
Suivi in situ du comportement thermohygrique d'une paroi d'une maison à énergie positive à ossature bois

Yacine Aït Oumeziane¹, Jérôme Malvestio¹, Stéphanie Armand-Decker^{1,2},
Alain Sempey¹, Laurent Mora¹

¹ Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France.

CNRS, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France.

Arts et Métiers ParisTech, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

yacine.ait-oumeziane@u-bordeaux.fr

² Nobatek-INEF4, F-64600 Anglet, France

RÉSUMÉ. Le travail présenté porte sur l'étude de la réponse thermohygrique in situ de la paroi Est d'une maison à énergie positive : Sumbiosi. Elle y est soumise aux conditions climatiques extérieures de la région bordelaise. Cette paroi est instrumentée à l'aide de thermocouples et de capteurs d'humidité. Le positionnement des capteurs permet de suivre le comportement hygrothermique de la paroi en partie courante et au niveau d'un pont thermique. L'acquisition des données expérimentales a débuté en fin d'année 2014. Les premiers résultats sont ici présentés. Les dynamiques d'évolution et les profils de température et d'humidité relative au sein de la paroi sont ainsi identifiés. Les différentes couches de matériaux à base de fibre de bois jouent leur rôle de tampon thermohygrique en limitant les fluctuations climatiques extérieures. L'exploitation de ces données permet une meilleure compréhension du comportement hygrothermique des enveloppes à ossature bois. A ce titre, la comparaison des résultats numériques et expérimentaux permet de mieux appréhender les limites de la modélisation.

....
....
....
....
....
....
....

ABSTRACT. This paper deals with the experimental hygrothermal response of energy-positive house wall: Sumbiosi. The house is subjected to exterior climatic conditions of Bordeaux. The monitoring of wall was performed using thermocouples and relative humidity sensors located in the current part and along the wooden framework. Experimental data acquisition was launched at the end of 2014. First results are presented in this paper. Temperature and relative humidity evolution dynamics and profiles through the wall are drawn. The different layers of materials composed of wood fibers play a role of hygrothermal buffer by damping exterior climatic conditions. The analysis of the results allows a better knowledge of the hygrothermal behaviour of wooden frame walls. The comparison between experimental and numerical results highlights the modelling limits.

....
....
....
....
.....

MOTS-CLÉS : maison à ossature bois, comportement hygrothermique, suivi expérimental in situ, simulation numérique
KEYWORDS : wooden-frame house, hygrothermal behaviour, in situ monitoring, numerical simulation

1. Introduction

L'utilisation du matériau bois s'inscrit dans le cadre du développement de solutions constructives innovantes visant à répondre aux enjeux environnementaux et énergétiques dans le secteur du bâtiment. L'humidité relative et la température sont deux paramètres essentiels qui conditionnent la qualité d'air et le confort intérieurs et par conséquent influent sur la consommation énergétique [WOL 06, KWI 09]. Les matériaux hygroscopiques constitutifs de l'enveloppe d'un bâtiment ayant la capacité de stocker et libérer l'humidité peuvent être utilisés pour limiter les fluctuations d'humidité et de température intérieures [OSA 06].

Cette étude porte à ce titre sur la réponse hygrothermique in situ d'une paroi d'une maison à ossature bois à énergie positive : Sumbiosi. Cette dernière a été construite en 2012 dans le cadre du concours Solar Decathlon. Issue d'une collaboration entre partenaires universitaires et industriels, elle utilise une série de technologies innovantes aussi bien pour ses systèmes énergétiques, de ventilation et son enveloppe. Les parois sont essentiellement composées de couches successives de matériaux réalisés à base de fibres de bois et d'une ossature bois contreventée par un panneau à grandes particules orientées (OSB). Après le concours, la maison a été reconstruite sur le site de l'IUT de Bordeaux. Il s'agit à la fois d'un démonstrateur et d'une plateforme expérimentale à échelle 1.

La paroi Est de cette maison, la moins soumise aux perturbations des systèmes énergétiques annexes, est instrumentée en thermocouples et capteurs d'humidité. La métrologie mise en place permet d'identifier les cinétiques et profils de température et pression de vapeur en partie courante et le long d'un pont thermique.

