des capteurs

III.2.3 Mise en œuvre des expérimentations

Diverses expérimentations ont été mise en œuvre pour mettre en conditions des échantillons de parois avec des conditions climatiques pouvant donner des risques de condensation.

Deux expérimentations ont été faites avec de la laine de verre dont l'état initial n'était pas le même (laine de verre usagée et laine de verre neuve).

Les durées d'expérimentation présentées dans le tableau 4, correspondent au temps de prise de mesures des capteurs hygro-boutons. Pour ces expérimentations, les conditions intérieures étaient fixées par les conditions à l'intérieur de la halle d'essai, en période estivale.

Le tableau 5 présente les parois qui ont été testées avec l'enceinte climatique positionnée dans le STATron. Les conditions climatiques testées sont ainsi plus proches des conditions hivernales de La Réunion. Généralement une durée courte d'expérimentation (2 jours) est suffisante ; Les durées supérieures ont été utilisées pour étudier l'accumulation d'humidité potentielle au sein des parois.

Nom de l'échantillon/ dénomination	Composition de la paroi (de l'intérieur vers l'extérieur)	Durée d'expérimentation
Paroi 1 : Laine de verre usagée	- Plaque de plâtre BA13 de 12,5 mm - Isolant laine de verre de 60 mm - Parement extérieur : bardage 20 mm	2 jours 20 heures et 16 minutes
Paroi 2 : Laine de verre nouvelle	- Plaque de plâtre BA13 de 12,5 mm - Isolant laine de verre de 60 mm - Parement extérieur : bardage 20 mm	14 jours 5 heures et 20 minutes
Paroi 3 : Fibre de bois avec lame d'air	- Plaque de plâtre BA13 de 12,5 mm - Panneau de fibre de bois de 25 mm - Lame d'air non ventilée de 20 mm - Parement extérieur : fibre-ciment de 7 mm	2 jours 20 heures et 16 minutes
Paroi 4 : Polystyrène avec bardage	- Plaque de plâtre BA13 de 12,5 mm - Isolant polystyrène de 60 mm - Parement extérieur : bardage 20 mm	2 jours 20 heures et 16 minutes
Paroi 5 : Laine de verre seule*	- Plaque de plâtre BA13 de 12,5 mm - Isolant laine de verre 60 mm	8 jours 12 heures et 48 minutes

Tableau 4 : Parois expérimentales construites et conditions expérimentales appliquées (conditions estivales)

*Cette composition de paroi est la seule qui a été testée avec des conditions climatiques différentes : à l'intérieur 25°C et 65% et à l'extérieur 40°C et 80%.

Nom de l'échantillon/ dénomination	Composition de la paroi (de l'intérieur vers l'extérieur)	Durée d'expérimentation
Paroi 2 : Laine de verre nouvelle	- Plaque de plâtre BA13 de 12,5 mm - Isolant laine de verre de 60 mm - Parement extérieur : bardage 20 mm	2 jours
Paroi 6 : Fibre de bois sans lame d'air	- Plaque de plâtre BA13 de 12,5 mm - Panneau de fibre de bois de 25 mm - Parement extérieur : bardage de bois 20 mm	2 jours
Paroi 4 : Polystyrène avec bardage	- Plaque de plâtre BA13 de 12,5 mm - Isolant polystyrène de 60 mm - Parement extérieur : bardage de bois 20 mm	2 jours

Tableau 5 : Parois expérimentales construites et conditions expérimentales appliquées (conditions hivernales)

III.2.4 Analyse visuelle en fin d'expérimentation

En fin d'essai, le bâti intégrant l'échantillon de paroi est retiré pour constater visuellement le comportement hydrique de l'échantillon testé.

Après l'analyse visuelle, le complexe bardage et tasseaux ainsi que le complexe plaque de plâtre et l'isolant sont pesés. La différence de masse avec celle de l'état initial renseigne sur la quantité d'eau emmagasiné par l'échantillon au cours de l'expérimentation.



Figure 6 : Bâti expérimental, bardage et vis à la fin de l'essai

III.2.5 Application de la méthode statique

Les résultats expérimentaux ont été comparés avec des calculs statiques se basant sur la méthode³ de Glaser.

Une fois les pressions de vapeur saturantes P_{sat} et les pressions de vapeur partielles P_v calculées, une simple comparaison permet de définir les risques de condensation (si la pression de vapeur partielle P_v est supérieure à la pression de vapeur saturante P_{sat} alors il y a condensation). Ces calculs ont été réalisés pour les diverses expérimentations sous forme de fichier Excel automatisé. Les résultats statiques sont présentés rapidement sur chaque fiche issue des expérimentations en laboratoire.

III.2.6 Gestion des données expérimentales

Chaque essai pour les conditions hivernales et estivales sont présentées sous forme de fiches techniques présentées dans les pages suivantes. Les données expérimentales sont stockées et mises à disposition de l'équipe du projet.

IV. Modélisation avec le logiciel Wufi

Le logiciel WUFI, qui a été créé par l'institut Fraunhofer en Allemagne, est un des meilleurs outils pour faire des simulations thermo-hydriques dans les parois de bâtiment même si certains paramètres sont délicats à fixer. Selon la version, il permet de simuler tout le bâtiment ou de se concentrer sur une paroi précise, selon la version du logiciel. Il utilise des équations qui prennent en compte tous ces échanges et il possède aussi une grande base de données sur les matériaux, ce qui le rend très précis pour étudier les transferts de chaleur et d'humidité dans les murs (Künzel, 1994).

Même si les logiciels de simulation sont de plus en plus performants, la validation est nécessaire par comparaison avec des mesures obtenues en laboratoire, en particulier au sujet l'humidité relative. En effet, il est très important de comparer les résultats de la simulation avec des mesures réelles, afin de corriger les paramètres, et de rendre les prédictions plus fiables.

³ La méthode statique est détaillée dans la partie bibliographique.

IV.1 Objectifs

Le but principal de notre démarche est de valider l'utilisation du logiciel WUFI 2D pour reproduire numériquement le comportement des parois complexes de type mur ou toiture, afin de tester de façon numérique les conditions que nous n'avons pas eu le temps d'étudier en laboratoire.

Ainsi ce volet sera décomposé selon les trois étapes suivantes :

- Modéliser les parois dans le logiciel (géométrie, matériaux, conditions aux limites, maillage),
- « Caler » les paramètres physiques pour chaque matériau du mur, et pour la paroi complexe afin de disposer d'améliorer la précision des résultats simulés pour prévoir la température et l'humidité dans chaque couche du mur, et dans la paroi complète.
- Simuler le comportement de la paroi pour des données climatiques particulières.

IV.1.1 Description de la paroi

La paroi étudiée est une structure composite classique en construction, constituée de trois éléments juxtaposés, chacun jouant un rôle spécifique dans le comportement thermique et hygrométrique de la paroi.

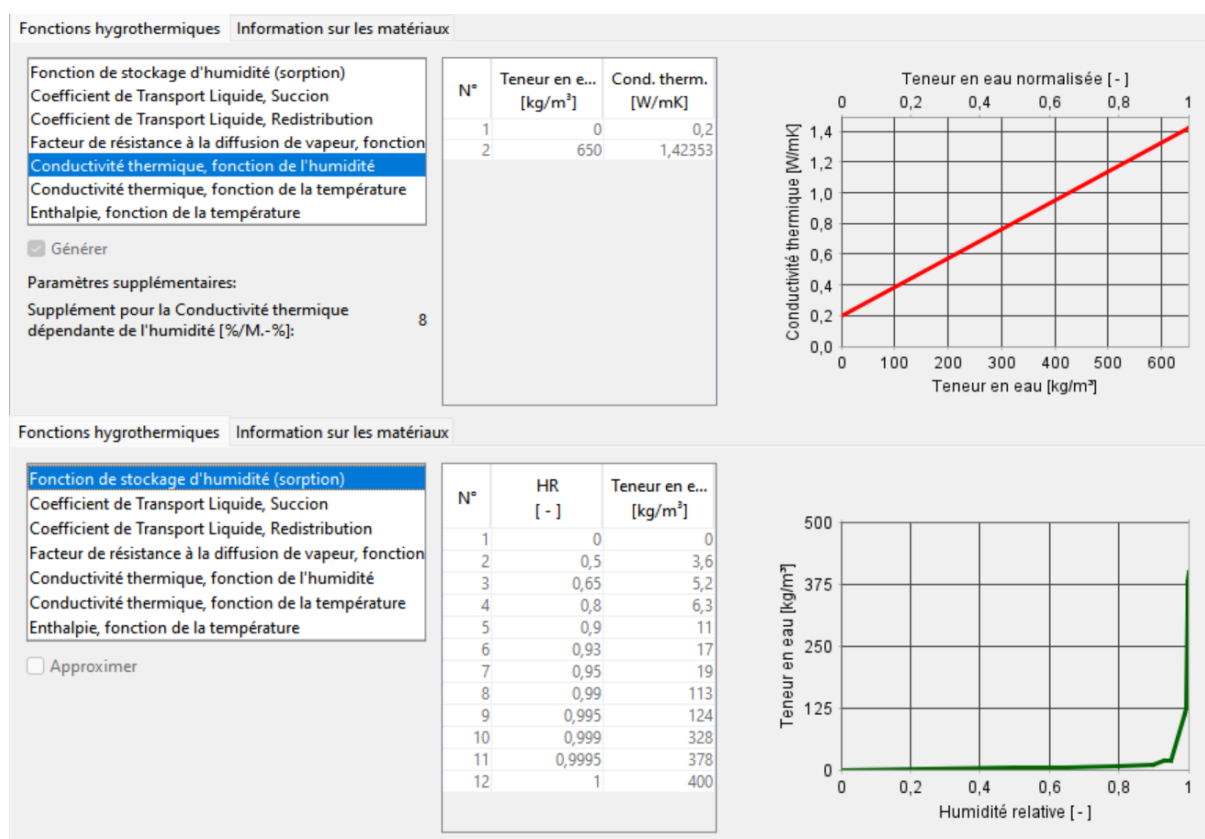


Figure 7 : Données dynamiques disponibles sous le logiciel WUFI pour un parement en placoplâtre

La paroi intérieure est constituée de placoplâtre BA13, un matériau largement utilisé pour les finitions intérieures. Ce matériau est apprécié pour sa capacité à réguler l'humidité intérieure grâce à sa structure poreuse et à sa forte capacité hygroscopique. Le plâtre agit comme un tampon d'humidité, absorbant ou restituant la vapeur d'eau selon les conditions ambiantes.

Au centre de la paroi se trouve une couche isolante en laine minérale verre. Ce matériau est constitué de fibres de verre agglomérées, formant une structure poreuse et légère. La laine de verre est avant tout un isolant thermique, avec une faible conductivité thermique typiquement autour de 0.04 W/m·K, limitant les pertes de chaleur vers l'extérieur. Sur le plan hygrothermique, la laine de verre présente une faible capacité à retenir l'eau mais peut laisser passer la vapeur d'eau par diffusion⁴. Son rôle est donc de limiter les transferts thermiques tout en permettant une certaine perméabilité à la vapeur.

La paroi extérieure est un bardage rigide qui joue le rôle de protection mécanique et climatique, assurant l'étanchéité à l'eau et limitant les apports d'humidité par pluie par exemple. Sa perméabilité à la vapeur est généralement faible, ce qui en fait le matériau le plus perméable à la vapeur par rapport à la laine minérale et au placoplâtre.

