



### Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/23802>

#### To cite this version :

Monika WOLOSZYN, Nolwenn LE PIERRÈS, Yannick KEDOWIDÉ, Joseph VIRGONE, Abdelkrim TRABELSI, Zakaria SLIMANI, Eric MOUGEL, Romain REYMOND, Helisoa RAFIDIARISON, Patrick PERRE, Florian PIERRE, Rafik BELARBI, Nabil ISSAADI, Kamilia ABAHRI, Timea BEJAT, Amandine PIOT, Étienne WURTZ, Thierry DUFORESTEL, Mathilde COLMET-DAAGE, Bernard PERRIN, Jomaa WAHBI - Vers une méthode de conception HYGRO-thermique des BATiments performants : démarche du projet HYGRO-BAT - In: IBPSA France 2014, France, 2014 - IBPSA France 2014 - 2014

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



## Vers une méthode de conception HYGRO-thermique des BATiments performants : démarche du projet HYGRO-BAT

**Monika Woloszyn\***, Nolwenn Le Pierrès, Yannick Kedowidé,

*LOCIE, CNRS UMR 5271, Université de Savoie*

**Joseph Virgone, Abdelkrim Trabelsi, Zakaria Slimani,**

*CETHIL, CNRS UMR 5008, Université Lyon 1, Insa Lyon*

**Eric Mougel, Romain Reymond, Helisoa Rafidiarison,**

*ENSTIB, LERMAB, Université de Lorraine*

**Patrick Perré, Floran Pierre,**

*Ecole Centrale Paris, LGPM, EA 4038*

**Rafik Belarbi, Nabil Issaadi, Kamilia Abahri,**

*Université de la Rochelle, LaSIE CNRS FRE 3474*

**Timéa Bejat, Amandine Piot, Etienne Wurtz**

*CEA / LITEN / LEB - INES*

**Thierry Duforestel, Mathilde Colmet Daâge,**

*EDF R&D*

**Bernard Perrin, Marie Coutand, Oly Vololonirina,**

*LMDC, Université Paul Sabatier, Insa Toulouse*

**Claude Pompéo,**

*CSTB, Grenoble*

**Wahbi Jomaa,**

*Arts & Métiers Paris Tech, Université de Bordeaux – I2M, UMR5295 :*

**Jean-Sébastien Lauffer, Philippe Thiriet,**

*CRITT BOIS*

**Robert Diss, Nadia Rémond**

*LIGNATEC*

**Olivier Legrand,**

*NR GAIA*

*\*monika.woloszyn@univ-savoie.fr*

---

*RESUME. Cet article présente la démarche mise en œuvre dans le projet collaboratif ANR Hygrobat, qui vise à donner des outils pour quantifier de manière fiable l'impact des transferts de masse sur les transferts de chaleur dans les parois de bâtiments comprenant des matériaux fortement hygroscopiques. Les matériaux sélectionnés dans ce projets (fibre de bois, bois massif, OSB) ont été soigneusement caractérisés. Leurs propriétés hygrothermiques ont été mesurées en laboratoire, puis ils ont été mis en œuvre dans des parois, soumises à des conditions aux limites de variées. L'originalité de l'étude réside dans : (i) la démarche « pas à pas » de complexité croissante, partant des caractérisations d'un seul matériau en conditions stationnaires, jusqu'aux mesures sur une paroi multicouche en climat réel ; (ii) les vérifications croisées de mesures expérimentales, qui sont effectuées dans deux des laboratoires partenaires du projet, parfois sur des dispositifs différents ; (iii) association des benchmarks expérimentaux et numériques.*

*MOTS-CLÉS : transferts couplés de chaleur et de masse, matériaux hygroscopiques, benchmarks*

---

*ABSTRACT. This paper presents the study conducted within the collaborative project ANR Hygrobat, aiming at establishing robust tools to precisely quantify the impact of mass transfer on heat transfer for wall assemblies composed of highly hygroscopic materials. Materials selected in this project (wood fibre, wood, OSB) have been thoroughly characterised in different laboratories, and then used in wall assemblies under different climatic conditions. The originality of this work lies in: (i) the general methodology, starting with steady state characterisations of a single material, and gradually complexifying conditions to wall assemblies under real climate, (ii) cross-verifications of experimental measurements, that are repeated in two laboratories, on similar or different test facilities, (iii) association of numerical and experimental benchmarks.*