Confrontés aux résultats numériques issus d'un modèle de transferts de masse et de chaleur, ces données permettent de mieux appréhender le comportement hygrothermique de la paroi.

2. Etude expérimentale

2.1. Présentation de la maison Sumbiosi

Sumbiosi est un prototype d'habitation bioclimatique solaire à ossature bois. Sa conception et sa réalisation multicritères ont été guidées par les soucis de confort des occupants et de réduction de son empreinte environnementale. Suite au concours Solar Decathlon pour lequel elle était engagée, elle a été reconstruite fin 2012 début 2013 sur le site de l'IUT de Gradignan près de Bordeaux. Sumbiosi est une maison de plain-pied de surface SHON d'environ 70m² équipée d'un salon, de 2 chambres et d'une salle d'eau. La figure 1 présente une photographie prise coté Est de la maison et une vue schématique isométrique.



Figure 1. Photographie de Sumbiosi sur le campus de l'IUT de Bordeaux (à gauche) et vue schématique (à droite)

Dans l'optique de favoriser l'utilisation de ressources locales, les murs sont composés de couches successives de matériaux à base de fibres de bois et d'une ossature bois contreventée par un panneau à grandes particules orientées (OSB). Une large baie vitrée située au Sud équipée de volets réglables et surmontée d'une casquette constituée de panneaux photovoltaïques favorise les apports solaires pendant l'hiver et les réduit pendant l'été.

La composition du plafond associe des couches d'isolants en fibres de bois pris en sandwich entre des panneaux OSB assurant la bonne tenue de la structure. Sur la toiture, se trouvent les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques. Un système de lentilles de Fresnel concentrant le rayonnement solaire incident permet d'optimiser la production d'ECS. La toiture dispose également d'une partie végétalisée disposée coté

chambre visant à améliorer le confort thermique et acoustique. L'inclinaison de la toiture assure l'évacuation des eaux de pluie.

Le plancher est constitué de couches successives d'isolants à base de fibres de bois surmontées d'une dalle en béton d'environ 7 cm d'épaisseur. Cette dernière permet de compenser la faible inertie du matériau bois. La figure 2 montre l'intérêt d'augmenter l'inertie du plancher en été ou en hiver. La ventilation naturelle est également favorisée. Cette circulation d'air participe au confort des occupants notamment en période estivale.

De plus, un échangeur de chaleur à base de matériau à changement de phase permet d'augmenter l'inertie du bâtiment. Le stockage pendant la journée de la chaleur sous forme latente permet de rafraîchir l'habitation. Cette chaleur stockée est alors libérée la nuit. Enfin, un système domotique permet à la maison d'être contrôlée dans le but d'optimiser la qualité de confort hygrothermique.



Figure 2. Stratégies de ventilation et de chauffage pendant la journée en été (en haut) et en hiver (en bas)

2.2. Composition de la paroi

La paroi étudiée dans ce papier est la paroi Est. La figure 3 montre les montants d'ossature de cette paroi. La figure 4 présente les différentes couches de matériaux disposées entre montants.



Figure 3. Montants d'ossature

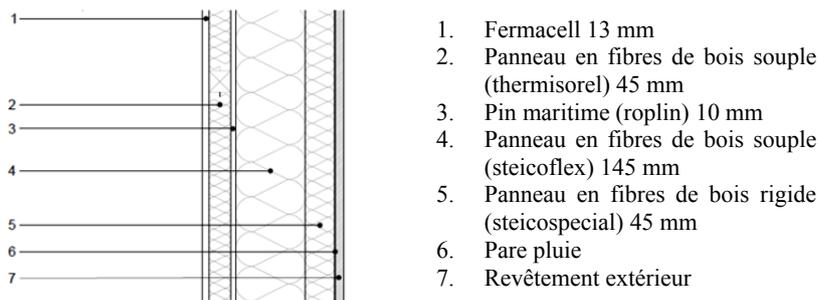


Figure 4. Composition de la paroi

Les plaques de fermacell sont constituées de plâtre et de fibres de cellulose issues du recyclage du papier. Il s'agit de la partie visible de l'enveloppe intérieure. Les panneaux de thermisorel (steicothermisorel), de steicoflex et de steicospecial sont réalisés à base de fibres de bois. Ils sont fabriqués dans une usine située en Aquitaine : Steico. Thermisorel et steicoflex ont pour fonction d'assurer l'isolation de la paroi. La couche de steicospecial est disposée de manière à réduire les déperditions au niveau du pont thermique créée par l'ossature en bois (cf. figure3). Le panneau à grandes particules orientées Roplin en pin maritime assure la fonction de contreventement. Les propriétés hygrothermiques présentées tableau 1 sont des données fabricant déterminées sous conditions standards de température et d'humidité relative.