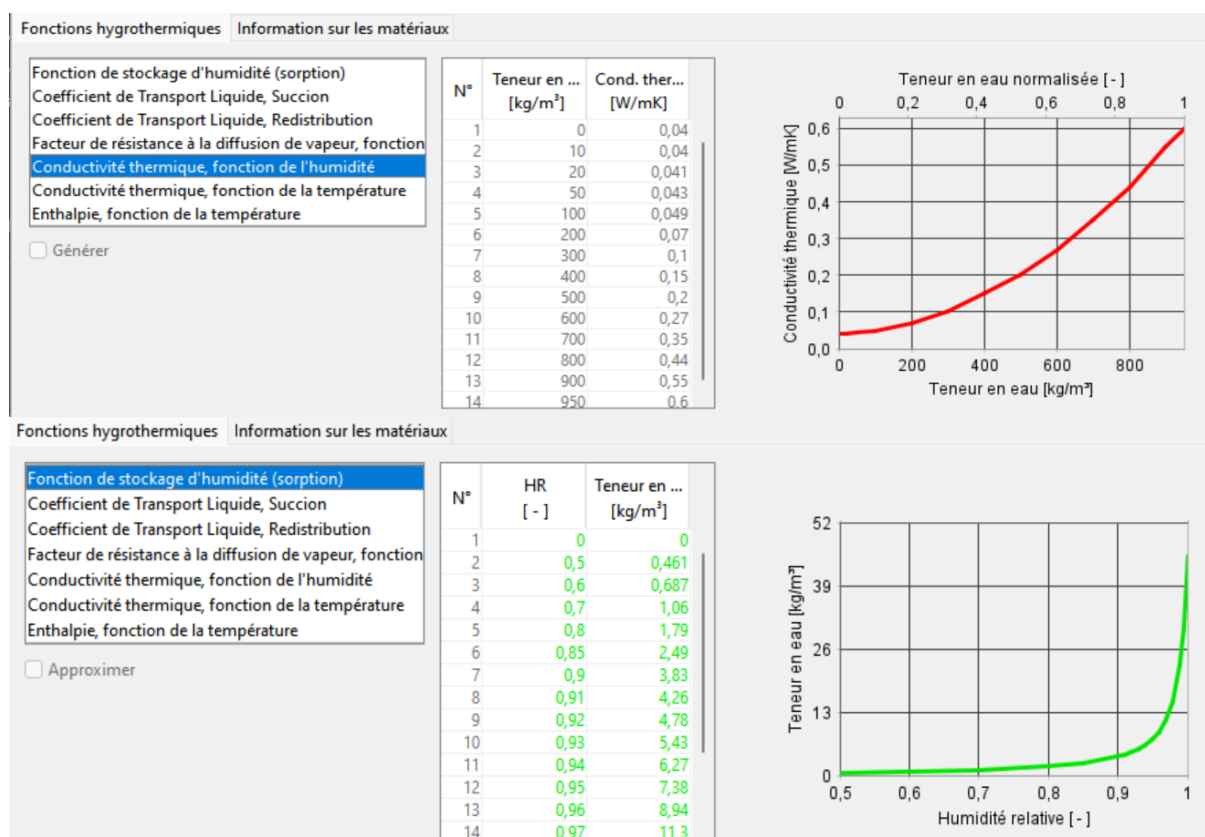


Figure 8: Données dynamiques disponibles sous le logiciel WUFI pour un isolant de type laine minérale

Le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur du placoplâtre, constant en fonction de l'humidité relative est indiqué dans le tableau suivant :

Matériau	Laine minérale (ep. 4 cm)	Placoplâtre	Polystyrène (ep. 2.5 cm)	Bardage bois	Isolant à base de fibre de bois compressées (ep. 4 cm)
----------	---------------------------	-------------	--------------------------	--------------	--

⁴ Cf Tache3_Comportement à l'eau des matériaux isolants

Facteur de résistance à la diffusion	1.3	8.3	30	188	3
Epaisseur équivalente	0.052	0.1	0.75	3.76	0.12

Il est ainsi évident de constater qu'une laine minérale est beaucoup plus perméable que le polystyrène ou le bardage de bois. Du point de vue de l'hygrométrie, le bois absorbe la vapeur d'eau, quelque soit l'humidité relative, de façon importante, la laine minérale absorbe peu, même si elle tend à absorber lorsque l'humidité relative est supérieure à 80%. Le plâtre se comporte comme la laine minérale mais absorbe de façon importante à partir de 90%. Le comportement de la laine de bois est similaire aux résultats expérimentaux obtenus en Guyane.

Pour modéliser le comportement de la paroi dans WUFI 2D, il est important de disposer de données fiables sur les propriétés hygrothermiques des matériaux constitutifs. Ces propriétés déterminent la vitesse et l'intensité des transferts de chaleur et d'humidité, et conditionnent la réponse dynamique de la paroi aux variations climatiques.

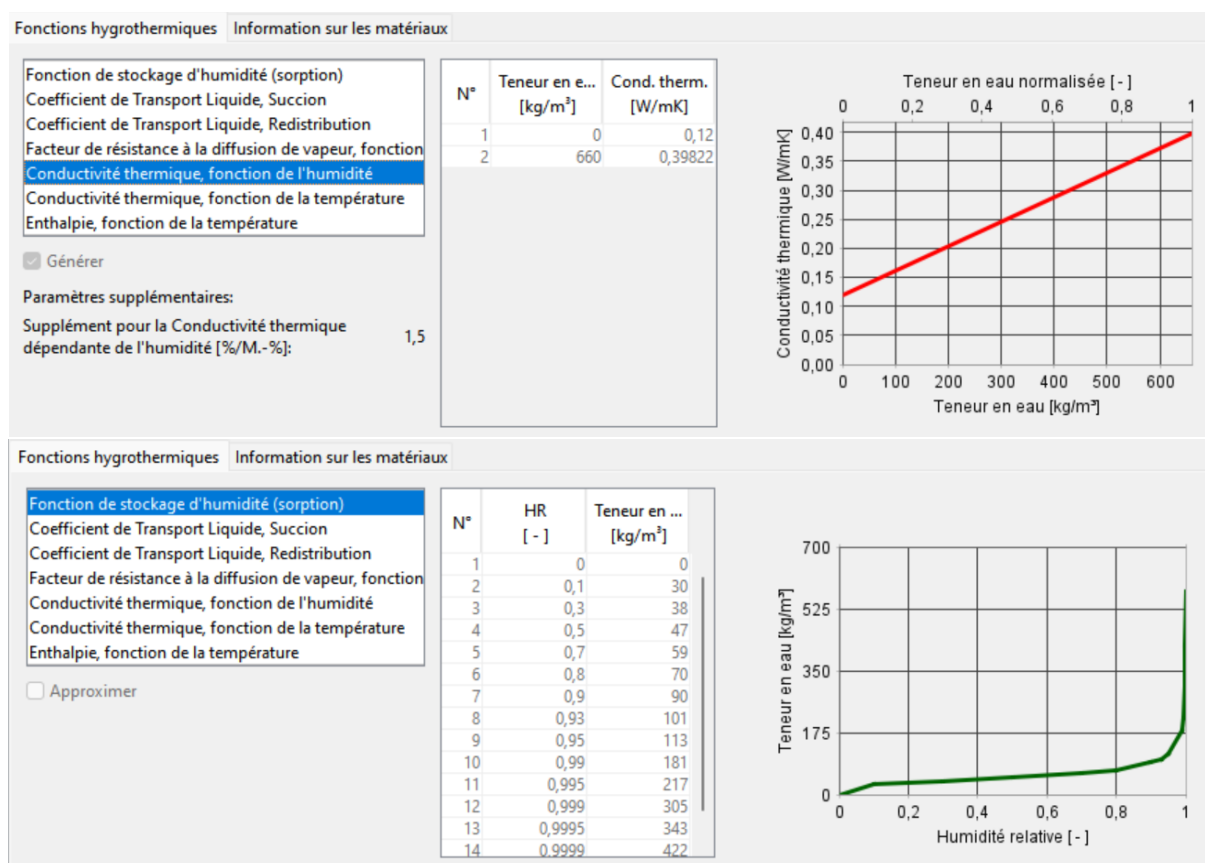


Figure 9 : Données dynamiques disponibles sous le logiciel WUFI pour un parement en bois

Les données physiques initiales sont celles de la bibliographie, mentionnées au tableau 2. La base de données WUFI est alimentée avec des données dynamiques de ces paramètres, notamment la variation de la conductivité thermique, en fonction de l'humidité, la variation de la conductivité en fonction de la température. Les figures 7 à 9 illustrent les variations des paramètres physiques pour

chaque type de matériau. Les paramètres pour le transport liquide n'ont pas été exposés dans ce présent rapport.

IV.1.2 Définition des conditions aux limites

La précision d'une simulation dans WUFI 2D dépend en grande partie de la qualité et de la pertinence des conditions aux limites et des données d'entrée définies. Ces paramètres conditionnent évidemment les échanges de chaleur et d'humidité entre la paroi et son environnement, et jouent un rôle dans la fidélité des résultats simulés par rapport aux mesures expérimentales (Künzel et Mitterer, 2012).

Les conditions aux limites correspondent aux contraintes imposées sur les surfaces de la paroi modélisée, en termes de température, humidité relative...etc. Elles sont généralement définies pour les deux faces principales de la paroi:

- La face intérieure qui en contact avec l'environnement intérieur du bâtiment, caractérisée par des conditions climatiques (température intérieure, humidité relative intérieure) ;
- La face extérieure exposée au climat extérieur, où on peut trouver potentiellement des données de vent, et rayonnement solaire supplémentaires.

Un fichier appelé .WAC dans WUFI contient les conditions climatiques dynamiques sur une année (données météorologique de Saint Pierre avec les caractéristiques de la zone d'essai en laboratoire, Terre Sainte) utilisées comme entrée pour les simulations hygrothermiques. Son format permet d'intégrer des données horaires, journalières de température, humidité relative, rayonnement solaire, pluie du vent...etc. Pour les parois verticales, nous avons dans un premier temps, utilisé les données des capteurs bouton (température et humidité relative) issues de l'essai dans le fichier wac avec une résolution horaire. Ces données ont été intégrées dans le fichier annuel de données. Le fichier suit une structure qui sera transformée sous forme d'un fichier .WAC pour les simulations (fig. 10).

Location:		Terre Sainte			
Description:		Description			
Longitude [°]:	55,48	Altitude [m]:	10		
Latitude [°]:	-21,34	Time Zone [h]:	4,0		
		First Year [yyyy]:	2025		

Example1.wac

Export to .WAC file

Note:

Year	Month	Day	Hour	cumul. Hour	Temperature [°C]	Air Humidity	Radiation [W/m²]	Rain [Ltr/m²h]	Wind Speed [m/s]	Wind Direction [°]
					Air Temperature	Rel. Humidity [0..1]	Solar Global Horiz.	Normal Rain	Skalar Average	north = 0; clockwise

Figure 10: Fenêtre de saisie du fichier Wac

Certaines données climatiques ont été modifiées pour prendre en compte les conditions de l'essai réalisé. En effet, l'essai se déroulant en conditions contrôlées, et dans des espaces clos, les autres paramètres relatifs au vent et au rayonnement doivent être modifiés. Dans notre cas, le rayonnement solaire est ramené à 10 W/m^2 pour des heures de base de la période de l'essai, la pluie est fixée à zéro sur toute la période de l'essai, le vent ignoré.

IV.1.3 Définition des conditions initiales pour la simulation

La qualité des résultats d'une simulation hygrothermique dépend non seulement des conditions aux limites, mais également du choix des conditions initiales, qui déterminent l'état de départ des matériaux avant le début de la période simulée. Dans notre étude, il s'agissait évidemment de définir

pour chaque couche de la paroi (plâtre BA13, laine de verre, bardage) une température et une humidité initiales représentatives de la réalité expérimentale.