*KEYWORDS: heat and mass transfers, hygroscopic materials, benchmarks.*

---

## 1. INTRODUCTION

Depuis quelques années, la problématique des transferts couplés de masse et de chaleur fait l'objet d'un surcroît d'intérêt de la part de la communauté scientifique en charge de la thermique et de l'énergétique du bâtiment. Ceci est lié à l'impact des transferts de masse sur le comportement énergétique réel du bâtiment, soumis aux sollicitations de son environnement. Malgré les développements récents dans ce domaine, des zones d'ombre persistent. En particulier des écarts entre les mesures et les simulations numériques dans le cas des sollicitations dynamiques des matériaux à forte hygroscopicité ont été constatés dans différents projets français et internationaux (Annexes 24 et 41 de l'Agence Internationale de l'Energie, ANR PREBAT OPTI-MOB). L'origine de ces écarts n'est pas véritablement connue : la métrologie, les caractéristiques des matériaux, les modèles thermo-hygriques eux-mêmes ? Les projets passés et en cours mettent en évidence la complexité de la problématique, mais n'ont pas permis d'élucider l'origine de ces écarts ni de mettre en place des outils adaptés. Or, la réponse à cette problématique est fondamentale, car des gisements énergétiques sont précisément attendus dans l'étude des comportements dynamiques.

Ces questions sont au cœur du projet collaboratif HYGRO-BAT, financé par l'ANR dans le programme HABISOL 2010. Le programme ambitieux de notre projet est porté par un consortium composé de sept laboratoires universitaires reconnus (LOCIE, CETHIL, LERMAB, LASIE, LMDC, LGPM, TREFLE), de trois centres type EPIC (CEA-INES, CRITT-Bois, CSTB) et de trois industriels (EDF R&D, LIGNATEC, NR GAÏA).

Pour bien comprendre les différents phénomènes l'étude part de la caractérisation hygrothermique des matériaux, par l'analyse des assemblages simples sous des sollicitations dynamiques maîtrisées sur des bancs expérimentaux académiques, jusqu'aux sollicitations en climat réel sur des cellules-test extérieures. Les simulations numériques en régime dynamique sont associées aux études expérimentales. Il faut souligner que des nombreux « benchmarks », non seulement numériques, mais aussi expérimentaux, sont mis en œuvre dans le projet. Le présent article décrit la démarche du projet et l'illustre sur les premiers résultats obtenus.

## 2. CHOIX ET CARACTERISATION DES MATERIAUX

La première étape importante a été d'identifier les matériaux les plus pertinents à tester, respectant le cahier de charges du projet (matériaux de construction, très hygroscopiques, adaptés aux benchmarks et aux tests expérimentaux croisés...). Finalement les matériaux retenus sont les suivants :

- Bois d'épicéa avec cernes étroites (arbre ayant poussé en altitude dans les Vosges),
- Bois d'épicéa avec cernes larges (arbre ayant poussé dans la plaine des Vosges),
- Panneaux isolant de fibres de bois, nouvelle génération (procédé inspiré de la production du MdF) permettant d'avoir une homogénéité du matériau sur l'épaisseur),
- Panneaux de bois de type OSB « Oriented Strand board » provenant du même batch de production,
- Enduit extérieur, applicable directement sur la fibre de bois et mis en œuvre sur les cellules expérimentales en extérieur.

L'objectif général est de proposer une procédure de caractérisation expérimentale des propriétés hygrothermiques des matériaux de construction utilisés dans les enveloppes des bâtiments. Plusieurs

approches expérimentales ont été mises en place et notamment celles de la caractérisation des principales propriétés microstructurales, thermophysiques, hydriques et celles relatives aux propriétés de rétention d'eau (Abhari et al, 2012, Vololonirina et al, 2012, Pierre et al, 2013). Il est à noter que la grande partie des caractérisations a été effectuée en utilisant au moins deux techniques différentes, ou bien deux laboratoires partenaires.

