

Mesure et modélisation des transferts hygrothermiques d'une enveloppe en béton de bois

Dalel Medjelekh^{*1-2}, Laurent Ulmet¹, Frédéric Dubois¹

¹Groupe d'Etudes des Matériaux Hétérogènes – équipe Génie Civil et Durabilité, Université de Limoges, 19300 Egletons

²Laboratoire d'Architecture Bioclimatique et d'Environnement A.B.E., Ecole d'Architecture, Université Mentouri, 25000 Constantine, Algérie

*dalel.medjelekh@etu.unilim.fr

RESUME. Dans le but de démontrer l'efficacité du béton de bois dans sa gestion des transferts hygrothermiques, une campagne de mesures a été menée sur une cellule-test, réalisée en béton de bois. Les enregistrements obtenus sont confrontés aux résultats de diverses Simulations Hygro Thermiques Dynamiques (SHTD) à l'échelle du bâtiment. Sur des échantillons du matériau, les paramètres nécessaires au modèle ont préalablement été déterminés en laboratoire. La perméabilité à la vapeur a été identifiée en confrontant la cinétique d'échange de masse lors des essais de sorption aux résultats d'un modèle de transferts couplés, développé en éléments finis sous Cast3M. Ensuite, dans une version uni-zone de ce modèle, les parois sont discrétisées par éléments finis et les conditions climatiques réelles sont appliquées sur les faces externes, alors que l'évolution thermo-hydrigue de l'ambiance est calculée. Par le biais des équations couplées considérant la chaleur de sorption, le modèle établi permet d'évaluer l'incidence des phénomènes hydriques sur le bilan énergétique de la construction.

MOTS-CLÉS : Béton de bois – transfert hygrothermique – simulation dynamique

ABSTRACT. With an aim of showing the effectiveness of wood concrete in its management of the hygrothermal transfers, a measurements campaign was carried out on a cell-test, made in wood concrete. The recordings are confronted to the results of various HygroThermal Dynamic Simulations at the building scale. On samples of material, the parameters necessary to the model have been previously determined in the laboratory. The permeability to the vapour was identified by confronting the kinetics of mass exchange during the sorption tests with the results of a coupled transfer's model, developed in finite elements under Cast3M. Then, in a one zone version of this model, the walls are discretized by finite elements and the actual weather conditions are applied on the external faces, while the thermal-hydric evolution of the ambiance is computed. By the means of the coupled equations considering the sorption heat, the established model allows to evaluate the incidence of the hydric phenomena on the energy balance of building.

KEYWORDS : Wood concrete – hygrothermal transfer – dynamic simulation.

1. INTRODUCTION

Les matériaux hygroscopiques ont récemment montré leur capacité à améliorer le confort thermique, la qualité de l'air intérieur (Simonson et al. 2002), la consommation énergétique (Hameury 2005), (Osanyintola 2006), (Woloszyn et al. 2009) et surtout la régulation de l'humidité intérieure dans les bâtiments (Padfield 1998), (Zhang et al. 2012). Cet effet régulateur d'humidité ou « tampon » hydrique des matériaux hygroscopiques a fait l'objet de nombreuses études, surtout sur les matériaux bois ou à base de bois (Kunzel et al. 2004), (Osanyintola 2006), (Evrard, De Herde 2009), (James et al.2010).

Toutefois, parmi ces matériaux, le «béton de bois», n'a fait l'objet que de peu de recherches. Pourtant on peut tirer de multiples avantages de son utilisation. Premièrement, les granulats sous forme de copeaux sont des sous-produits renouvelables. Ensuite, le matériau de construction ainsi réalisé est un béton léger, facilement industrialisé et aisément monté sur place, utilisable aussi bien en matériau de structure qu'en enveloppe. A ses propriétés de conductivité et d'inertie thermique intéressantes, il associe une bonne résistance à la compression (Becchio 2009).

La caractérisation des matériaux hygroscopiques par des approches numériques a également suscité l'intérêt des chercheurs. Il est démontré que les modèles qui ignorent l'humidité peuvent surestimer les charges maximales de conduction jusqu'à 210% et sous-estiment le flux de chaleur annuel intégré jusqu'à 59% (Mendes et al, 2003). Des écarts entre mesures et Simulations Thermiques Dynamiques (STD) ont été constatés dans différents projets de recherche (Annexes 24 (IEA, 1996) et 41 de l'Agence Internationale de l'Energie, ANR PREBAT OPTI-MOB). Les écarts les plus importants en cas de présence de matériaux hygroscopiques ont été justifiés par l'utilisation des modèles simplifiés de tampon hygroscopique sans procéder à un ajustement de paramètres (Woloszyn et al. 2008).

