

Influence de l'hystérésis sur le comportement hygrothermique d'un enduit de finition intérieure biosourcé

Thibaut Colinart*¹, Dylan Lelièvre¹, Patrick Glouannec¹

¹ Univ. Bretagne-Sud, EA 4250, LIMATB, F-56100 Lorient
*thibaut.colinart@univ-ubs.fr

RESUME. Dans le cadre de cette étude, on s'attache à modéliser les transferts de chaleur et de masse dans un enduit de finition intérieure biosourcé (mélange chaux/chanvre) en prenant en compte le phénomène d'hystérésis entre une phase de sorption et de désorption. Ce modèle numérique est implémenté dans Comsol Multiphysics®. Pour le valider, des mesures sont réalisées sur un échantillon instrumenté en thermocouples et hygromètres. La comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux et l'analyse de sensibilité sous-jacente permet de conclure quant à la validité du modèle et de la démarche.

MOTS-CLÉS : Transferts couplés de chaleur et d'humidité ; Mesure de température et d'humidité relative ; Inertie hygrique.

ABSTRACT. In this work, a heat and moisture transfer is developed with Comsol Multiphysics® to describe the hygrothermal behaviour within biosourced interior plaster, made here of hemp and lime. In particular, this model accounts for moisture hysteresis. In the view of validating the model, a sorption/desorption experiment is performed on an instrumented sample. Moisture content, temperature and relative humidity are monitored within the material. The comparison between the numerical and experimental data and a sensitivity analysis allow concluding on the modelling accuracy.

KEYWORDS: Heat and moisture transfer; Temperature and relative humidity measurement; hygric inertia.

1. INTRODUCTION

Dans les ambiances intérieures, le niveau d'humidité relative de l'air φ_{air} peut affecter la performance énergétique d'un bâtiment, le confort hygrothermique, la qualité de l'air intérieur ou encore la durabilité des enveloppes. Dans un habitat conventionnel, ce niveau est déterminé par le taux d'occupation et de ventilation. Si des matériaux de construction hygroscopiques sont utilisés dans l'enveloppe, les variations de φ_{air} peuvent être amorties en raison des phénomènes d'adsorption et désorption se produisant dans le matériau (Simonson et al. 2004; Yang et al. 2012, Ramos et al. 2010). Pour quantifier ce potentiel d'amortissement hydrique (ou inertie hygrique), différents protocoles et indicateurs ont été développés à l'échelle des matériaux. A titre d'exemple, on peut citer le protocole Nordtest et l'indicateur MBV (Moisture Buffer Value) (Roels et al 2006). Janssen et al (2009) en proposent une analyse pertinente et suggèrent des améliorations pour les adapter à l'échelle d'une pièce. Alternativement, d'autres études se sont plutôt focalisées sur la compréhension des transferts de chaleur et d'humidité dans les matériaux hygroscopiques et aux interfaces. Par exemple, dans le cadre de l'Annexe 41 de l'Agence Internationale pour l'Energie, Talukdar et al. (2007) et James et al. (2010) ont évalué respectivement le comportement hygrothermique (teneur en eau, température et humidité