Par exemple, les isothermes de sorption et de désorption ainsi que les courbes d'hystérésis ont été déterminées moyennant l'utilisation de différentes techniques de mesures. En plus de la méthode gravimétrique traditionnelle basée sur l'utilisation de solutions salines saturées (ISO - 12571, 2000), d'autres méthodes dynamiques permettant de réduire considérablement le temps d'essai ont été utilisées. Parmi celles-ci, on peut, notamment, citer le DVS (Dynamic Vapor Sorption) et le VSA (Vapor Sorption Analyzer) qui ont permis de réduire le temps d'essai tout en maintenant le même degré de précision (figure 1).

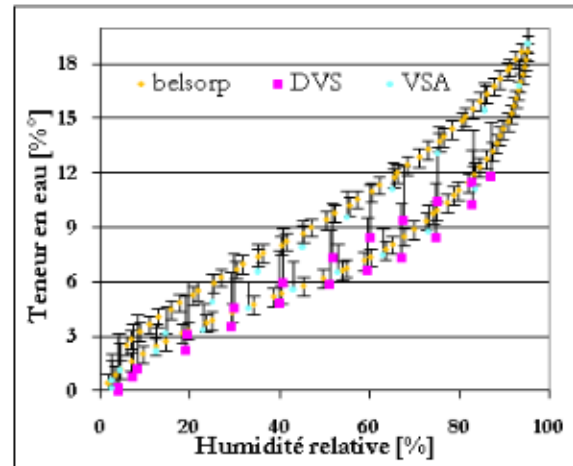


Figure 1. Isothermes de sorption-désorption de l'isolant de fibre en bois à 20°C, obtenues par différentes méthodes au LASIE

Les résultats obtenus montrent, généralement, peu d'effet de la taille des échantillons sur la détermination des isothermes de sorption-désorption. Néanmoins, il a été mis en évidence l'incompatibilité des techniques dynamiques pour l'évaluation de cette propriété, en dehors de la zone hygroscopique, particulièrement pour la technique DVS qui ne permet pas de mesurer les teneurs en eau pour des plages supérieures à 90% en hygrométrie. De plus, la méthode gravimétrique demeure la méthode la plus fiable vu le respect de la représentativité des échantillons. Pour pallier à cette difficulté, il a été recouru aux mesures des courbes de rétention d'eau moyennant l'utilisation d'un extracteur à membrane qui permet de compléter la courbe de sorption-désorption dans la zone de saturation. Contrairement à ce qu'a été obtenu avec les isothermes de sorption-désorption, le degré d'hygroscopicité des matériaux testés lors de la rétention est différent. La teneur en eau maximale n'est pas toujours obtenue par l'OSB. Lorsqu'il s'agit de la saturation et du transport liquide c'est l'isolant de fibre en bois qui absorbe une quantité plus importante d'eau que l'OSB. Ce résultat vient confirmer que l'isotherme de sorption-désorption toute seule n'est pas suffisante pour décrire le comportement hydrique des matériaux poreux.

D'une manière générale, les résultats montrent que les propriétés hygrothermiques mesurées sont fortement dépendantes de l'état hygrothermique des matériaux. Cette dépendance a été essentiellement observée pour les résultats de perméabilité à la vapeur et la conductivité thermique. Ce qui nécessite la prise en compte de la non-linéarité des paramètres thermophysiques dans les modèles de transferts.

Les résultats obtenus par différents partenaires sont analysés et comparés. L'ensemble des grandeurs déterminées dans cette tâche permet d'enrichir les bases de données quant aux caractéristiques intrinsèques des matériaux et est utilisé comme données d'entrées des modèles de



prédiction des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans les matériaux poreux et à l'interface enveloppe-ambiance des bâtiments.