Parmi les modèles simplifiés utilisés dans la simulation numérique, citons celui de « la profondeur effective de la pénétration d'humidité » (EMPD) (Kerestecioglu, Gu 1989), et le modèle de la « capacitance effective » (EC), relatifs à des cycles périodiques de 24h. Tous deux prétendent que la vapeur d'eau dans la partie active de l'enveloppe du bâtiment est en équilibre avec l'humidité d'air de la pièce à tout moment. De tels modèles de tampon sont implémentés dans des codes de simulation comme TRNSYS et EnergyPlus

Dans le cas du présent travail, l'étude porte sur des échelles de temps inter-saisonniers, et il est nécessaire de développer des outils numériques complets modélisant de manière réaliste les transferts hygrothermiques dans toute l'épaisseur des parois. A cet effet, l'implantation des équations de transferts couplés en milieu hygroscopique est conduite dans un environnement d'éléments finis, dont la polyvalence permet des applications multi-échelles allant de l'échantillon du matériau jusqu'au bâtiment. Les paramètres du béton de bois devant alimenter le modèle sont préalablement identifiés par simulation de paliers de sorption réalisés en laboratoire sur des échantillons décimétriques. Les résultats du modèle à l'échelle de la zone sont ensuite comparés à ceux d'une campagne de mesure de plusieurs années, menée sur une cellule-test à Egletons (Corrèze). Les aléas climatiques extérieurs auxquels est soumise la cellule sont mesurés, et les scénarios de charges thermiques et hydriques internes sont parfaitement maîtrisés. La confrontation, qui porte sur les évolutions mesurées et calculées des températures et hygrométries internes à la zone, permet d'évaluer la robustesse du modèle, tout en mettant en évidence l'impact des chaleurs d'adsorption/désorption sur la réponse thermique du bâtiment.

2. OUTIL DE MODELISATION

2.1. EQUATIONS DE TRANSFERT COUPLE

Les équations couplées du modèle de diffusion utilisent comme potentiels la température T [K] pour les transferts thermiques et l'humidité relative H_r [$0 \leq H_r \leq 1$] pour les transferts d'humidité. Une hypothèse forte consiste à supposer qu'en tout point du matériau, l'équilibre hygroscopique est atteint, c'est-à-dire que la teneur en eau pondérale du matériau w [kg/kg] correspond au H_r de l'air humide dans le réseau de vides, conformément aux courbes isothermes de sorption. Une autre hypothèse consiste à

négliger les transferts de masse en phase liquide. La Figure 1 illustre, dans le cas unidimensionnel, l'ensemble des flux mis en jeu et présente l'établissement des deux équations de bilan.

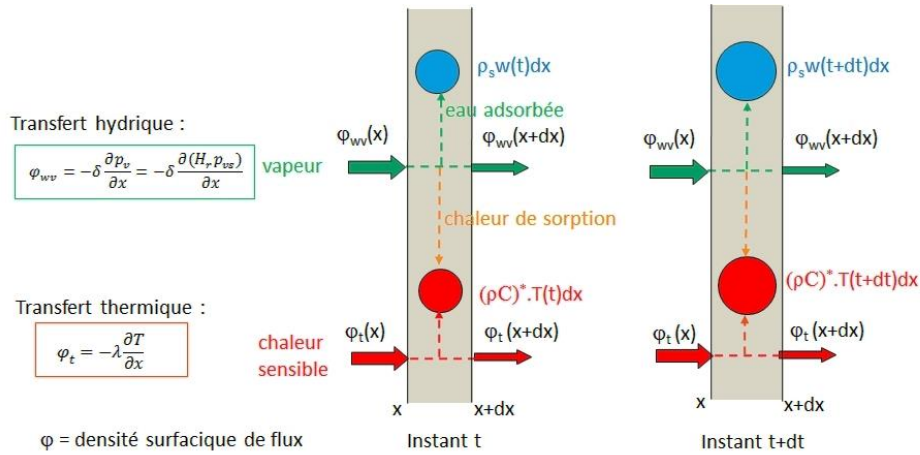


Figure 1 : Bilans thermique et hydrique sur une tranche infinitésimale de matériau, cas 1D.