De masses volumiques relativement faibles comprises entre 50 et 240 kg.m⁻³, les isolants à base de fibre de bois possèdent également un coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ (<5) et une conductivité thermique λ (autour de 0,04 W.m⁻¹.K⁻¹) faibles. Ce sont ainsi de très bons isolants thermiques ouverts à la diffusion de la vapeur d'eau. A contrario, le pin maritime, plus dense, restreint fortement la diffusion de la vapeur en raison d'un coefficient de résistance à la diffusion largement plus élevé (200 à l'état sec et 70 à l'état humide). Il possède toutefois une conductivité thermique assez faible (0,13 W.m⁻¹.K⁻¹).

| | ρ [kg.m ⁻³] | C_p [J.K ⁻¹ .kg ⁻¹] | λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | μ [-] | μ^* [-] |
|----------------------|------------------------------|--|---|-----------|-------------|
| Fermacell | 1150 | 1100 | 0,32 | 13 | |
| Thermisorel | 160 | 1200 ¹ | 0,039 | 5 | |
| Roplin | 585 | 1600 | 0,13 | 200 | 70 |
| Steicoflex | 50 | 2100 | 0,04 | 1,5 | |
| Steicospecial | 240 | 2100 | 0,046 | 5 | |

Tableau 1. Propriétés hygrothermiques des différents matériaux

2.3. Métrologie mise en place

L'intérieur de la maison est équipé d'une série de capteurs disposés dans chaque pièce permettant d'accéder à l'humidité relative, à la température ou encore au taux de CO₂ ambiant. De même, une station météo placée en toiture relève les données climatiques extérieures. Elle dispose de capteurs de température, d'éclairement, de vitesse de vent et de pluie. Une interface numérique dédiée permet de récupérer l'ensemble de ces données. La station météo ne permet cependant pas de déterminer l'humidité relative extérieure. Ainsi, les valeurs d'humidité relative extérieure présentées dans ce papier sont celles issues de la station météo de Mérignac située à environ 9 kilomètres à vol d'oiseau de Sumbiosi.

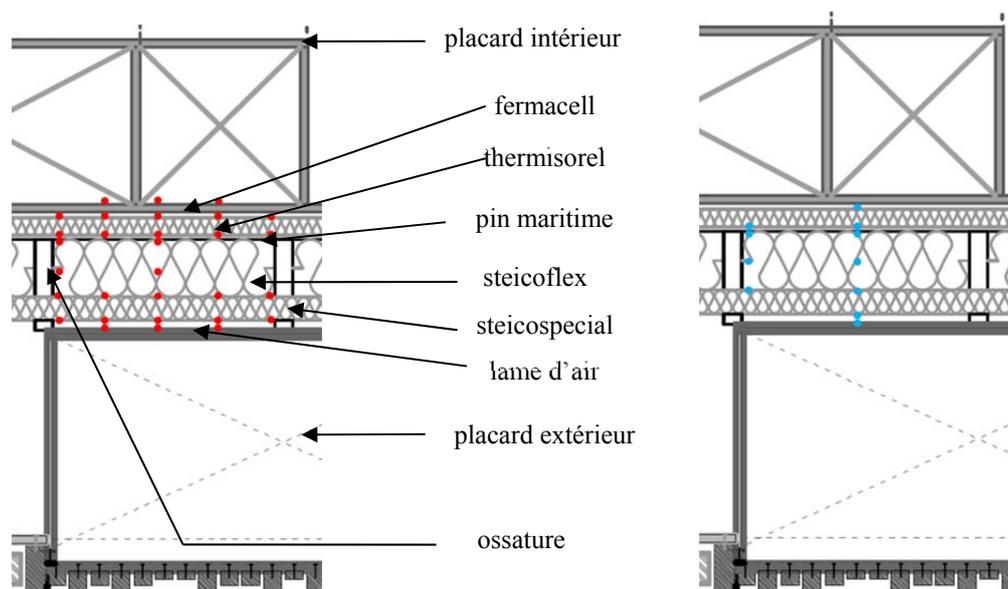


Figure 5. Métrologie de la paroi : positionnement des thermocouples (à gauche) et de capteurs d'humidité (à droite)