### 3. ETUDE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES PAROIS AVEC DES CONDITIONS AUX LIMITES MAITRISEES

Des études expérimentales sur le comportement hygrothermique de quatre échantillons de parois soumises à des sollicitations dynamiques bien maîtrisés ont été réalisées au LERMAB et au CETHIL à l'aide des dispositifs type double enceinte climatique (cf. figure 2). Chacun des deux caissons permet une régulation en température et en humidité. Différents capteurs sont également utilisés pour suivre l'évolution temporelle de grandeurs comme la température, l'humidité relative de l'air et dans la paroi, etc.

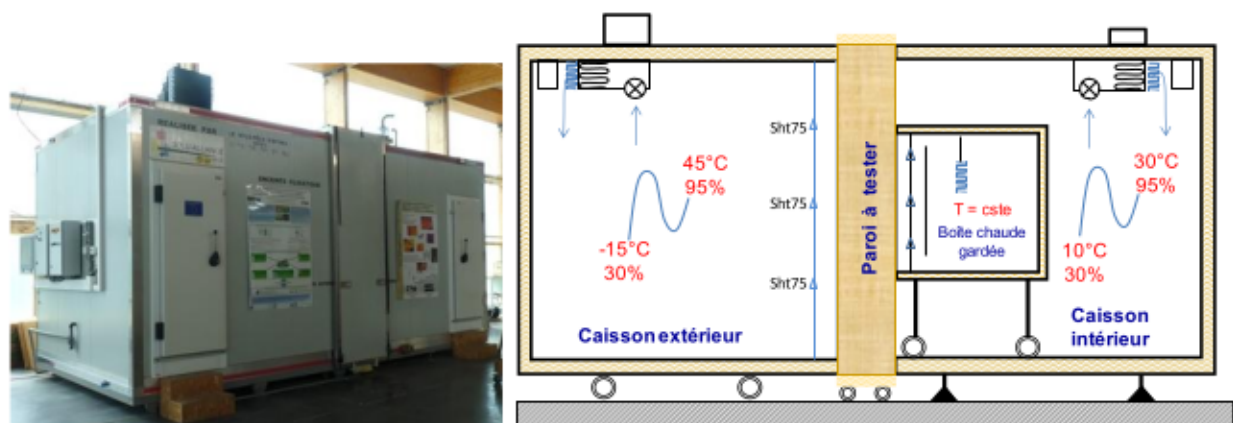


Figure 2. Photo et schéma de principe de la double enceinte climatique du LERMAB

Dans l'ensemble série d'essais, nous avons choisi des compositions de parois de complexités croissantes afin de permettre une analyse plus détaillée et plus facile de la dynamique des transferts couplés de chaleur et de masse dans une paroi multicouche. Par ailleurs, ces parois ont été construites en utilisant les matériaux dont les propriétés hygrothermiques ont été testées en laboratoire. Différentes sollicitations climatiques ont été reproduites et imposées à ces parois-test. Dans l'objectif de mieux comprendre la dynamique des transferts dans les parois et d'identifier l'influence de chaque phénomène sur les transferts, nous avons imposé des conditions aux limites entraînant une dynamique des transferts de plus en plus complexe : conditions isothermes avec un gradient d'humidité relative ; conditions de type hivernal avec des gradients de pression partielle de vapeur d'eau et de température dans le même sens et un gradient de teneur en eau en sens inverse ; puis des sollicitations extérieures oscillantes avec  $10 \pm 5^\circ\text{C}$  et  $60 \pm 20\%$  (amplitude de T :  $10^\circ\text{C}$  et HR : 40%) tout en maintenant le côté intérieur à des conditions stationnaires de  $20^\circ\text{C}$  60% HR (cf. figure 3).

Les résultats ont également permis de montrer l'importance de l'agencement des parois et le rôle des différents matériaux dans la dynamique des transferts couplés chaleur-masse. En effet, lors des conditions hivernales et oscillantes où le sens du flux de vapeur d'eau était de l'intérieur vers l'extérieur, des comportements très différents ont été observés entre les parois 3 et 4 qui possèdent des résistances thermiques proches mais avec des valeurs de résistances au transfert d'humidité très différentes.