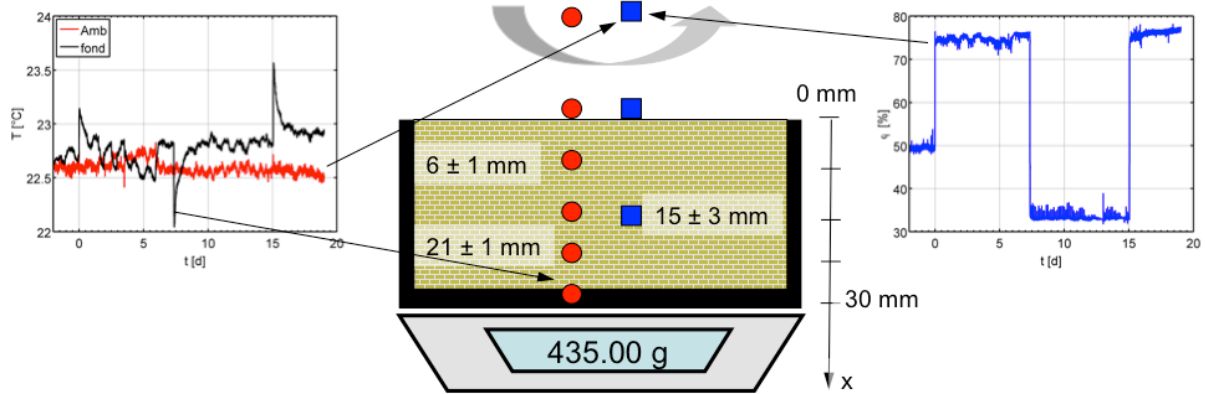
relative) de matériaux de finition en bois et de plâtre sujets à des conditions d'humidité variables dans une veine d'air. En vue de s'approcher de conditions réelles d'écoulement, Van Belleghem et al. (2011) ont étudié la réponse en température et en humidité relative d'un échantillon de silicate de calcium placé en paroi d'une enceinte climatique. Ces deux expériences servent actuellement de benchmark pour valider de nombreux modèles décrivant les transferts de chaleur et d'humidité dans les matériaux hygroscopiques du bâtiment (Kwiatkowski et al. 2009 ; Steeman et al. 2010). Ces modèles diffèrent dans la nature des phénomènes étudiés (hystérésis, transfert de liquide, etc.) ou dans la condition des conditions limites (coefficient constant vs. CFD).

Si les matériaux classiques de finition intérieure, tels que le plâtre ou les matériaux en bois, ont été abondamment étudiés dans la littérature, des matériaux naturels, comme la chaux ou la terre, sont à nouveau utilisés en tant qu'enduit de finition intérieure, notamment en raison de leur qualité environnementale. Afin d'améliorer leur propriété thermique, ils peuvent contenir des particules végétales (de chanvre par exemple). Ces enduits chaux/chanvre sont actuellement utilisés dans des parois multicouches en association avec une isolation répartie en béton de chanvre (Colinart et al. 2013). Cependant, la caractérisation de ces « nouveaux » matériaux fait défaut dans la littérature. Dans cette étude, on s'attache donc à étudier le comportement hygrothermique d'un enduit de finition intérieure à base de chaux et de chanvre. Pour cela, un modèle de transfert de chaleur et d'humidité est développé en incluant les phénomènes de changement de phase, mais aussi d'hystérésis. Les résultats numériques de ce modèle sont ensuite confrontés à des données expérimentales obtenues sur un échantillon instrumenté.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le potentiel d'amortissement hydrique d'un enduit chaux/chanvre est évalué en réalisant un essai de sorption/désorption sur un échantillon de grande surface ($130 \times 130 \text{ mm}^2$) et de 30 mm d'épaisseur. Initialement, l'échantillon est séché dans une étuve ventilée à 60 °C dans le but d'évaluer sa masse volumique sèche ρ_s , puis il est conditionné en sorption à une humidité relative de 50 %. Ce protocole permet en particulier de maîtriser l'état initial du matériau. Après stabilisation de sa masse, l'échantillon est isolé hydriquement et thermiquement sur cinq faces et instrumenté en thermocouples et capteur capacitif (Sensirion SHT 75, Steafa, Suisse) pour suivre les évolutions de température et d'humidité relative (cf. Figure 1). Leurs incertitudes de mesure et de positionnement sont estimées respectivement à 0,5 °C, 5 % et 3 mm. Pour suivre les variations de teneur en eau globale, l'échantillon est posé sur une balance (d'une précision de 0,01 g) située à l'intérieur d'une enceinte climatique (Memmert HPP 108, Schwabach, Allemagne).

L'expérience consiste alors à exposer l'échantillon à une forte humidité relative ($\varphi_{air} = 75 \%$), puis à une faible humidité relative ($\varphi_{air} = 33 \%$) et à nouveau à une forte humidité relative ($\varphi_{air} = 75 \%$). Chaque palier d'humidité relative dure au minimum 7 jours. Durant toute l'expérience, la consigne en température est maintenue constante à 23 °C. Les conditions d'ambiances évaluées par un capteur capacitif sont représentées sur la Figure 1. Du fait de la présence d'un système de ventilation, les consignes d'humidité relative sont rapidement respectées et une bonne homogénéité est assurée dans l'enceinte. Conjointement, des variations de température inférieures à 0,2 °C sont observées à chaque changement de consigne de l'humidité relative, probablement associés à des phénomènes latents. Néanmoins, la température peut être considérée comme constante.