Afin d'assurer la cohérence entre l'essai et la simulation, nous avons choisi d'utiliser les données issues des capteurs hygro-boutons placés dans l'échantillon. Pour chaque point de mesure (plâtre, laine de verre, bardage), la température et l'humidité relatives initiales ont été fixées à la moyenne des valeurs enregistrées par les capteurs lors des heures de l'essai.

V. Résultats & Discussion

V.1 Analyse des données expérimentales

Chaque essai de paroi a duré au minimum deux jours. Les matériaux utilisés étaient ainsi stabilisés par rapport aux conditions ambiantes dans la halle d'essai.

L'ensemble des données a permis de tracer les évolutions des températures et humidité relatives d'air pour chaque paroi étudiée. L'étude des isothermes moyennes spécifiques à chaque matériau effectué en Guyane⁵ a permis d'observer que les 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 classique rencontré pour les matériaux biosourcés et notamment fibres végétales.

Les panneaux conventionnels minéraux, théoriquement non hygroscopiques, captent une quantité d'eau bien moindre mais toutefois existante. La laine de verre présente une forme d'isotherme de type III, proche du type II mais avec des interactions milieu-vapeur d'eau très faibles.

Parois avec isolant de type laine de verre (fiche 1):

L'essai a été mené avec une configuration de fort gradient hygrothermique entre l'enceinte climatique et la halle d'essai. Les conditions extérieures étaient d'ordre estivales (situation climatique I). L'humidité relative tendant à augmenter dans la paroi, nous avons maintenu les conditions climatiques pendant 10 jours, afin d'atteindre à terme une situation de condensation, qui n'est pas apparue, bien qu'envisagée par le modèle statique (condensation envisagée dans le bardage). Il apparaît toutefois que des risques de condensations pouvaient apparaître au-delà de cette période notamment à l'interface plâtre/laine de verre.

Les essais en laboratoire sur les prototypes de parois ont conforté le principe que les isolants de type laine de verre possédaient peu d'interactions avec la vapeur d'eau. Les risques de condensation dans ce type d'isolant sont donc faibles, même après 10 jours dans des conditions très humides.

Toutefois ce type d'isolant se tassera s'il est en contact avec l'humidité condensée sur les parements.

Parois avec isolant de type laine de verre (fiche 2):

⁵ Cf Tache3_Comportement à l'eau des matériaux isolants

L'essai a été mené avec des conditions hivernales (enceinte climatique positionnée dans le STATron). Des points de condensation ont été ainsi trouvés dans la fiche 2, même avec une durée d'exposition courte (deux jours), au niveau du bardage en bois. Le bois a absorbé une quantité d'eau relativement importante (35 g. d'eau sur deux jours), mais la laine de verre et le plâtre ont absorbé très peu d'eau dans cette expérimentation.

Après cet essai, et suite à des essais in-situ qui ont mené à la présence de condensation, les conditions climatiques d'essais ont été modifiées pour les essais de laboratoire. Les deux fiches suivantes ont donc été effectuées avec la même situation climatique II.

Parois avec isolant de type laine de bois (fiche 3) :

Le panneau test a été élaboré avec un isolant de type fibre de bois compressées d'épaisseur 2.5 cm. Le panneau a été élaboré sans lame d'air. La fibre de bois a absorbé au moins 20 g d'eau sur deux jours, alors que le bardage n'a absorbé que peu d'eau.

Les courbes d'évolution de l'humidité dans le bardage et la laine de bois confirment ce résultat, montrant que l'absorption de l'humidité par la laine de bois est plus rapide que pour le parement de bois. Ainsi, aucun point de condensation n'a été trouvé dans le cadre de cette expérimentation. Toutefois, bien que des modifications sont observables dans les cinétiques d'absorption d'eau, il n'a pas été observé de désorption.

Cette configuration de paroi a été testée par simulation avec WUFI sur une plus longue durée afin de vérifier le comportement à long terme de cet isolant biosourcé en climat tropical. Les premiers résultats ont confirmé les risques de condensation relatifs à ce type d'isolant.

Parois avec isolant de type polystyrène (fiche 4) :

Ce panneau a été construit avec un isolant en polystyrène de 5 cm. L'expérimentation n'a pas donné naissance à des points de condensation. On peut observer que le comportement du bardage en bois et du polystyrène sont découplés par rapport à l'humidité.

En effet, les variations d'humidité à l'intérieur du bâtiment sont transférées au polystyrène, et comme le polystyrène est relativement résistant au transfert de vapeur d'eau, il va avoir un comportement proche d'un pare vapeur. Le placoplâtre associé va stocker cette vapeur d'eau. Ainsi le bardage en bois gère une quantité d'eau moindre et peut ainsi parfois désorber son humidité diminuant ainsi les risques de condensation.

V.2 Analyse des résultats de simulation

La phase de comparaison des résultats issus des simulations par WUFI 2D nous a permis dans un premier temps de proposer des données physiques modifiées pour les différents matériaux considérés (tableau 5).

Matériaux	Plâtre BA13	Bardage en bois	Laine de verre	Laine de bois
Conductivité thermique (λ) (W/m.K)	0.2	0.13	0.04	0.04
Épaisseur e (m)	0.0125	0.02	0.06	0.025
Masse volumique ρ (kg/m ³)	850	650	60	155
Résistance thermique R_t (m ² . K/W)	0.02	0.143	1.500	
Coefficient de diffusion de vapeur μ	8.3	Variable en fonction de HR	1.3	3
Résistance à la diffusion de vapeur S_d (m)	0.083	Variable en fonction de HR	0.06	

Capacité thermique massique c (J/kg.K)	850	1400	850	2050
Capacité thermique volumique (KJ/m ³ . K)	1365	940	103	
Porosité (%)	80	40	95	98

Tableau 6 : Paramètres physiques modifiés pour la modélisation sous WUFI 2D.

Les pages suivantes montrent ainsi la correspondance des simulations et des résultats. Toutefois, on peut noter que le logiciel prend en compte de façon précise les transferts thermiques, mais a plus de difficultés pour la prise en compte des transferts de masse.

Les résultats du logiciel montrent toutefois l'occurrence de points de condensation aux périodes indiquées pour l'expérimentation.

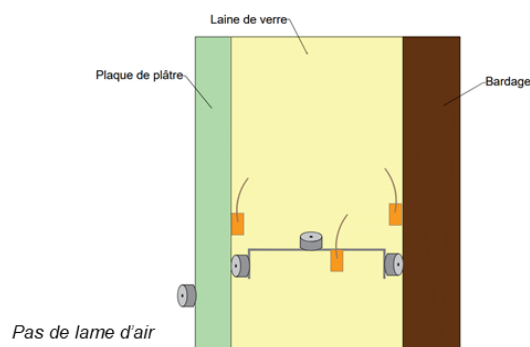
Il est important de noter que l'utilisation de WUFI2D découle de simulations hygrothermiques à l'échelle du bâtiment car il a besoin des ambiances intérieures aux locaux pour lesquels on étudie les parois. En outre, le logiciel est conçu pour étudier les transferts hygrothermiques, aussi, il est quelque peu difficile d'utiliser des matériaux telles que les tôles utilisées en toiture dans les DROM, car les tôles n'ont pas de porosité.

Les simulations effectuées ici n'ont pas permis d'étudier la mise en place de pare-vapeur ou de pare-pluie dans les parois.

Ce point sera abordé dans les propositions de mise en œuvre des parois.

Paroi étudiée en laboratoire : Plaque de plâtre - Isolant laine de verre - Parement extérieur bardage

Fiche I - Durée expérimentale : 13 jours

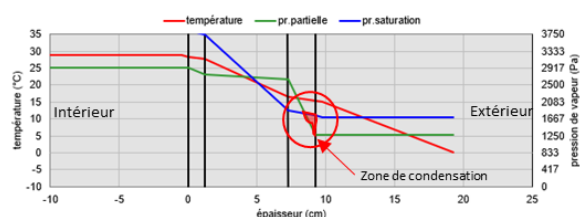


Caractéristiques des matériaux

Matériaux	Plaque de plâtre BA13	Bois bardage	Laine de verre
Conductivité thermique λ (W/m.K)	0,2	0,14	0,04
Épaisseur e (m)	0,0125	0,02	0,06
Masses volumiques ρ (kg/m³)	1 000	500	100
Résistance thermique R_t (m².K/W)	0,024	0,143	1,500
Coefficient de diffusion de vapeur μ	7	35	1
Résistance à la diffusion de vapeur S_d [m]	0,0875	0,7	0,06
Capacité thermique massique c (J/kg.K)	830	1880	1030
Capacité thermique volumique (J/m³.K)	1050000	940000	103000
Porosité (%)	50	40	97

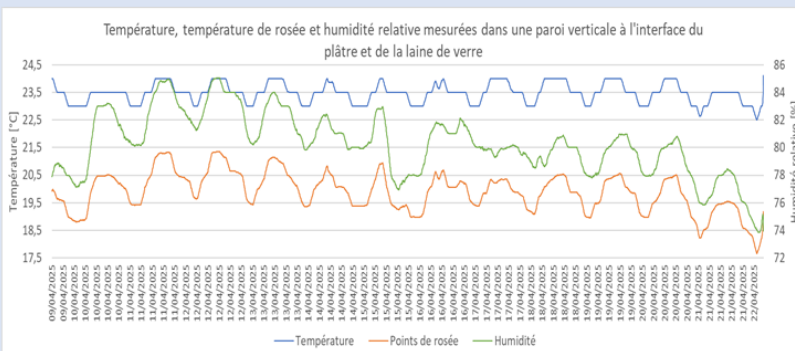
Conditions climatiques :
Intérieures : 29°C, 73%, 18,8 [g/kgas]
Extérieures : 15°C, 75%, 8,6 [g/kgas]

Résultats
théoriques
attendus

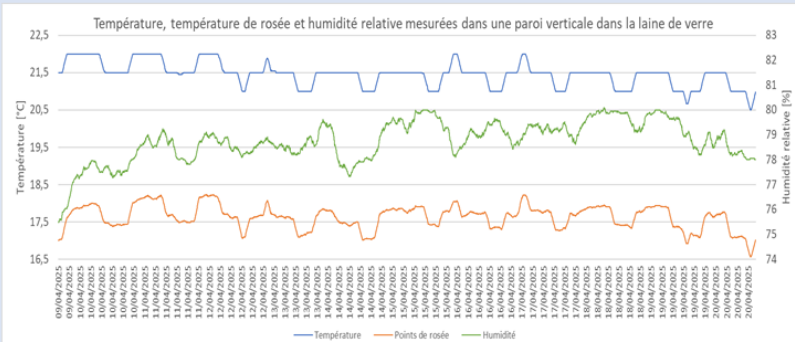


Capteurs hygro-boutons

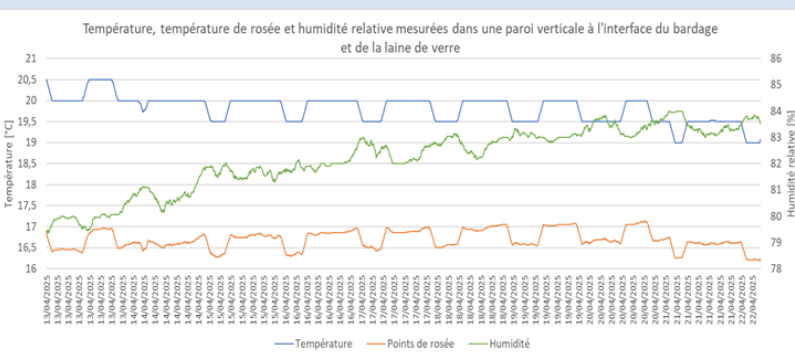
Résultats expérimentaux



Plaque de plâtre :
Température varie entre 22,5°C et 24°C
Humidité relative en diminution de 77% à 73%
Température interne éloignée du point de rosée : pas de condensation