Si nous prenons comme exemple les résultats obtenus en conditions oscillantes et illustrés sur la figure 3, nous pouvons voir que pour la paroi 3, l'enduit du côté extérieur a freiné la diffusion de la vapeur vers l'extérieur, entraînant une accumulation progressive d'humidité dans la couche d'isolant proche de l'enduit. La paroi 3 n'a toujours pas atteint un état d'équilibre hydrique au bout de 21 jours et l'humidité relative à l'interface enduit/isolant est montée à 80%. Pour la paroi 4, c'est l'OSB côté intérieur qui freine la diffusion d'humidité à l'intérieur de la paroi. On observe alors dans ce cas une redistribution de l'humidité dans la paroi avec les couches intérieures qui s'assèchent et une absence d'accumulation d'humidité dans les couches proches de l'enduit.

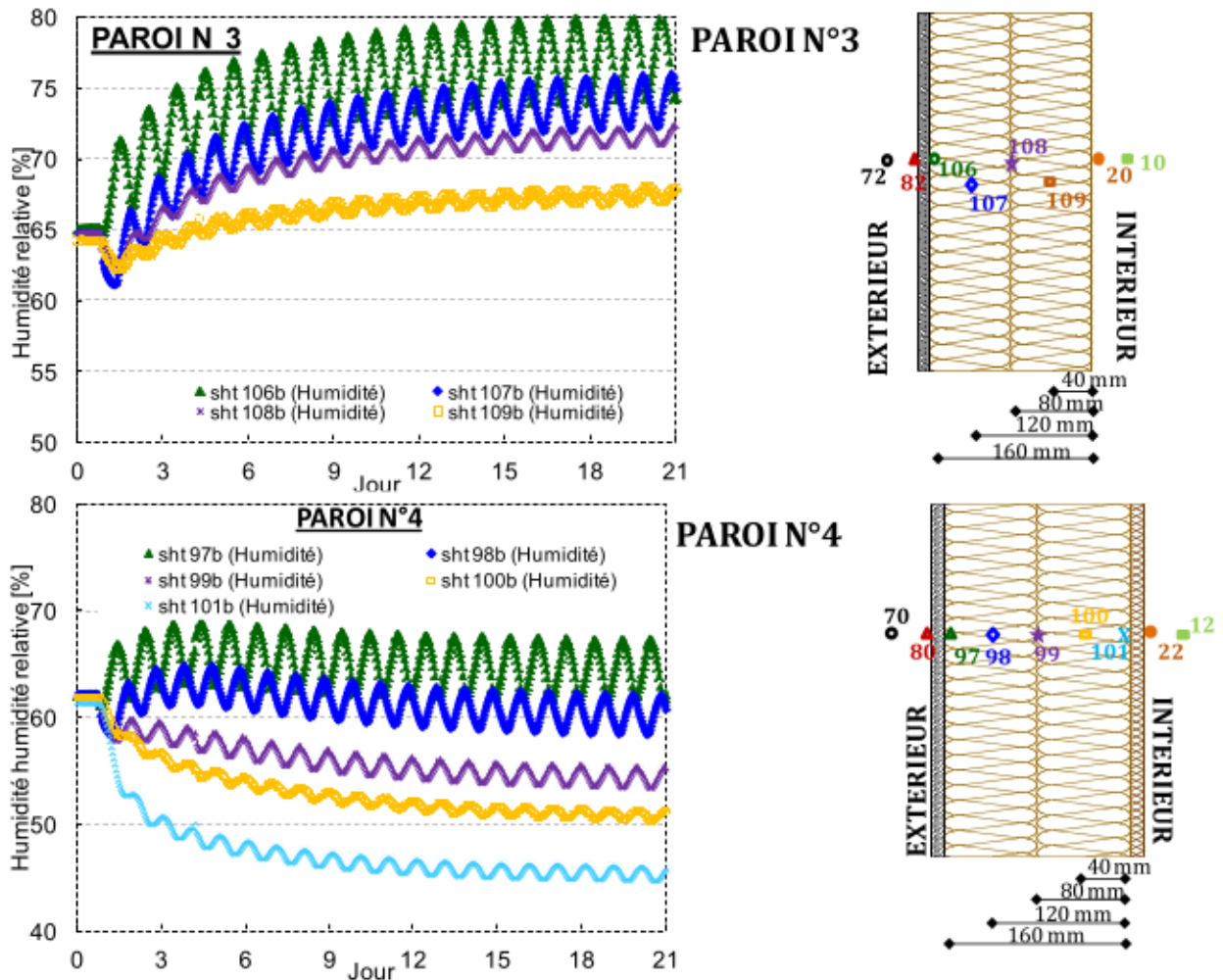


Figure 3. Evolution temporelle des profils de température et d'humidité relative de l'air dans les parois avec la fibre de bois seule (N° 2), protégé par l'enduit extérieur (N°3) et protégé par l'enduit extérieur et OSB (N°4), soumise à des conditions climatiques oscillantes.

Notons que des mesures préliminaires ont été effectuées pour qualifier la réactivité et la précision de mesure des thermo-hygromètres utilisés dans ces essais. Ceci, associé au fait que les mesures ont été effectuées chez deux partenaires du projet, sur deux bancs différents, nous permet de postuler l'excellente qualité des résultats expérimentaux obtenus.



#### 4. EVALUATION DES PERFORMANCES HYGROTHERMIQUES EN CLIMAT REEL

Afin de suivre le comportement des parois en conditions climatiques extérieures réelles, deux dispositifs expérimentaux ont été développés : une cellule expérimentale dénommée module-test au LERMAB et deux parois-tests sur les cellules PASSYS à l'INES (CEA, LOCIE). Une métrologie