Dans le cas général tridimensionnel, les équations de bilan thermique et hydrique du matériau s'écrivent respectivement :

$$(\rho C)^* \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla}(\lambda \cdot \vec{\nabla} T) + L \cdot \vec{\nabla}(\delta \cdot \vec{\nabla}(H_r \cdot p_{vs})) = \vec{\nabla}(\lambda \cdot \vec{\nabla} T) + Q_T \quad (1)$$

$$\rho_s \left(\frac{\partial w}{\partial H_r} \right) \cdot \frac{\partial H_r}{\partial t} = \vec{\nabla}(\delta \cdot p_{vs} \cdot \vec{\nabla} H_r) + \vec{\nabla}(\delta \cdot H_r \cdot \vec{\nabla} p_{vs}) = \vec{\nabla}(\delta \cdot p_{vs} \cdot \vec{\nabla} H_r) + Q_H \quad (2)$$

Dans ces équations, p_{vs} [Pa] désigne la pression de vapeur saturante qui est fonction de la température, et L la chaleur latente de sorption, que nous prendrons égale à $2500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Les propriétés du matériau nécessaires comme paramètres d'entrée du modèle sont la masse volumique anhydre ρ_s [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], et l'ensemble des coefficients suivants qui dépendent tous de la teneur en eau w : la conductivité thermique λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], la chaleur volumique du béton humide $(\rho C)^*$ [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$], la perméabilité à la vapeur δ [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$], et la capacité hydrique $\partial w / \partial H_r$ qui correspond à la pente de l'isotherme de sorption. Le terme $Q_T = L \cdot \vec{\nabla}(\delta \cdot \vec{\nabla}(H_r \cdot p_{vs}))$ correspond à la puissance thermique volumique due à la chaleur de sorption, et le terme $Q_H = \vec{\nabla}(\delta \cdot H_r \cdot \vec{\nabla} p_{vs})$ à la part du gradient de p_{vs} dans le bilan de masse (diffusion non isotherme).

2.2. IMPLANTATION DANS LE LOGICIEL CAST3M

2.2.1. Algorithme pour le traitement du couplage

Le traitement des équations couplées a nécessité des développements spécifiques dans l'environnement Eléments Finis Cast3M (Cast3M, 2014). Il s'agit d'une adaptation de la méthode implicite de thermique transitoire (Theta-méthode) aux deux modes de transferts, thermique et hydrique. La procédure « PASAPAS » habituellement utilisée en diffusion transitoire a été remplacée par des appels répétés à une procédure de résolution spécifique s'inspirant de la procédure TRANSLIN existante. Les champs $(\delta \cdot p_{vs})$ rencontrés dans l'équation hydrique (2) ont été assimilés à des champs de conductivité, et les termes Q_T et Q_H (équations 1 et 2) à des sources volumiques. L'algorithme consiste, à l'intérieur de chaque pas de temps, à faire appel alternativement à deux résolutions : une thermique, puis une hydrique. Après chaque résolution, les propriétés des matériaux, la pression de vapeur saturante, et les termes source sont réactualisés, et ces couples de résolutions thermique/hydrique s'enchaînent jusqu'à convergence des résultats. Après quoi le calcul au pas de temps suivant peut

s'enchaîner. Il est à noter que ces implantations sous Cast3M ont été accompagnées de développements identiques en différences finies 1D dans l'environnement VBA, et que la correspondance des résultats des deux codes a été validée point par point.

2.2.2. Un modèle unique pour des applications variées

Il a été choisi d'implanter cette modélisation en 3D, ce qui laisse un maximum de généralité et permet d'étudier à la fois des échantillons ou structures de forme quelconque (Figure 4), des problèmes 2D tels que des ponts thermiques linéiques ou encore des profils 1D dans des parois planes.