Laine de verre :
Température varie entre 20,5°C et 22°C
Humidité relative avoisinant 78%-80%
Température interne éloignée du point de rosée : pas de condensation

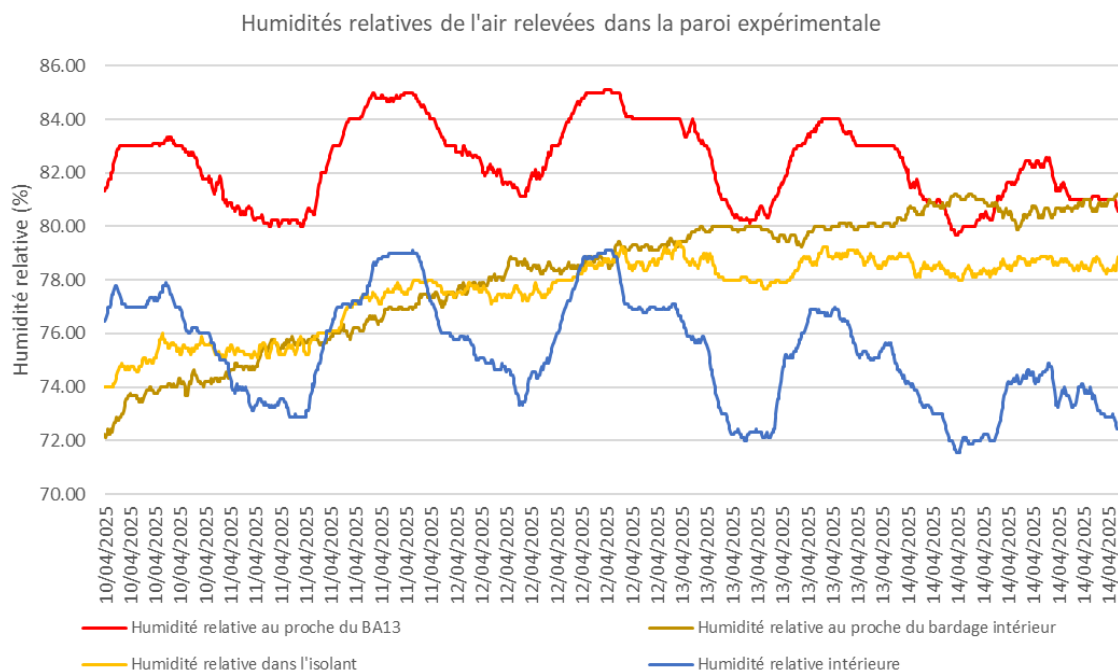
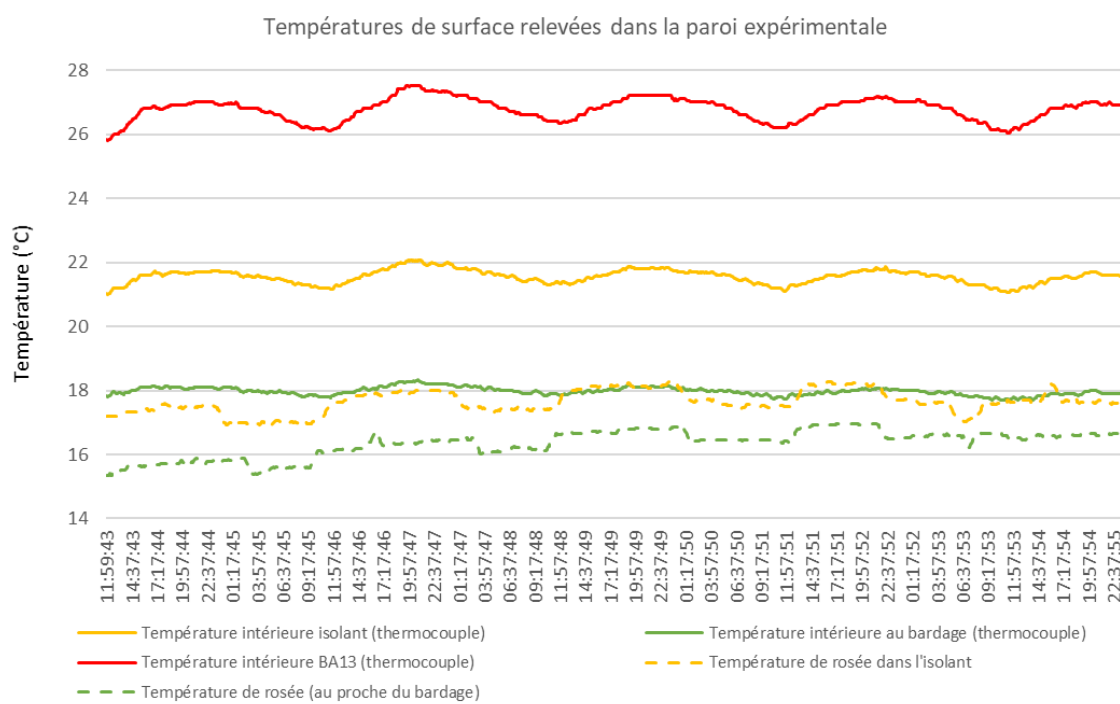


Parement extérieur bardage bois :
Température varie entre 19°C et 20,5°C
Humidité relative en augmentation de 79% à 84%
Le bois a absorbé l'humidité de l'air
Température interne éloignée du point de rosée : pas de condensation
À terme, les capteurs sont placés directement à la surface du parement

Paroi étudiée en laboratoire : Plaque de plâtre - Isolant laine de verre - Parement extérieur bardage

Résultats expérimentaux

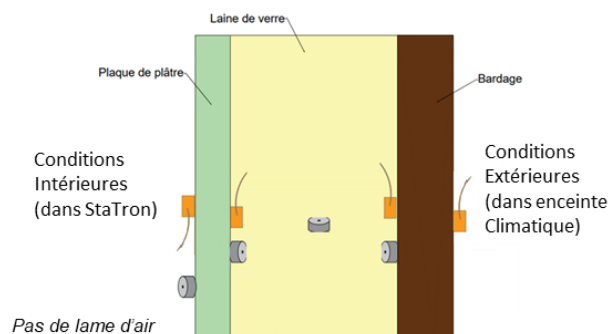
Températures de surface et humidités relatives



Analyse

Les températures de la plaque de plâtre sont proches des conditions intérieures avec une amplitudes 1,8°C.
 Les températures de la laine varient de 1,2°C, la laine permet de stabiliser la température.
 Les températures du bardage diminuent progressivement, elles tendent vers la température extérieure.

Paroi étudiée en laboratoire : Plaque de plâtre - Isolant laine de verre - Parement extérieur bardage Fiche II - Durée expérimentale : 3 jours

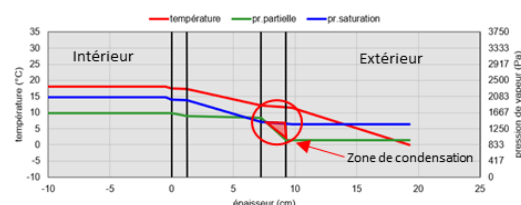


Caractéristiques des matériaux

Matériaux	Plaque de plâtre BA13	Bois bardage	Laine de verre
Conductivité thermique λ (W/m.K)	0,2	0,14	0,04
Épaisseur e (m)	0,0125	0,02	0,06
Masse volumique ρ (kg/m³)	1 000	500	100
Résistance thermique R_t (m².K/W)	0,024	0,143	1,500
Coefficient de diffusion de vapeur μ	7	35	1
Résistance à la diffusion de vapeur S_d [m]	0,0875	0,7	0,06
Capacité thermique massique c (J/kg.K)	830	1880	1030
Capacité thermique volumique (J/m³.K)	1050000	940000	103000
Porosité (%)	50	40	97

Conditions climatiques :
Intérieures : 18°C, 80%, 10,6 [g/kgas]
Extérieures : 11,5°C, 70%, 6 [g/kgas]

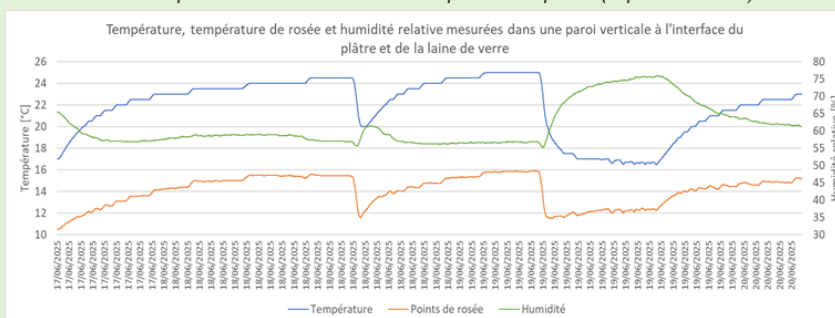
Résultats
théoriques
attendus



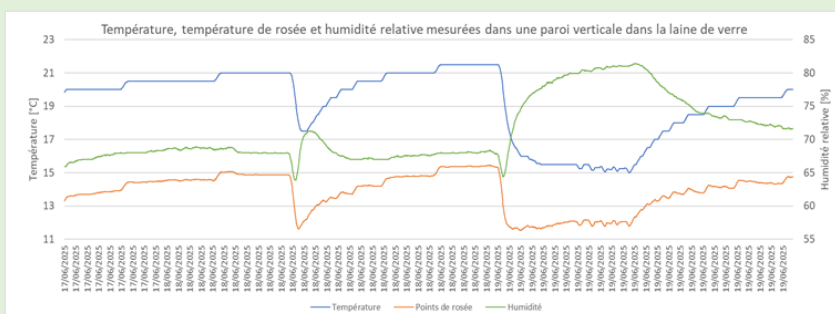
Résultats expérimentaux

Masse des matériaux	Avant essai	Après essai	Masse d'eau
BA13 + laine de verre	1502,95 g	1504,25 g	1.3 g
Bardage + tasseaux	2228,65 g	2264,30 g	35.65 g

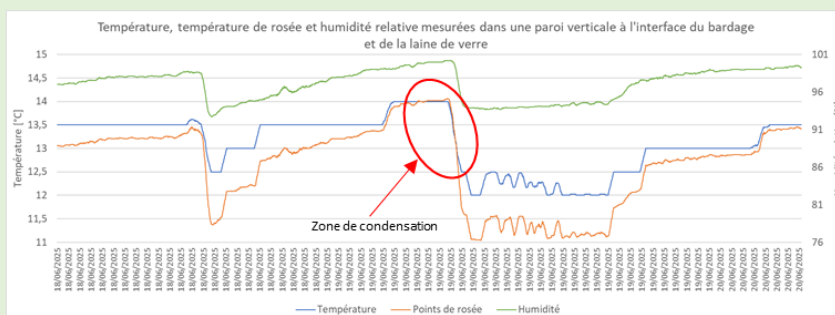
Mesures des températures et humidité relative au proche des parois (capteurs boutons)



Plaque de plâtre :
Température varie entre 16,5°C et 25°C
Humidité relative varie entre 55% et 60% puis augmente
Température interne éloignée du point de rosée : pas de condensation



Laine de verre :
Température varie entre 15°C et 21,5°C
Humidité relative varie entre 63%-71% puis augmente
Température interne éloignée du point de rosée : pas de condensation