complète (température, humidité, dans l'air et dans les parois, pression différentielle, vitesse d'air, production d'humidité, consommation d'énergie, météo) y est installée afin de permettre le suivi du comportement hygrothermique des parois verticales (Kedowidé et al. 2014). La composition de ces parois est identique sur les deux sites et s'inscrit dans la démarche globale du projet : d'abord la composition la plus académique réalisable (paroi n°3 de la figure 3) puis une complexification par ajout d'une couche peu perméable et très hygroscopique (paroi n°4).

L'extérieur des parois est soumis au climat naturel (Epinal pour Lermab et Chambéry pour Ines), et à l'intérieur différentes conditions peuvent être générées.

La figure 4 présente l'évolution des pressions partielles de vapeur et des températures lors d'une augmentation type « échelon » de l'humidité intérieure. Le 24 mai, l'augmentation de la pression partielle de vapeur côté intérieur est clairement visible. Simultanément, une augmentation de la température peut être remarquée sur la surface intérieure (0 cm) et dans les quatre premiers centimètres à l'intérieur de la paroi. Cette augmentation est clairement visible sur la figure 4 : 1°C sur la surface, 1,3°C à 4 cm. La différence entre la température de surface et celle de l'air ambiant diminue en même temps qu'augmente l'humidité relative intérieure. Cet effet des transferts de masse sur le comportement énergétique de la paroi, lié à la chaleur d'adsorption de l'eau sur le matériau très hygroscopique (fibre de bois), a été systématiquement observé. Par ailleurs, cette composition de paroi étant très perméable à la vapeur d'eau, la propagation des effets de changement des conditions aux limites est rapide. L'état d'équilibre dynamique est atteint au bout de 5 jours.