Une extension du modèle permet l'étude de bâtiments uni-zones. Ainsi, dans l'exemple présenté plus loin (Figure 6), chacune des parois est modélisée par un empilement de quadrilatères suivant son épaisseur. Les surfaces des différentes parois constituent également des paramètres d'entrée du modèle. Les conditions aux limites extérieures proviennent de fichiers d'enregistrements climatiques. A partir de données de rayonnement global horizontal, les flux solaires directs et diffus absorbés sur chaque paroi sont automatiquement calculés en fonction de l'orientation, de l'inclinaison, et du coefficient d'absorption. Du côté intérieur, l'évolution des conditions hygrothermiques de l'air de la zone est calculée à chaque pas de temps en fonction du bilan des flux thermique et hydrique échangés sur la surface interne des parois, et des charges internes (chauffage et humidification). Le faible volant hydrique de l'air intérieur contraint à l'utilisation de pas de temps très faibles, de l'ordre de 60 secondes, afin d'éviter la divergence de l'algorithme.

3. CARACTERISATION DES PROPRIETES DU MATERIAU

3.1. ISOTHERMES DE SORPTION

Des échantillons cylindriques ont été réalisés par carottage, aux nombres et dimensions types : 4 petits ($\phi \times h = 42 \times 38$ mm), 4 moyens ($\phi \times h = 91 \times 18$ mm), 5 gros ($\phi \times h = 91 \times 42$ mm). Partant d'un état initial indéterminé, ces échantillons ont été placés dans une enceinte climatique à température constante 20°C et soumis à une succession de paliers d'humidité relative (Figure 3). Des pesées régulières des échantillons ont permis l'obtention des paliers, et de la vitesse de prise ou de perte de masse.



Figure 2. Types d'échantillons de béton de bois, pesée et mesure de conductivité thermique

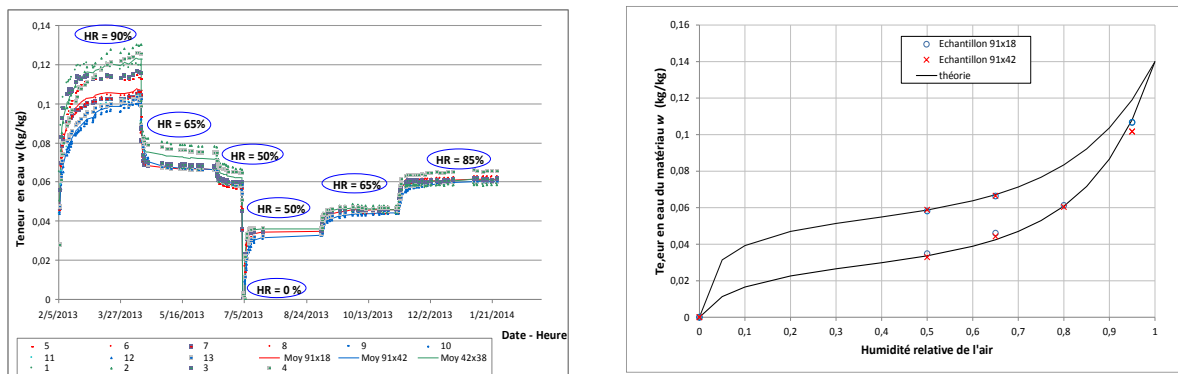


Figure 3. Synthèse des paliers (gauche) et isothermes d'adsorption et de désorption (droite)

Les équations des courbes isothermes de sorption sont de la forme (Merakeb et al, 2009) :

$$w = w_s \cdot \exp(\varphi \cdot \ln(H_r)) \cdot \exp(a \cdot H_r) \quad (3)$$

où w_s , φ et a sont des paramètres à identifier par minimisation d'écart entre points de mesure et courbes théoriques.

3.2. PERMEABILITE A LA VAPEUR

La cinétique des phases de sorption a été exploitée afin de déterminer l'évolution de la perméabilité à la vapeur δ en fonction de la teneur en eau w . Cette approche permet d'éviter d'avoir recours aux essais de perméabilité classiques de la coupelle sèche et humide et donne une information plus riche sur la loi $\delta = f(w)$ qui est ici approximée par un polynôme du deuxième degré. Ainsi, les paliers de sorption sont modélisés par éléments finis en injectant les champs locaux de δ fonction de w , et l'identification paramétrique repose sur la minimisation des écarts entre les évolutions de teneurs en eau moyennes w_m théoriques et mesurées, ceci pour les différentes tailles d'échantillons.