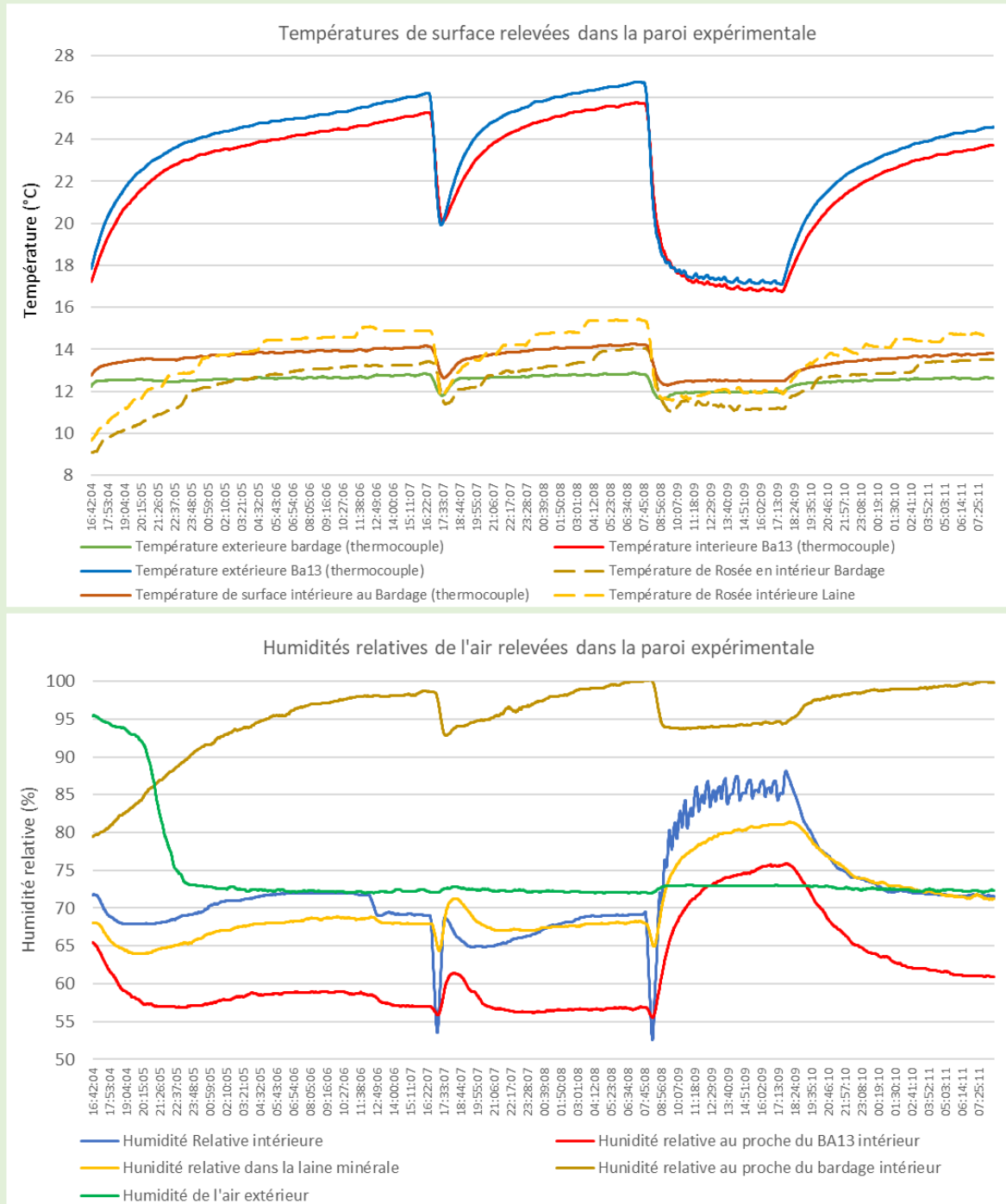


Parement extérieur bardage bois :
Température varie entre 12°C et 14°C
Humidité relative en augmentation de 80% à plus de 100% : condensation
Température interne égale au point de rosée : condensation
Le bardage a absorbé l'humidité.

Paroi étudiée en laboratoire : Plaque de plâtre - Isolant laine de verre - Parement extérieur bardage

Résultats expérimentaux

Températures de surface et humidités relatives



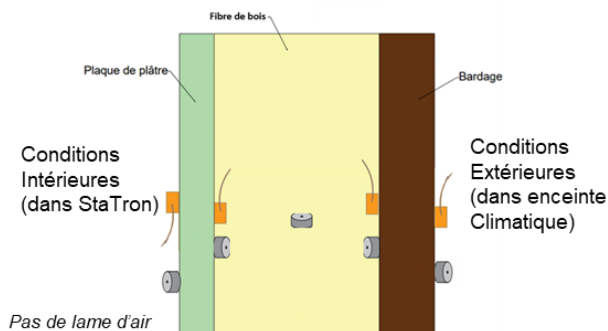
Analyse

Les températures intérieures et extérieures du bardage suivent les mêmes variations sans être égales : le bardage absorbe l'humidité grâce à sa capacité hygroscopique d'absorption

Les températures intérieures et extérieures du plâtre suivent les mêmes variations, avec des valeurs identiques : le transfert se fait par conduction dans le plâtre

Paroi étudiée en laboratoire : Plaque de plâtre - Isolant fibre de bois - Parement extérieur bardage

Fiche III- Durée expérimentale : 3 jours

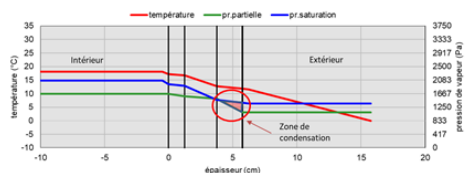


Caractéristiques des matériaux

Matériaux	BA13	Bois bardage	Fibre de bois
Conductivité thermique λ (W/m.K)	0,2	0,14	0,04
Épaisseur e (m)	0,0125	0,02	0,025
Masse volumique ρ (kg/m ³)	1000	500	270
Résistance thermique R_t (m ² .K/W)	0,063	0,143	0,625
Coefficient de diffusion de vapeur μ	10	35	5
Résistance à la diffusion de vapeur S_d [m]	0,125	0,7	0,125
Capacité thermique massique c (J/kg.K)	830	1880	2050
Capacité thermique volumique (J/m ³ .K)	830000	940000	553500
Porosité (%)	30-60	40	75

Conditions climatiques :
Intérieures : 18°C, 80%, 10,6 [g/kgas]
Extérieures : 11,5°C, 70%, 6 [g/kgas]

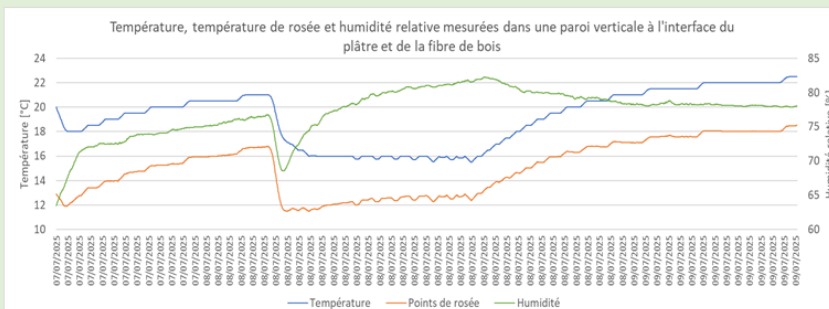
Résultats
théoriques
attendus



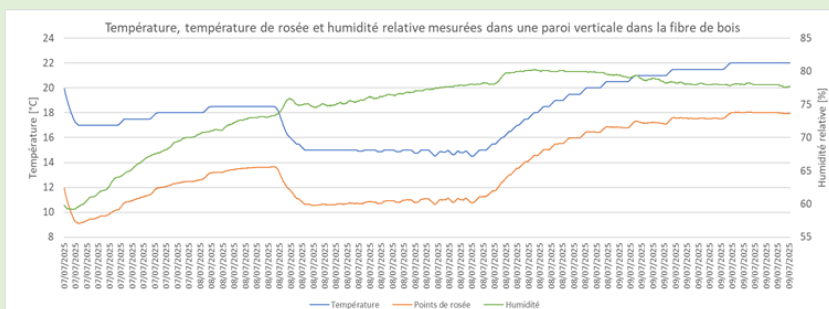
Résultats expérimentaux

Poids matériaux	Avant essai	Après essai	Masse d'eau
BA13 + fibre de bois	1850.15 g	1873,85 g	23.7 g
Bardage + tasseaux	1955.5 g	1960,05 g	5.45 g.

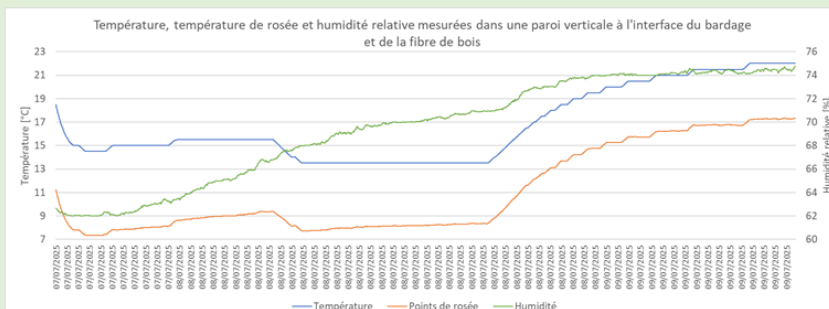
Mesures des températures et humidité relative au proche des parois (capteurs boutons)



Plaque de plâtre :
Température varie entre 15,5°C et 22,5°C
Humidité relative varie entre 63,5% et 82%
Température interne éloignée du point de rosée : pas de condensation



Fibre de bois :
Température varie entre 14,5°C et 22°C
Humidité relative augmente progressivement de 59% à 80% puis diminue à 77%
Température interne éloignée du point de rosée : pas de condensation



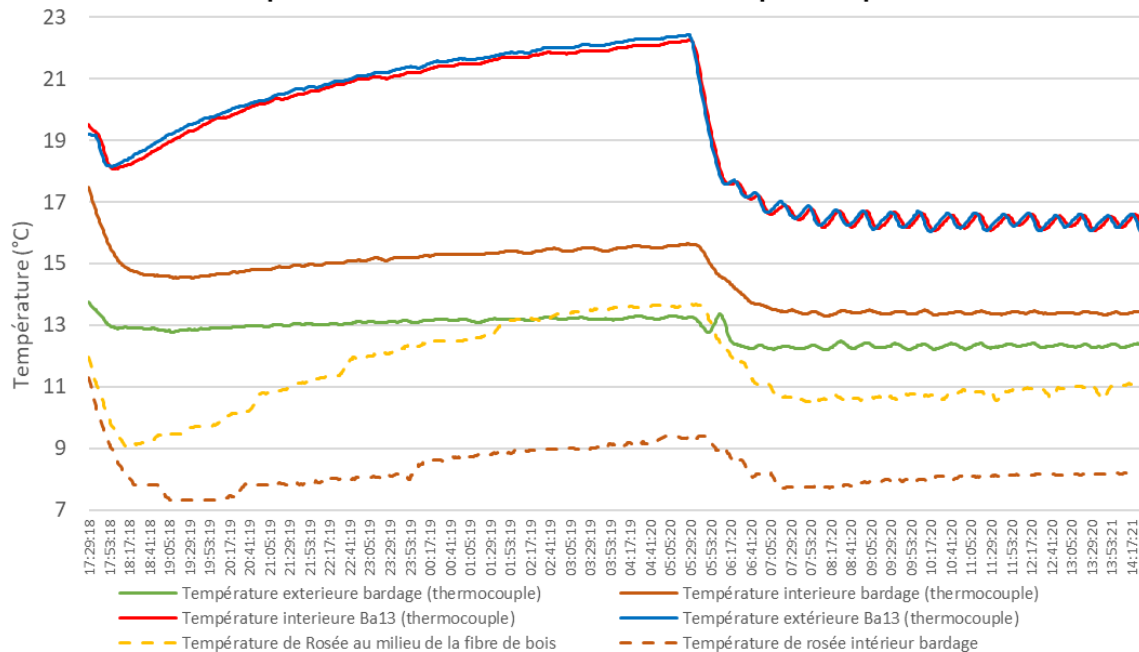
Parement extérieur bardage bois :
Température varie entre 13,5°C et 22°C
Humidité relative en augmentation de 62% à 74%
Température interne éloignée du point de rosée : pas de condensation