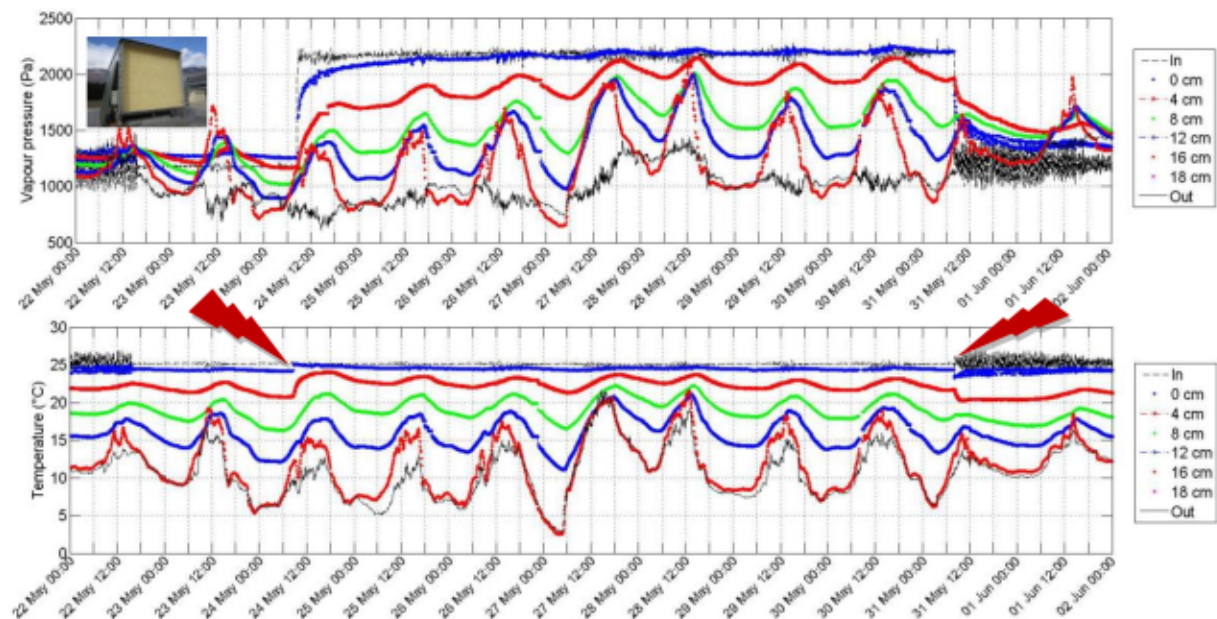


Figure 4. Evolution des pressions partielles de vapeur et des températures à différentes profondeurs dans la paroi n°3 (16cm de fibre de bois + enduit extérieur) sur la cellule Passys, soumise au climat naturel à l'extérieur et à un échelon d'humidité à l'intérieur.

## 5. COMPARAISON DES FORMULATIONS DE MODELES ET LES BENCHMARKS NUMERIQUES

La comparaison des formulations des équations de transferts couplés (Perré, 2013) dans les modèles numériques utilisées par les différentes équipes a fait l'objet de longues discussions, durant les réunions plénières et les réunions spécifiques relatives à la formulation, mais aussi par échanges de messages, de formulation d'argument et de contre-arguments.

Ces discussions ont porté sur deux points principaux :

- l'écriture de la conservation de l'énergie et la comparaison des formulations obtenues avec l'énergie interne ou avec l'enthalpie, sachant que nous travaillons généralement à pression constante,
- le choix du terme moteur pour la diffusion de l'eau liée dans les matériaux ligno-cellulosiques.

On peut dire que le consensus n'est pas encore obtenu pour le point 1), mais que le litige concerne des termes qui sont de toute façon négligeable. Le point 2) est une question débattue dans la littérature scientifique depuis plusieurs décennies et il fait objet d'une attention particulière lors des différentes benchmarks.

Afin de comparer les modèles et approches développées par les différents laboratoires, différents benchmarks numériques ont été mis en place. Le benchmark n°1 portait sur un seul matériau, le MdF. Des configurations 1 et 2D et des conditions isotherme et non isotherme ont été testées. Le matériau a été sollicité thermiquement et hygriquement de manière statique avec des conditions aux limites de type Dirichlet et Fourier. Les benchmarks suivants sont basés sur les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre du projet (cf. figure 3 et 4). Les comparaisons portent essentiellement sur les champs de température, de pression partielle de vapeur, d'humidité relative, mais aussi sur les flux thermique et massique.

On peut dire aujourd'hui que la comparaison entre les résultats des différentes simulations permet de souligner la qualité des outils numériques que nous utilisons. En effet, des résultats obtenus sont concordants, à conditions d'avoir recours à des propriétés de matériaux et les conditions aux limites formulés de manière semblable. Dans le cas des benchmarks basés sur des résultats de mesure, des écarts ont été observés entre les mesures et les simulations, et différentes hypothèses permettant d'expliquer les écarts sont actuellement en cours d'investigation.