La métrologie mis en place a pour objectif de mesurer la réponse de la paroi aux sollicitations climatiques environnantes. L'évolution de la température est suivi à l'aide de thermocouples de type K de précision $\pm 1.5^\circ\text{C}$. Ils ont été préalablement vérifiés en chambre climatique sous sollicitations dynamiques entre 10 et 45°C. Les capteurs d'humidité utilisés pour mesurer l'évolution de l'humidité relative à l'intérieur de la paroi sont des HIH-4000 Series. Leur précision est de $\pm 3,5\%$ HR à 25°C entre 0 et 100%HR.

La figure 5 représente la position des thermocouples et des capteurs d'humidité au sein de la paroi. Ils sont placés en partie courante et le long du pont thermique formé par l'ossature. Ils ont été disposés au moment de la réalisation de la paroi ne nécessitant ainsi pas de trous de perçage susceptibles de perturber les transferts hygrothermiques. Ils se trouvent à l'interface entre chaque couche de matériau. La couche de steicoflex est en réalité composée de deux panneaux identiques, ce qui explique la présence de capteurs en son centre. Il est à

¹ Le fabricant fournit une valeur de 2100 J.K⁻¹.kg⁻¹. Cette valeur est cependant largement surestimée [Kae 2009].

noter que deux placards situés de part et d'autre de la paroi viennent amortir les variations climatiques. Visible sur le schéma de la figure 5, une lame d'air de quelques centimètres est présente entre la couche de steicospecial et le placard extérieur. Enfin, l'acquisition des données expérimentales est réalisée via une interface Labview qui stocke les résultats fournis par chaque capteur avec un pas de temps de 10 minutes. Il est à noter qu'une certaine incertitude demeure sur la position effective des capteurs directement tributaires de la mise en place des différentes couches de matériaux.

3. Résultats expérimentaux

3.1. Séquence d'étude et niveau des ambiances

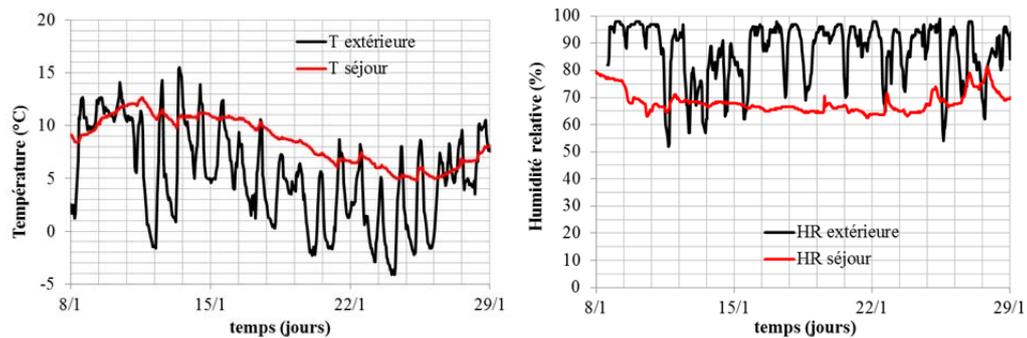


Figure 6. Evolutions des températures (à gauche) et des humidités relatives (à droite)

Une séquence en particulier est étudiée et présentée dans cet article. Elle dure 4 semaines entre le 8 janvier et le 29 janvier 2015. Les évolutions de température et d'humidité relative extérieures et intérieures sont présentées figure 6. Seules les données des capteurs installés dans le séjour sont présentées. Une bonne homogénéité a toutefois été observée pour l'ensemble des capteurs. Durant la campagne de mesures, le bâtiment était inoccupé et les systèmes de chauffage à l'arrêt. L'ambiance intérieure est ainsi directement dépendante des conditions extérieures et de la capacité isolante de la maison. La figure 6 montre un fort amortissement des variations extérieures de température et d'humidité relative sur la période considérée.