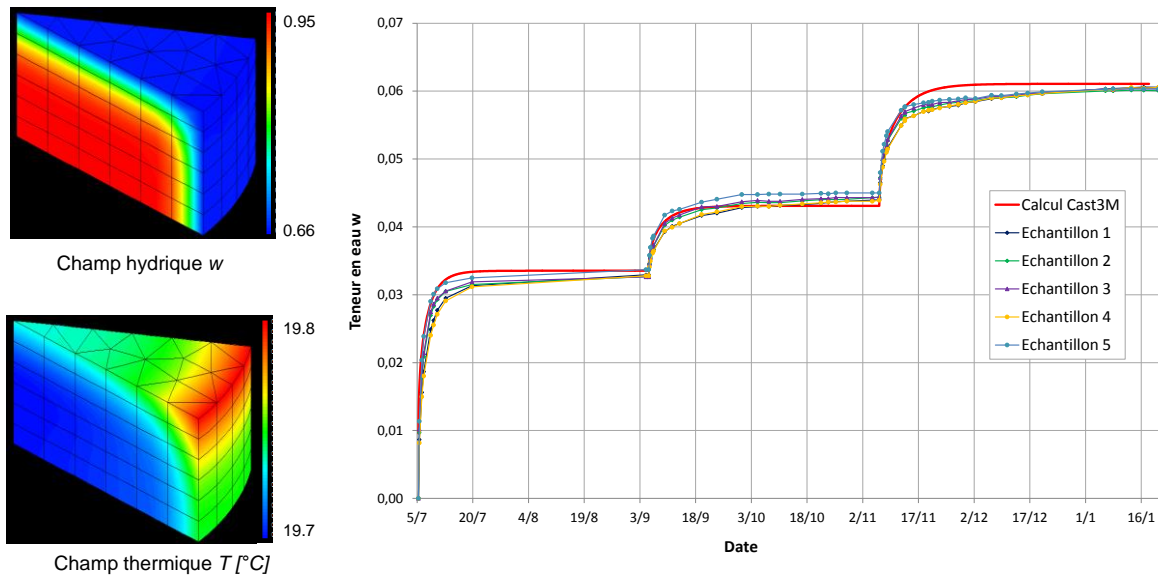


Figure 4. Modélisation des échantillons : exemple de champs lors d'une désorption, et comparaison des cinétiques calculées et mesurées après identification de δ

3.3. SYNTHÈSE DES PROPRIÉTÉS DU BÉTON DE BOIS

Les paramètres d'entrée du modèle relatifs au matériau sont résumés dans le Tableau 1. La chaleur spécifique anhydre est déduite de la composition du matériau, et la conductivité thermique a été mesurée à chaque fin de stabilisation de palier par la méthode du disque chaud (figure 2).

Masse volumique anhydre	$\rho_s = 1211 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$	
Chaleur spécifique	$(\rho C)^* = (1071 + 4180 \times w)/(1 + w) \text{ [J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}\text{]}$	
Conductivité thermique	$\lambda = 0.311 + 0.928 \times w \text{ [W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}\text{]}$	
Paramètres des isothermes de sorption	$w_s = 0.14$	Adsorption : $\varphi = 0.76, a = 1.99$
		Désorption : $\varphi = 0.45, a = 2.05$
Perméabilité à la vapeur	$\delta = 2.42 \times 10^{-11} - 8.85 \times 10^{-10}w + 1.41 \times 10^{-8}w^2 \text{ [kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}\text{]}$	

Tableau 1 : Synthèse des propriétés du béton de bois

4. CELLULE TEST ET MONITORING

Une campagne de mesures de plusieurs années a été menée sur une cellule test soumise aux aléas climatiques extérieurs. De volume intérieur 27 m^3 , elle est réalisée sur ses 7 faces par des panneaux en béton de bois de 380 mm d'épaisseur (Figure 5). Elle est construite sur vide sanitaire ventilé. La Figure 5 montre l'appareillage de mesure : thermo-hygromètres capacitifs pour les mesures des températures et humidités relatives intérieures et extérieures, sonde de rayonnement global incident sur une surface horizontale, anémomètre à coupelles, sondes de température de contact disposées sur les surfaces internes et externes du mur. Un wattmètre associé à un compteur d'impulsions a été prévu pour enregistrer la consommation d'énergie du convecteur et de tous les équipements présents dans le local. Un ventilateur de brassage permet d'éviter la stratification thermique dans l'enceinte. Les acquisitions sont espacées de 15 minutes. Des quantités de vapeur déterminées par pesée peuvent être apportées à l'ambiance interne, soit par humidification adiabatique, soit par injection directe.