## 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pour répondre aux objectifs ambitieux annoncés, nous avons mis en place des outils expérimentaux complexes, essentiels à l'étude de phénomènes physiques dans nos configurations. La complexité réside dans la diversité des cas de figure (un matériau homogène, des assemblages de matériaux ...), des climats (des conditions constantes, des dynamiques type échelon, des climats extérieurs), mais aussi dans le niveau élevé de fiabilité des protocoles expérimentaux et, en conséquence, des résultats obtenus. Ces derniers servent de support aux analyses approfondies conduites dans notre projet. Ils seront également disponibles pour des investigations futures.



Les résultats déjà obtenus mettent en évidence l'importance du comportement en humidité des matériaux de parement intérieur et extérieur qui conditionnent la dynamique des transferts couplés chaleur-masse dans les parois, ainsi que la dépendance des propriétés hygrothermiques matériaux de leur état hygrothermique.

La confrontation des résultats expérimentaux aux simulations numériques permet d'avancer dans la compréhension des phénomènes physiques. Elle nous a également montré que les outils de modélisation dont nous disposons, et cela malgré leur diversité, sont bien représentatifs d'une même réalité physique. Cependant, dans certaines configurations, nous avons constatés des écarts entre les mesures expérimentales et les simulations numériques. Nous sommes actuellement en train d'investiguer différentes pistes pour expliquer ces écarts. En particulier, une analyse détaillée des méthodes généralement admises de caractérisation hygrothermique des matériaux de construction est en cours. Elle a mis en évidence la difficulté de mesure de certaines caractéristiques, due, entre autres, à des phénomènes physiques très complexes, comme la diffusion non-fickienne et la perméabilité au gaz.

A la fin du projet nous espérons être en mesure de répondre à un certain nombre de questions récurrentes, posés par les acteurs du bâtiment sur le terrain, comme par exemple : pourquoi le bois massif semble avoir un impact positif sur les consommations d'énergie et le confort dans les bâtiments ? Les transferts de vapeur d'eau jouent-ils un rôle important dans cet impact ?

## 7. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été en partie financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au travers du programme Habitat intelligent et solaire photovoltaïque (projet HYGRO-BAT n° ANR-10-HABISOL-005).

## 8. BIBLIOGRAPHIE

- Abahri Kamilia, Belarbi Rafik, Aït-Mokhtar Abdelkarim, Oudjehani Nouara, Investigation expérimentale sur la réalité de l'effet de la pression totale sur le comportement hydrique des parois du bâtiment. *29ème rencontre de l'Association Universitaire de Génie Civil (AUGC)/IBPSA*, Chambéry, 6 au 8 juin 2012.
- Kedowide Yannick A. - Woloszyn Monika - Le Pierres Nolwenn. Synthèse sur les dispositifs expérimentaux d'étude des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les parois des bâtiments. Colloque International Francophone d'énergétique et mécanique, *CIFEM 2012*, Ouagadougou, (Burkina Faso)
- Kedowide Y., Piot, A., Woloszyn M., Le Pierres N., Bejat T. (2014) Experimental investigations of highly hygroscopic and vapour permeable walls exposed to real climate. To be presented at *10th Nordic Symposium on Building Physics, NSB 2014*, 15-19 June 2014, Lund, Sweden.
- Perré Patrick. The comprehensive set of equations governing heat and mass transfer in building materials. Rapport du projet HYGROBAT, Aout 2013
- Pierre Florian, Ayouz Mehdi, Perre Patrick. An original method for the determination of mass diffusion of hygroscopic materials in unsteady regime. *EuroDrying'2013*, Paris (France).
- Vololonirina Oly, Coutand. Marie, Perrin Bernard. Vers une méthode de conception HYGROthermique des BATiments performants : Propriétés de transferts des matériaux bois. *Colloque International Francophone NoMaD 2012*, LMDC / AUGC