3.2. Comportement hygrothermique de la paroi

L'acquisition des données expérimentales au sein de la paroi a débuté en décembre 2014. Les premiers résultats sont ici présentés. Tout d'abord, les données relevées ont montré une saturation de l'humidité pour les deux capteurs situés dans la lame d'air entre le steicospecial et le placard extérieur. En effet, sous des conditions hygrothermiques particulières, l'air humide a pu se condenser au niveau de ces capteurs et le fait que cette lame d'air ne soit pas ventilée n'a pas permis de les sécher. Les autres capteurs sont protégés par un pare-pluie et donc à l'abri des infiltrations d'eau liquide depuis l'extérieur.

La figure 7 compare l'évolution au cours du temps de la température et de la pression de vapeur en partie courante et le long de l'ossature. Le choix d'adopter une représentation en pression de vapeur se justifie par le fait que les gradients de pression de vapeur constituent le moteur du transfert vapeur. Par soucis de lisibilité, tous les points de mesure ne sont pas représentés. Les figure 7 a) et 7 b) représentent respectivement l'évolution de la température et de la pression de vapeur en partie courante et les figures 7 c) et 7 d) le long de l'ossature. Si l'on s'intéresse dans un premier temps aux évolutions de température, on peut s'apercevoir que le pont thermique du à l'ossature en bois n'a que peu d'influence. Les évolutions de température en partie courante (figure 7 a) et le long de l'ossature (figure 7 c) sont en effet globalement très proches. Toutefois, afin de conclure sur l'impact global du pont thermique sur les transferts thermohydrriques, des mesures complémentaires au droit de l'ossature sont à envisager. En outre, la comparaison de l'évolution de la température au sein de la lame d'air et de la température extérieure sur les figures 7 a) et 7 c) montre que le placard extérieur, rempli de matériel technique, joue un rôle de tampon hygrothermique puisqu'il atténue significativement les fluctuations extérieures.

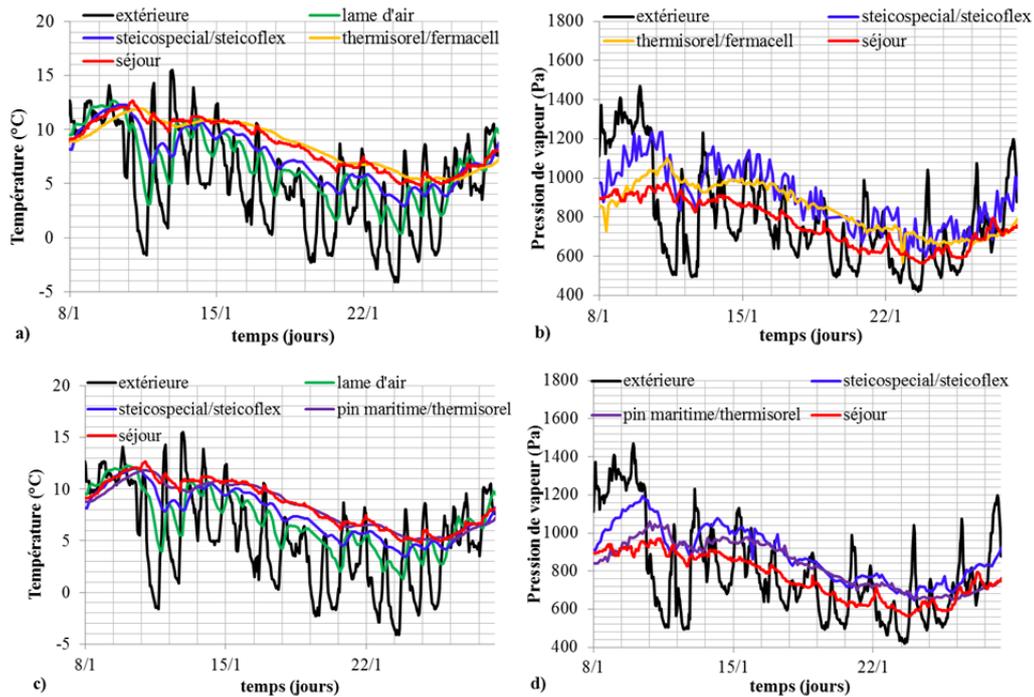


Figure 7. Evolution de la température a) et de la pression de vapeur b) en partie courante et de la température c) et de la pression de vapeur d) le long de l'ossature

La couche de steicospecial qui succède à la lame d'air atténue également ces fluctuations mais les dynamiques extérieures sont toujours clairement visibles. C'est la couche de steicoflex de 145 mm qui atténue et lisse fortement l'évolution de la température. Ainsi, les évolutions de température au-delà de cette couche sont très proches de celle de la température intérieure.