Paroi étudiée en laboratoire : Plaque de plâtre - Isolant fibre de bois - Parement extérieur bardage

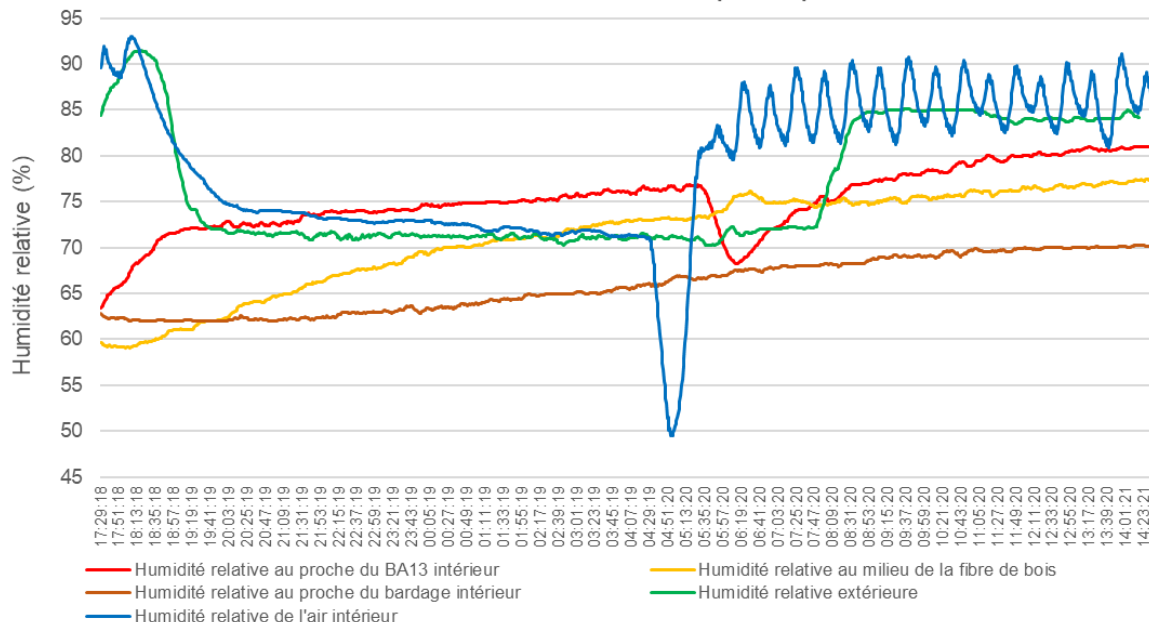
Résultats expérimentaux

Températures de surface et humidités relatives

Températures de surface relevées dans la paroi expérimentale



Humidités relatives de l'air relevées dans la paroi expérimentale

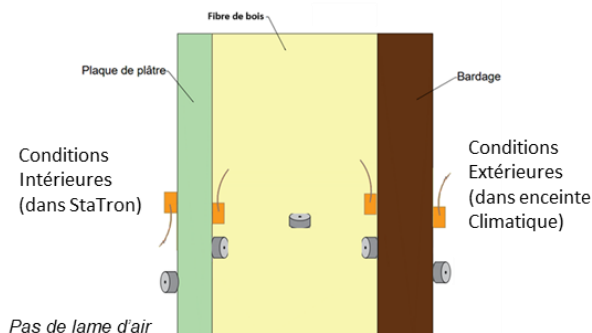


Analyse

Les températures intérieures et extérieures du bardage suivent les mêmes variations sans être égales : le bardage absorbe l'humidité grâce à sa capacité hygroscopique d'absorption. La résistance thermique du bois est représentée par la différence de température intérieure et extérieure.

Les températures intérieures et extérieures du plâtre suivent les mêmes variations : le transfert se fait par conduction dans le plâtre, le plâtre a une faible résistance thermique ce qui explique que les températures intérieures et extérieures soient proches ou égales

Paroi étudiée en laboratoire : Plaque de plâtre - Isolant polystyrène - Parement extérieur bardage
Fiche IV - Durée expérimentale : 3 jours

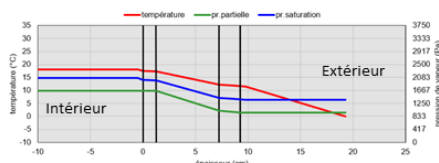


Caractéristiques des matériaux

Matériaux	BA13	Polystyrène (extrudé)	Bois bardage
Conductivité thermique λ (W/m.K)	0,2	0,03	0,14
Épaisseur e (m)	0,0125	0,06	0,02
Masse volumique ρ (kg/m³)	1000	40	500
Résistance thermique R_t (m².K/W)	0,063	2,000	0,143
Coefficient de diffusion de vapeur μ	10	140	35
Résistance à la diffusion de vapeur S_d [m]	0,125	8,4	0,7
Capacité thermique massique c (J/kg.K)	830	1450	1880
Capacité thermique volumique (J/m³.K)	830000	58000	940000
Porosité (%)	30-60	≤5	40

Conditions climatiques :
Intérieures : 18°C, 80%, 10,6 [g/kgas]
Extérieures : 11,5°C, 70%, 6 [g/kgas]

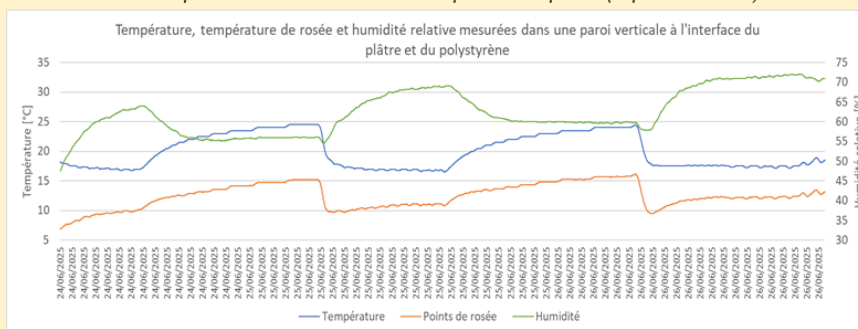
Résultats
théoriques
attendus



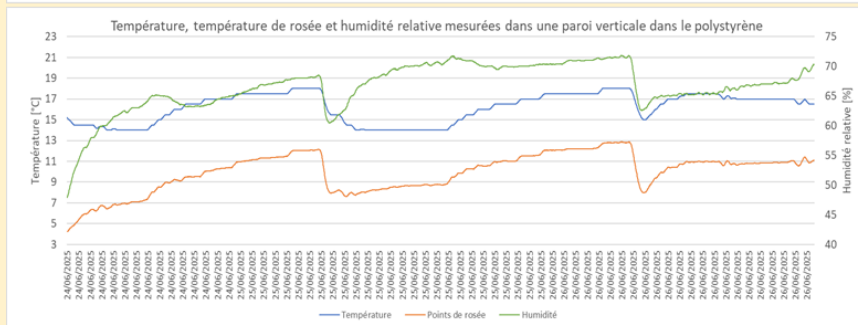
Résultats expérimentaux

Poids matériaux	Avant essai	Après essai	Masse d'eau
BA13 + polystyrène	1614,65 g	1620,80 g	5.85 g
Bardage + tasseaux	2230,60 g	2230,65 g	0.5 g

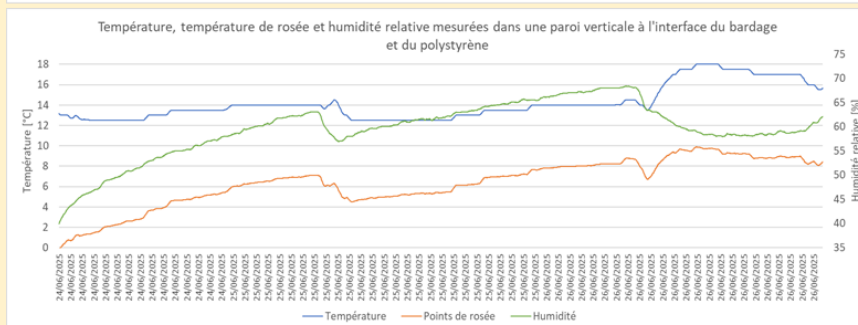
Mesures des températures et humidité relative au proche des parois (capteurs boutons)



Plaque de plâtre :
Température varie entre 16°C et 25°C
Humidité relative en augmentation de 46% à 70%
Température interne éloignée du point de rosée : pas de condensation



Polystyrène :
Température varie entre 14°C et 18°C
Humidité relative en augmentation de 47% à 72%
Température interne éloignée du point de rosée : pas de condensation

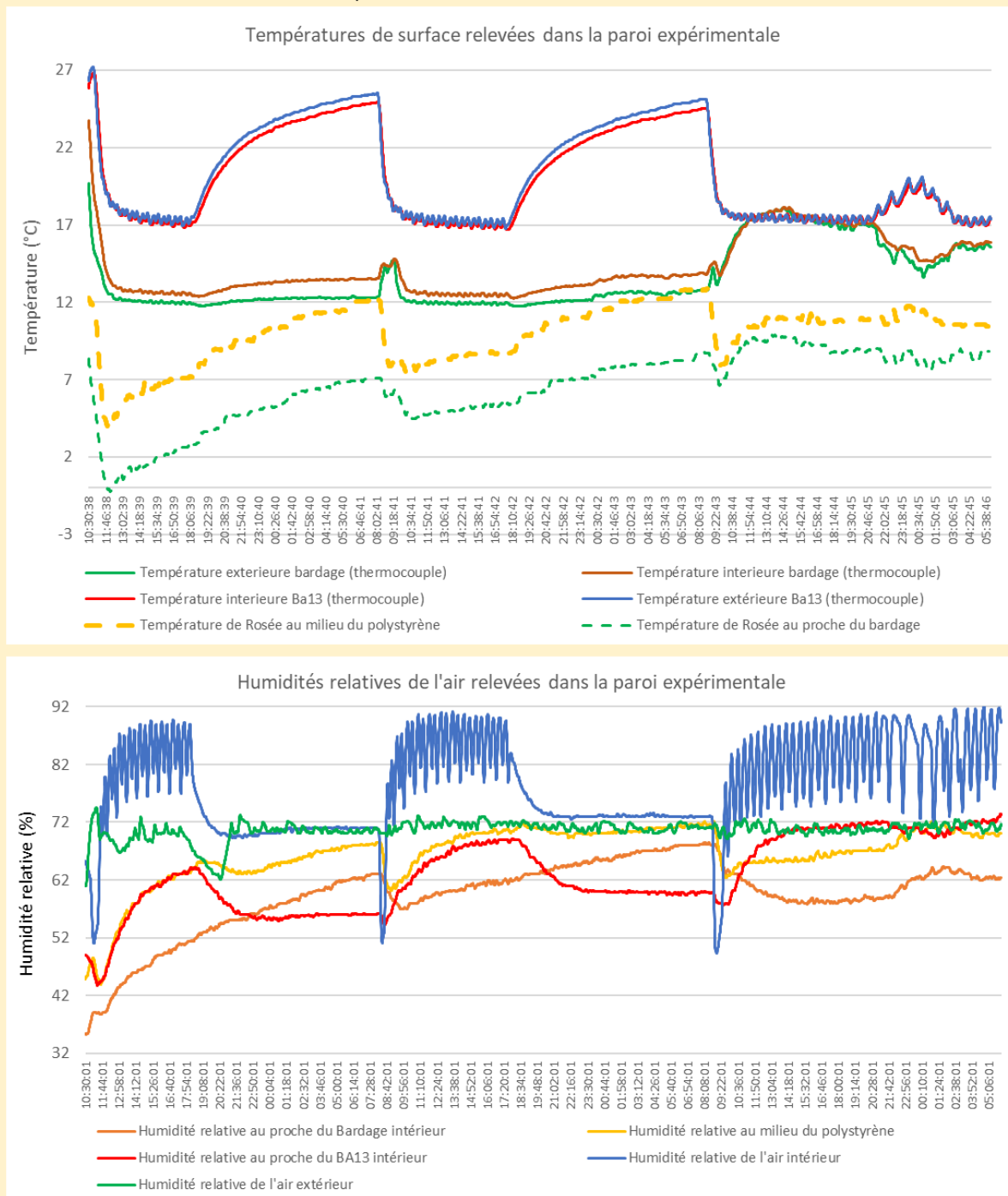


Parement extérieur bardage bois :
Température varie entre 12,5°C et 18°C
Humidité relative en augmentation de 39% à 61%
Température interne inférieure au point de rosée : pas de condensation