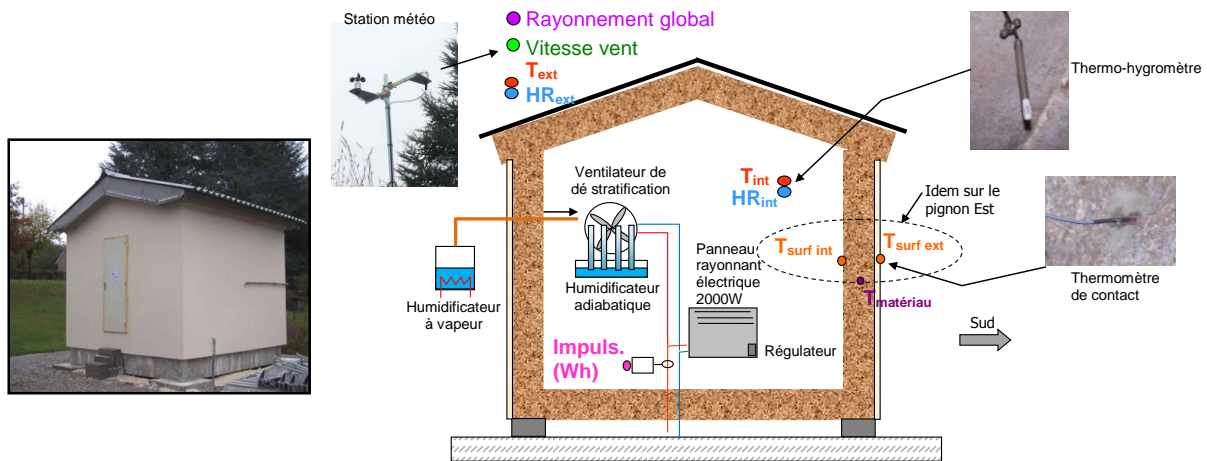


Figure 5. Cellule-test : vue extérieure et monitoring

5. RESULTATS ET DISCUSSION

La Figure 6 montre la confrontation entre modèle et mesure sur une séquence hivernale caractérisée par une période passive, suivie d'une période chauffée comportant plusieurs créneaux d'humidification adiabatique. L'augmentation de température intérieure survenue lors de la deuxième semaine de février a résulté de la décision d'augmenter l'index de réglage du régulateur en cette période très froide. La réponse en température du modèle est relativement satisfaisante. L'impact du couplage thermo-hydrigue n'est clairement visible que lors des phases d'humidification, le modèle couplé (courbe rouge) étant en meilleure adéquation avec la mesure que le modèle thermique pur (courbe noire). En revanche, les importants écarts constatés sur l'humidité relative peuvent être imputés à une migration de vapeur à travers les défauts d'étanchéité de l'enveloppe, qui ne peut être prise en compte par le modèle.

Trois séquences d'injection de vapeur quasi-identiques ont été effectuées en période estivale passive à 24h d'intervalle (Figure 7). Les réponses d'humidité relative enregistrées et modélisées montrent clairement l'effet de cumul de ces humidifications successives, avec un accroissement global de HR d'un cycle à l'autre. Le modèle sous-estime d'environ un tiers l'amplitude de HR lors d'un cycle, par rapport à la réalité, ce qui reste problématique. En revanche, cet essai met bien en évidence l'influence

de la chaleur de sorption sur la température intérieure, qui se traduit par une élévation de l'ordre de 1K à 1.4K, aussi bien par la mesure que par le modèle.