On observe figures 7 b) et 7 d) que le gradient de pression de vapeur extérieur/intérieur est alternativement positif et négatif ce qui laisserait penser que le flux de vapeur est dirigé alternativement de l'extérieur vers l'intérieur et de l'intérieur vers l'extérieur. Des tendances similaires à l'intérieur de la paroi sont également observées. Que ce soit en partie courante ou le long de l'ossature, les pressions de vapeur à l'intérieur du mur demeurent par moment supérieures aux pressions de vapeur des ambiances. Il est ainsi légitime de penser qu'en plus de la diffusion de vapeur, se produit un phénomène d'évapo-condensation de l'eau adsorbée au sein des matériaux.

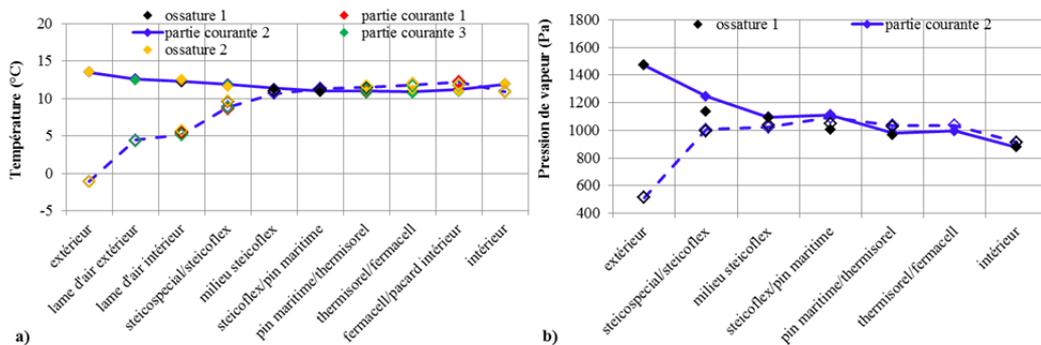


Figure 8. Profils de températures a) et de pressions de vapeur b) le 10 janvier à 14h00 (trait plein et marqueurs pleins) et le 12 janvier à 4h00 (trait pointillé et marqueurs vides)

Les figures 8 a) et 8b) qui représentent respectivement les profils de température et de pression de vapeur au travers de la paroi viennent confirmer ces observations. Ils ont été réalisés à deux instants : le 10 janvier à 14h00 et le 12 janvier à 4h00. A ces deux instants, les conditions hygrothermiques intérieures sont relativement similaires et les humidités relatives extérieures également. En revanche, la température extérieure le 10 janvier à 14h00 est de 13,5°C tandis que le 12 janvier à 4h00, elle est de -1,1°C.

Tout d'abord, il est à noter que l'allure des profils est indépendante de la position dans la paroi ce qui confirme l'influence limitée de l'ossature sur les transferts hygrothermiques transversaux. Ces figures montrent également le rôle prédominant joué par la couche de steicoflex de tampon hygrothermique. Elle assure la relative stabilité de la température et de l'humidité relative intérieures. A l'inverse, le contreventement réalisé en contreplaqué de pin maritime a tendance à couper la diffusion de vapeur.