Paroi étudiée en laboratoire : Plaque de plâtre - Isolant polystyrène - Parement extérieur bardage

Résultats expérimentaux

Températures de surface et humidités relatives



Analyse

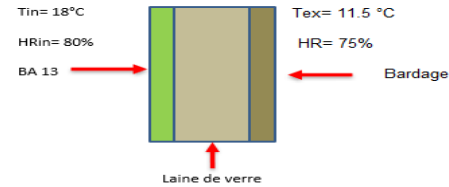
Le polystyrène fonctionne comme un écran au transfert d'humidité, il y a très peu d'influence entre les humidités relatives intérieures et extérieures. Il n'y a pas de risque de condensation au proche du bardage. Le bardage en bois peut ainsi adsorber et désorber la vapeur d'eau.

Étude Technique des Comportements Hygrothermiques : Mesure et Wufi 2D

OBJECTIFS

- Évaluer les transferts d'humidité et de chaleur à travers la paroi.
- Analyser le comportement hygrothermique en conditions climatiques réelles.
- Identifier les risques de condensation ou d'accumulation d'humidité
- Comparaison Mesure et modélisation pour la validation du modèle

Paroi : Plaque de plâtre BA 13-Laine de verre- Bardage



Protocole, synthèse des conditions d'essai climatique et simulation numérique

Réalisation de la paroi d'essai conformément aux dimensions indiquées dans le tableau des matériaux.

Test effectué dans des conditions contrôlées à l'intérieur d'une grande enceinte climatique.

La petite enceinte climatique contenant l'échantillon a été placée dans le STATron.

Conditions de départ : température de 18 °C et humidité relative de 80%. Dans la grande enceinte climatique 11.5°C et 75% dans la petite enceinte

Conditions aux limites

Température et humidité imposées sur les faces intérieure et extérieure de la paroi.

Utilisation d'un fichier WAC enregistrant les données climatiques horaires (température, humidité, etc.) pour la période de l'essai (02 jours)

Simulation effectuée en imposant un régime adiabatique pour les transferts verticaux

Données expérimentales

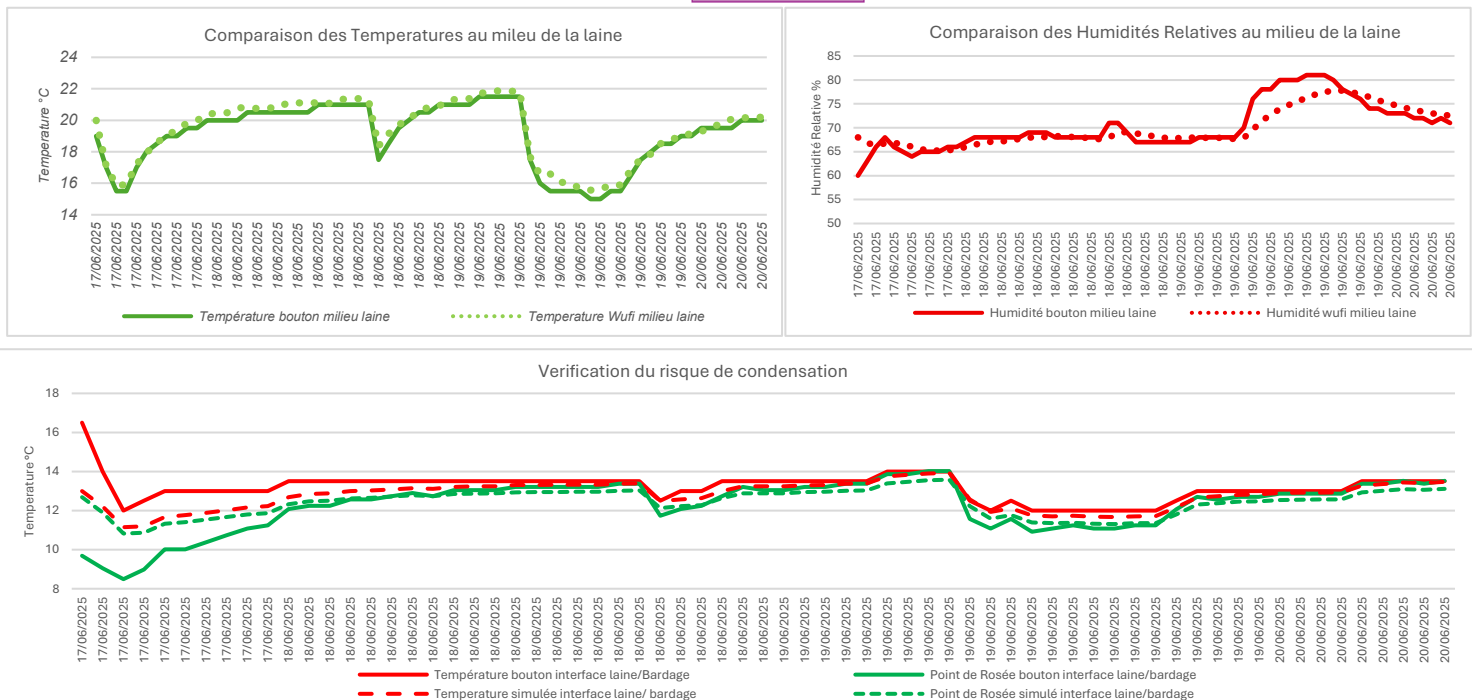
Les mesures réelles des capteurs (température et humidité) remplacent les données météorologiques du fichier WAC pour la période étudiée lors de la simulation Wufi 2D avec des pas de temps de 1 heure

Rayonnement, pluie et vent neutralisés (fixés à des valeurs faibles ou nulles) pour les simulations.

Conditions initiales

Température et humidité initiales de chaque couche (plâtre, laine de verre, bardage) fixées à la moyenne des valeurs mesurées par les capteurs bouton

Résultats



Analyse et interprétation des résultats

Graphiques	Observation principale	Analyse et interprétation	Risque/Avantage pour le bâtiment
Températures au milieu de la laine	Bonne corrélation mesure/simulation, Température oscillant entre 16°C et 22°C, moyenne vers 19°C et une variabilité modérée avec des fluctuations sur la période d'environ $\pm 3^\circ\text{C}$ à $\pm 4^\circ\text{C}$	La laine minérale constitue une bonne isolation thermique, modèle de simulation fiable	Confort thermique assuré
Humidités relatives au milieu de la laine	HR stable 60-80%, bonne cohérence mesure/simulation, Ecart type 4,5% Aucun risque de condensation	La vapeur d'eau circule bien, la laine peut respirer, donc il y aura peu de risque d'apparition d moisissures.	Risque de condensation faible

Risque de condensation (interface laine/bardage)

La température est proche du point de rosée, ce qui est un signal d'attention, mesures et simulation coïncidentes

Un risque réel de condensation existe à cause de la proximité de la température et du point de rosée,

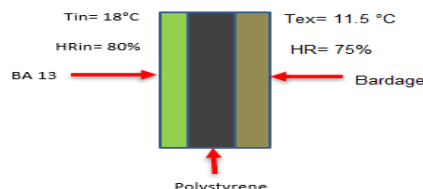
Il y a un risque de condensation si les conditions changent, mais pour cette configuration, la gestion de l'humidité est correcte et le système reste stable et sain

Étude Technique des Comportements Hygrothermiques : Mesure et WUfi 2D

OBJECTIFS

- Évaluer les transferts d'humidité et de chaleur à travers la paroi.
- Analyser le comportement hygrothermique en conditions climatiques réelles.
- Identifier les risques de condensation ou d'accumulation d'humidité
- Comparaison Mesure et modélisation pour la validation du modèle

Paroi : Plaque de plâtre BA 13-Polystyrene- Bardage



Protocole, synthèse des conditions d'essai climatique et simulation numérique

Réalisation de la paroi d'essai conformément aux dimensions indiquées dans le tableau des matériaux.

Test effectué dans des conditions contrôlées à l'intérieur d'une grande enceinte climatique.

La petite enceinte climatique contenant l'échantillon a été placée dans la grande enceinte pour minimiser les variations environnementales.

Conditions de départ : température de 18 °C et humidité relative de 80%. Dans la grande enceinte climatique 11.5°C et 75% dans la petite enceinte

Conditions aux limites

Température et humidité imposées sur les faces intérieure et extérieure de la paroi.

Utilisation d'un fichier WAC enregistrant les données climatiques horaires (température, humidité, etc.) pour la période de l'essai (02 jours)

Simulation effectuée en imposant un régime adiabatique pour les transferts verticaux.

Données expérimentales

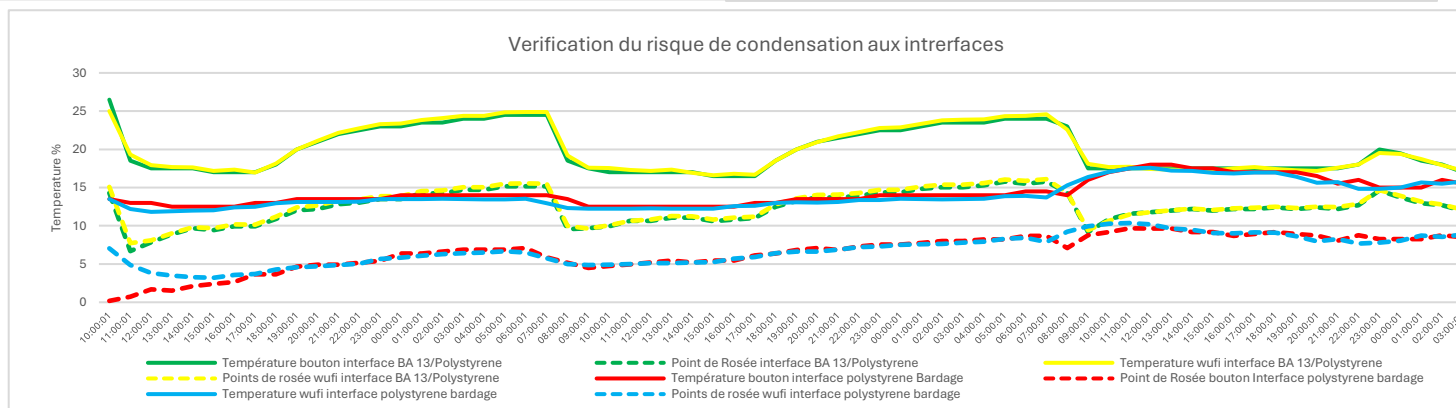
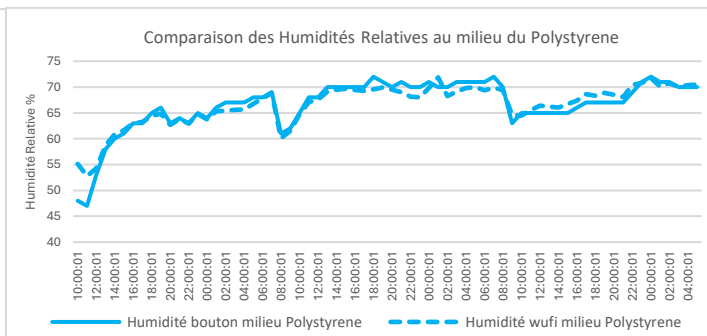
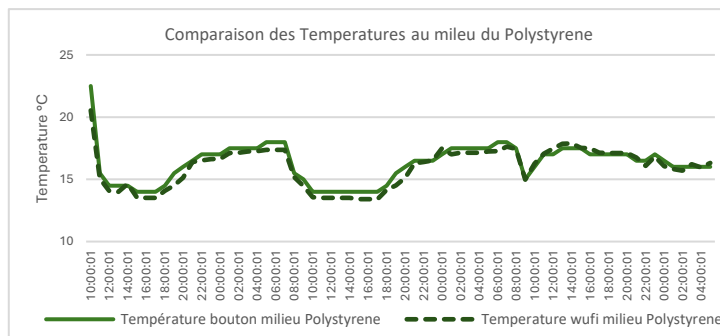
Les mesures réelles des capteurs (température et humidité) remplacent les données météorologiques du fichier WAC pour la période étudiée lors de la simulation Wufi 2D avec des parts de temps de 1 heure