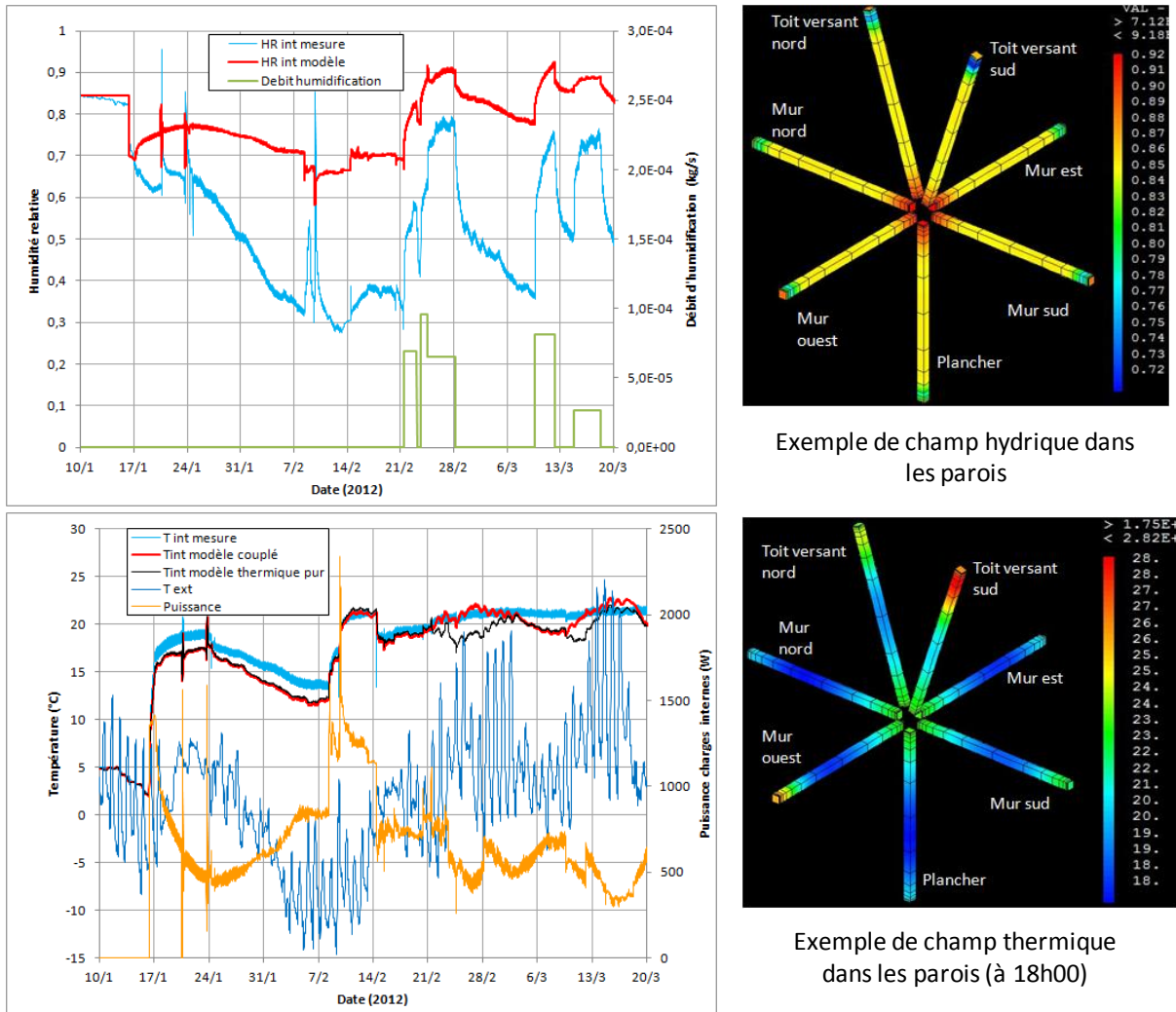


Figure 6 : Confrontation modèle-mesure, période hivernale

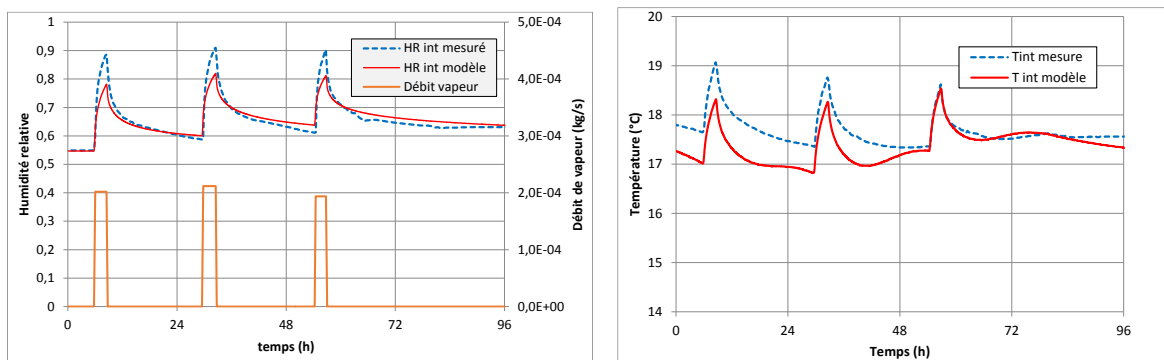


Figure 7 : Confrontation modèle-mesure, injection de vapeur, période estivale

6. CONCLUSION

Cette étude expérimentale sur une cellule test extérieure a présenté l'avantage de permettre un suivi des transferts hygrothermiques à long terme, sans mobiliser des équipements coûteux de contrôle d'ambiance. La contrepartie était le fort niveau d'exigence requis pour la SHTD qui a été développée

en éléments finis, afin de tenir compte aussi bien que possible des conditions aux limites externes imposées par le climat. Si la partie « thermique » de la modélisation donne relativement satisfaction, la partie « hydrique » est en revanche encore perfectible, avec bien sûr un impact en retour sur la thermique par le biais du couplage. Une perspective d'amélioration porte sur la prise en compte du phénomène d'hystérésis et de son impact sur les cycles partiels, qui est assez marqué dans le cas du béton de bois au vu de la grande ouverture du cycle enveloppe. Le modèle développé étant ouvert et maîtrisé par l'équipe, ces développements peuvent être envisagés à court terme.

BIBLIOGRAPHIE

- Becchio C., Corgnati S. P., Kindinis A., Pagliolico S. 2009. « Improving environmental sustainability of concrete products: Investigation on MWC thermal and mechanical properties ». *Energy and Buildings* 41: 1127-1134.
- CAST3M, 2014 [en ligne] : www-cast3m.cea.fr
- Evrard, A., De Herde A. 2009. «Hygrothermal performance of lime-hemp wall assemblies». *Journal of building physics* July 2010 34 (1):5-25doi: 10.1177/1744259109355730.
- Kerestecioglu A., Gu L. 1989. «Incorporation of the Effective Penetration Depth Theory into TRNSYS». Draft Report, Florida Solar Energy Center, Cape Canaveral, FL.
- Kunzel, H. M., Holm, A., Sedlbauer, K., Antretter, F. & ELLINGER, M. 2004. « Moisture buffering effect of interior linings made from wood or wood based products». IBP Report HTB-04/2004/e. Fraunhofer-Institute for Building Physics.