4. Résultats numériques

Un modèle monodimensionnel multicouches basé sur la conservation des équations d'air, de masse et chaleur est utilisé [AIT 13]. Il est décrit en version simplifiée par les équations (1) et (2) sans transferts liquides.

$$\xi_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla [\delta_p \nabla (\varphi p_{sat})] \quad [1]$$

$$\rho_0 c^* \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla [\lambda \nabla T + (l_v + c_v (T - T_{ref})) \delta_p \nabla (\varphi p_{sat})] \quad [2]$$

ξ_{φ} [kg.m⁻³] représente la capacité hydrique $\xi_{\varphi} = \rho_0 \cdot du/d\varphi$ avec u [kg/kg] la teneur en eau et ρ_0 [kg.m⁻³] la masse volumique du matériau à l'état sec. δ_p [kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹] désigne la perméabilité à la vapeur du matériau, p_{sat} [Pa] la pression de vapeur saturante, T_{ref} [K] la température de référence (égale à 293,15 K), c_v [J.kg⁻¹.K⁻¹] la capacité thermique spécifique de la vapeur d'eau, c^* [J.kg⁻¹.K⁻¹] la capacité thermique spécifique du matériau humide, λ [W.m⁻¹.K⁻¹] la conductivité thermique et l_v la chaleur latente (2.45.10⁶ J.kg⁻¹ à la température de référence).

Le système d'équations différentielles instationnaires fortement couplées obtenu est implémenté sous Matlab par une méthode des différences finies. Le modèle ainsi développé est validé [AIT 13] par confrontation avec les modèles numériques issus d'un benchmark international HAMSTAD WP2 [HAG 04]. Cette validation a mis en évidence la capacité du modèle à décrire les transferts aux travers de nombreuses configurations (multicouches, pluie, circulation d'air...) typiques du génie civil.

Cependant, les données fournies par les fabricants sur les propriétés hygrothermiques des différents matériaux sont limitées. Elles ne rendent notamment pas compte de la dépendance des propriétés hygrothermiques à la teneur en eau. Les isothermes de sorption des différents matériaux sont issues de la littérature. Le fermacell est assimilé à du gypse dont l'isotherme de sorption est donné par [STE 09]. L'isotherme de sorption du pin maritime provient des travaux de [PIT 96]. Enfin, les isothermes du steicospecial et du steicoflex sont admises identiques à celle du thermisorel fournie dans [KAE 09].

La complexité de la géométrie conduit à proposer une modélisation simplifiée. En effet, la présence de placards de part et d'autre de la paroi ainsi que la présence d'une lame d'air côté extérieur rendent la modélisation particulièrement ardue. Pour simplifier, on se place donc, en partie courante, entre la surface coté intérieur de fermacell et la surface coté extérieur de steicospecial. Les conditions de Dirichlet, bien que moins réalistes que les conditions de Neumann, sont adoptées : températures et humidité internes et externes sont ainsi fixées. Pour pallier aux défaillances du système de mesure (cf. partie 3.2.), l'humidité côté intérieur de la paroi est choisie égale à celle du séjour et l'humidité côté extérieur à celle de l'air extérieur. L'humidité relative initiale est fixée à 80% et la température initiale à 9°C. Ces valeurs, constantes, sont estimées en faisant une moyenne des données expérimentales initiales. Afin de comparer résultats numériques et expérimentaux, la durée de la simulation est restreinte sur une semaine du 8 au 15 janvier. Les résultats sont présentés figure 9 a) en température et 9 b) en humidité relative à chaque interface.

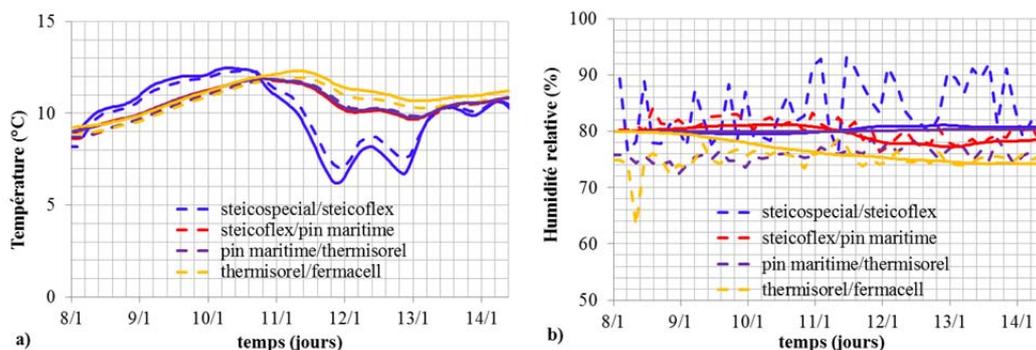


Figure 9. Evolution de la température a) et de l'humidité relative b) : résultats expérimentaux (traits pointillés) et numériques (traits pleins)

La figure 9 a) montre que les résultats numériques sont très proches des résultats expérimentaux quelle que soit la position dans le mur. En revanche, les humidités relatives simulées sont incapables de reproduire les fluctuations quotidiennes clairement visibles sur les résultats expérimentaux. Les tendances globales et les niveaux d'humidité atteints semblent toutefois respectés.