Rayonnement, pluie et vent neutralisés (fixés à des valeurs faibles ou nulles) pour simuler

Conditions initiales

Température et humidité initiales de chaque couche (plâtre, laine de verre, bardage) fixées à la moyenne des valeurs mesurées par les capteurs bouton

Résultats



Analyse et interprétation des résultats

Graphique	Observation principale	Analyse et interprétation	Risque/Avantage pour le bâtiment
Températures au milieu du polystyrène	Bonne corrélation mesure/simulation. Température oscillante entre 14°C et 17°C, avec 16°C en moyenne, et 1,2 °C d'écart type	Bonne inertie thermique, stabilité démontrée, polystyrène isole bien. Courbes cohérentes indiquant des mesures fiables	Confort thermique assuré, stabilité de l'ambiance intérieure
Humidité relative au milieu du polystyrène	HR stable 60-70%, bonne cohérence mesure/simulation, 65% en moyenne, écart type 7%, aucune zone à risque observée	La vapeur d'eau circule, l'isolant fonctionne comme un pare vapeur, peu de risque de moisissure.	Risque d'humidité faible, conditions intérieures sous contrôle
Risque de condensation aux interfaces (laine/bardage/polystyrène)	T° proche mais globalement > point de rosée. Mesures & simulation en accord. Risque si changements forts, mais sécurité maintenue.	Potentiel de condensation faible puisque T° > point de rosée, gestion de l'humidité efficace. Surveillance nécessaire si conditions changent.	Faible risque global, système stable, gestion de la vapeur efficace

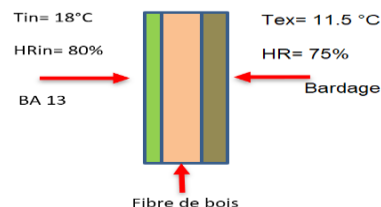
Étude Technique des Comportements Hygrothermiques : Mesure et WUFI 2D

OBJECTIFS

- Évaluer les transferts d'humidité et de chaleur à travers la paroi.
- Analyser le comportement hygrothermique en conditions climatiques réelles.
- Identifier les risques de condensation ou d'accumulation d'humidité
- Comparaison Mesure et modélisation pour la validation du modèle

Propriétés thermiques et hygrothermiques des matériaux

Paroi : Plaque de plâtre BA 13-Fibre de bois- Bardage



Protocole, synthèse des conditions d'essai climatique et simulation numérique

Réalisation de la paroi d'essai conformément aux dimensions indiquées dans le tableau des matériaux.

Test effectué dans des conditions contrôlées à l'intérieur d'une grande enceinte climatique.

La petite enceinte climatique contenant l'échantillon a été placée dans la grande enceinte pour minimiser les variations environnementales.

Conditions de départ : température de 18 °C et humidité relative de 80%. Dans la grande enceinte climatique 11.5°C et 75% dans la petite enceinte

Conditions aux limites

Température et humidité imposées sur les faces intérieure et extérieure de la paroi.

Utilisation d'un fichier WAC enregistrant les données climatiques horaires (température, humidité, etc.) pour la période de l'essai (02 jours)

Simulation effectuée en imposant un régime adiabatique pour les transferts verticaux

Données expérimentales

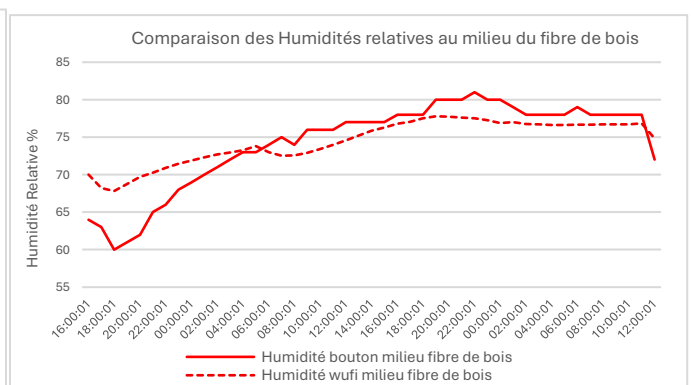
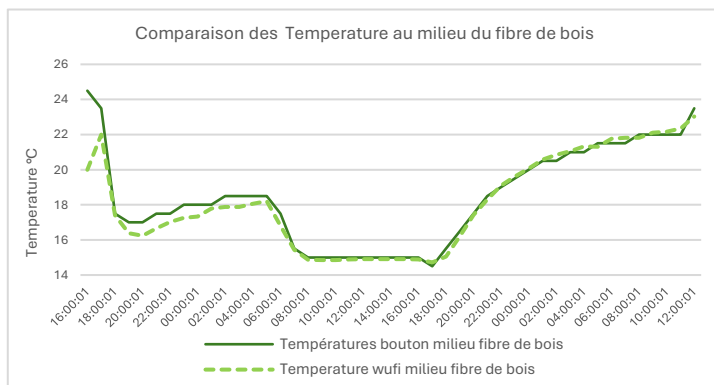
Les mesures réelles des capteurs (température et humidité) remplacent les données météorologiques du fichier WAC pour la période étudiée lors de la simulation Wufi 2D avec des parts de temps de 1 heure

Rayonnement, pluie et vent neutralisés (fixés à des valeurs faibles ou nulles)

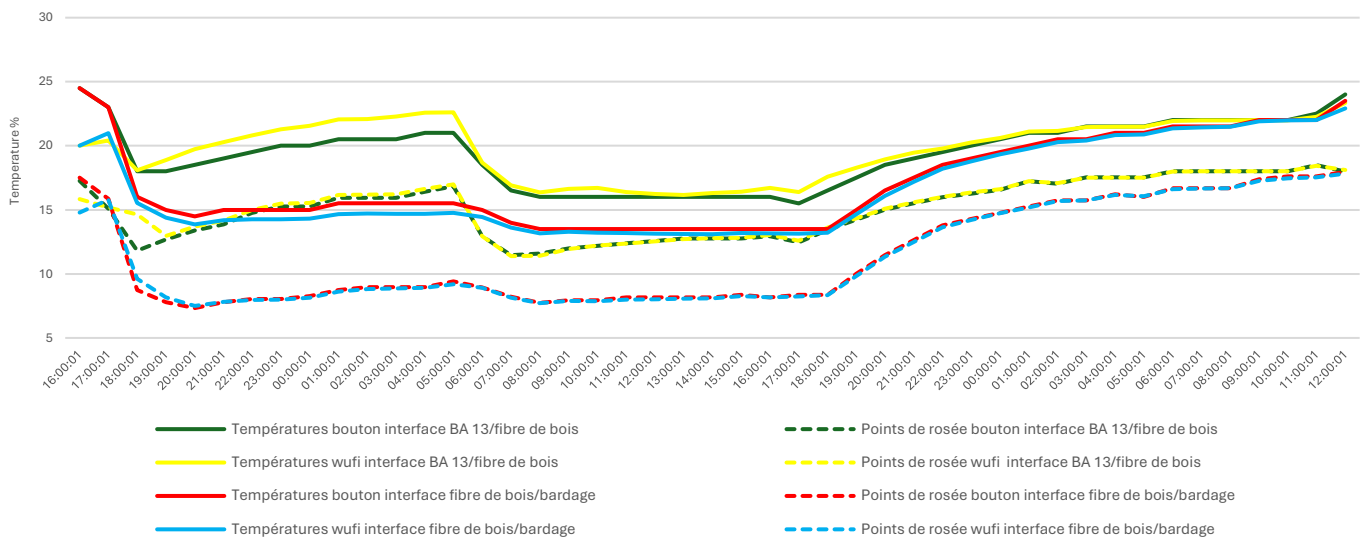
Conditions initiales

Température et humidité initiales de chaque couche (plâtre, laine de verre, bardage) fixées à la moyenne des valeurs mesurées par les capteurs bouton

Résultats



Vérification de risque de condensation aux interfaces



Analyse et interprétation des résultats

Élément analysé	Observations principales	Interprétation	Conclusion
Température au milieu de la fibre de bois	18-20°C en moyenne, et 3-4°C d'écart type La température varie modérément entre 15°C et 23°C, avec une très bonne cohérence entre les mesures expérimentales (bouton) et les simulations (WUFI).	La fibre de bois assure une bonne isolation thermique en retardant la propagation de la chaleur et en stabilisant la température intérieure. Elle régule aussi efficacement l'humidité tout en empêchant la condensation à l'intérieur de la paroi,	Excellente isolation thermique, retardant les variations de température plus importante
Humidité au milieu de la fibre de bois	70-80% en moyenne, et 5-8% d'écart type L'humidité reste stable avec une légère augmentation nocturne, sans pics forts. La proximité des courbes bouton et WUFI montre une bonne régulation hygrométrique et une validation fiable du modèle.	Matériau hygroscopique régulant l'humidité, évitant pics et fluctuations rapides, toutefois, le comportement de l'isolant est à vérifier en situation de forte hygrométrie.	Régulation humide stable, limite les risques d'endommagement hygrothermique
Risque de condensation aux interfaces	Températures entre 15°C et 23°C, écart type faible : 2°C Les températures d'interface restent supérieures aux points de rosée, assurant aucune condensation. L'accord entre mesures et simulation confirme une bonne conception hygrothermique.	Bonne conception hygrothermique, protection contre condensation et moisissures	Paroi sécurisée contre la condensation, limite les pathologies liées à l'humidité

VI. 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.

Le prototype de laboratoire et systèmes d'instrumentation 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 type d'enceinte climatique utilisé, bien qu'ayant permis l'acquisition de données reproductibles par simulations, et ayant démontré des configurations amenant à la condensation dans les parois a donné quelques difficultés de maîtrise de la .

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 ne sont toutefois 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 :

- Mise en place d'un hygromètre pour améliorer la précision des données acquises.
- Essai de parois horizontales ventilées par un système de grilles perforées
- Protection des isolants avec un pare pluie, situé sur ou sous l'isolant
- Essais sur un prototype de paroi de type toiture rampante ou comble.