- Hameury S. 2005. Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study». *Building and Environment* 40: 1400–1412.
- James C, Simonson C. J., Talukdar P., Roels S. 2010. «Numerical and experimental data set for benchmarking hygroscopic buffering models». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53: 3638–3654.
- IEA (International Energy Agency) Annex 24 Final Report, Heat, Air, and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, vol. 1, Task1, Modelling, Belgium, 1996.
- Li, Y., Fazio P., Rao J. 2012. «An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room». *Building and Environment* 47: 205-16.
- Mendes N., Winkelmann F.C., Lamberts R., Philippi P.C. 2003. «Moisture effects on conduction loads». *Energy and Buildings* 35: 631–644
- Merakeb S, Dubois F, Petit C. 2009. « Modeling of the sorption hysteresis for wood». *Wood Science Technology* 43:575–589. DOI 10.1007/s00226-009-0249-2.
- Osanyintola O. F., Simonson C. J. 2006. «Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact». *Energy and Buildings* 38: 1270–1282.
- Padfield Tim. 1998. «The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity», Ph.D. thesis The Technical University of Denmark Department of Structural Engineering and Materials.
- Simonson C. J., Salonvaara M., Ojanen T. 2002. «The effect of structures on indoor humidity – possibility to improve comfort and perceived air quality». *Indoor Air* 12: 243–251.
- Woloszyn M., Rode C., Roux J.-J. 2008. *Synthèse sur la modélisation thermo-hygro-aéraulique des bâtiments dans l'Annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Énergie*, IBPSA France, Lyon 6-7 novembre 2008.
- Woloszyn M., Kalamees T., Abadie M.O, Steeman M., Kalagasidis A.S. 2009. «The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings». *Building and Environment* 44: 515–524.
- Zhang H., Yoshino H., Hasegawa K. 2012. «Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method». *Building and Environment* 48: 27-34.