La simplicité de la modélisation est à l'origine de ces résultats. En effet, les panneaux en fibre de bois possèdent un comportement hygrothermique complexe régi notamment par le phénomène d'hystérésis. L'effet de la température sur les processus de sorption/désorption doit également jouer un rôle prépondérant. De plus, la dépendance des propriétés hygrothermiques à la teneur en eau conditionnent les flux de masse au sein de la paroi. Enfin, seul le transfert vapeur a été pris en compte alors que les niveaux d'humidité atteints laissent à penser que la diffusion d'eau sous forme liquide joue un rôle moteur sur les transferts d'humidité. Les conditions aux limites retenues qui imposent des potentiels et non des flux expliquent également en partie ces résultats.

5. Conclusion

L'étude réalisée apporte quelques éléments de compréhension de la réponse hygrothermique d'une paroi multicouches à base de fibre bois. Elle montre que la couche de steicoflex, à la fois très bon isolant thermique et ouvert à la diffusion de la vapeur assure en majeure partie la fonction de tampon hygrothermique de la paroi. A l'inverse, le contreventement en OSB a tendance à bloquer la migration de vapeur et est en ce sens contre-productif du point de vue du confort hygrothermique.

Les lacunes de la modélisation liées à une méconnaissance expérimentale du comportement hygrothermique des matériaux à base de fibre de bois justifient les divergences obtenues entre résultats expérimentaux et numériques sur l'évolution de l'humidité relative. L'évolution de la température au sein de la paroi semble toutefois bien reproduite. Une meilleure modélisation du comportement hygrothermique des différents matériaux devrait permettre d'améliorer les résultats. La campagne expérimentale doit être poursuivie notamment en imposant une ambiance intérieure plus réaliste. De plus forts gradients de température et d'humidité permettraient de davantage mettre en évidence certains phénomènes.

6. Bibliographie

- [AIT 13] AIT OUMEZIANE Y., Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre, Thèse de doctorat, Université Européenne de Bretagne – INSA Rennes, 2013.
- [HAG 04] HAGENTOFT C.E., KALAGASIDIS S., ADL-ZARRABI B., ROELS S., CARMELIET J., HENS H., GRUNEWALD J., KUNK M., BECKER R., SHAMIR D., ADAN O., BROCKEN H., KUMARAN K., DJEBBAR R., « Assessment Method for Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components: Benchmarks for One-dimensional Cases », *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol 27, n°4, 2004, p.327-352.
- [KAE 09] KAEMMERLEN A., Transfert de chaleur à travers les isolants du bâtiment, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, 2009.
- [KWI 09] KWIATKOWSKI J., WOLOSZYN M., ROUX J.J., « Modelling the hysteresis influence on mass transfer in building materials », *Building and Environment*, vol. 44, n°3, 2009, p. 633-642.
- [OSA 06] OSAYINTOLA O.F., SIMONSON C.J., « Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: experimental facilities and energy impact », *Energy and Buildings*, vol 38, 2006, p. 1270-1282.
- [PIT 96] PITTET V., Etude expérimentale des couplages mécanosorptifs dans le bois soumis à variations hygrométriques contrôlées sous chargements de longue durée, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1996.
- [STE 09] STEEMAN H.J., VAN BELLEGHEM M., JANSSENS A., DE PAEPE M., « Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture related damage », *Building and Environment*, vol 44, 2009, p. 2176-2184.
- [WOL 06] WOLOSZYN M.; KALAMES T., ABADIE M.O., STEEMAN M., KALAGASIDIS S., « The effect of combining relative humidity sensitive ventilation system with the moisture buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings », *Building and Environment*, vol. 44, n°3, 2006, p. 515-524.