● Thermocouple ■ Isolation hygrothermique ■ Thermohygromètre

Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental et aperçu des conditions de température et d'humidité relative dans l'air et le fond du matériau.

3. MODELISATION DES TRANSFERTS

3.1. EQUATIONS CONSTITUTIVES

Pour décrire les transferts de chaleur et d'humidité, le matériau est supposé homogène, continu et non déformable. Les effets liés à la gravité sont négligés et nous assumons l'équilibre thermodynamique local entre les phases liquide, gazeuse et solide. Enfin, la pression totale de la phase gazeuse étant prise comme constante, les deux variables d'état T et φ suffisent à décrire ce problème. L'équation de conservation de l'humidité dans le matériau s'écrit :

$$\rho_c \theta \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(-(D_l^\varphi + D_v^\varphi) \nabla \varphi - (D_l^T + D_v^T) \nabla T \right) \quad (1)$$

avec $\theta = dw/d\varphi$ la capacité de sorption. Les coefficients de diffusion vapeur D_v^φ et D_v^T sont calculés comme suit :

$$D_v^\varphi = \frac{\pi_a}{\mu_{dry}} p_v^{sat} \quad \text{et} \quad D_v^T = \frac{\pi_a}{\mu_{dry}} \varphi \frac{dp_v^{sat}}{dT} \quad (2)$$

avec π_a la perméabilité de la vapeur dans l'air ($\pi_a = 2.10^{-10} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$), μ_{dry} le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur dans le matériau et p_v^{sat} la pression de vapeur saturante.

Comme la perméabilité relative d'un milieu poreux n'est pas facilement accessible par la mesure, le coefficient de diffusion liquide D_l^φ peut alternativement être évalué par (Zakoune et al. 2013) :

$$D_l^\varphi = \theta \exp\left(p_1 + \frac{p_2}{w}\right) \quad (3)$$

avec p_1 et p_2 deux coefficients à estimer. Enfin, comme les gradients de températures sont faibles, les transferts associés de liquide peuvent être négligés et on pose $D_l^T = 0$.

L'équation de conservation de l'énergie s'écrit quant à elle sous la forme classique :

$$\overline{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) - K \left(L_v + (c_{p,v} - c_{p,l}) (T - T_{ref}) \right) \quad (4)$$

avec $\overline{\rho c_p}$ et λ la capacité et la conductivité thermique apparente et $K = \nabla \cdot (D_v^\varphi \nabla \varphi + D_v^T \nabla T)$. L_v est la chaleur latente de vaporisation ($L_v = 2500 \text{ kJ.kg}^{-1}$). Les autres paramètres prennent les valeurs suivantes : $c_{pv} = 1860 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $c_{pl} = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $T_{ref} = 273.15 \text{ K}$.

3.2. CONDITIONS AUX LIMITES

Les quatre surfaces latérales sont supposées imperméables et adiabatiques. Au fond, les transferts d'humidité sont nuls et la température est imposée. Au niveau de la surface supérieure, des conditions de convection sont imposées pour les transferts thermiques et hydriques :

$$-\lambda \nabla T - (\rho_s \nabla \cdot (D_l^\varphi \nabla \varphi + D_l^T \nabla T)) (L_v + (c_{p,v} - c_{p,l}) T) = (h_c + h_r) (T_{air} - T_{surf}) \quad (5)$$

$$\rho_s [(D_v^\varphi + D_l^\varphi) \nabla \varphi + (D_v^T + D_l^T) \nabla T] = k_m \frac{M_v}{R} \left(\frac{P_{v,air}}{T_{air}} - \frac{P_{v,surf}}{T_{surf}} \right) \quad (6)$$

Avec h_c et k_m les coefficients de transfert convectif de chaleur et d'humidité et h_r un coefficient d'échange radiatif.

3.3. PROPRIETES

Ces simulations sont appliquées à des échantillons d'enduit chaux/chanvre de masse volumique sèche de 880 kg.m^{-3} . L'ensemble des propriétés thermohydriques a été évalué au laboratoire. Les isothermes de sorption et désorption principales sont déterminées selon la norme ISO 12571 à une température de $23 \text{ }^\circ\text{C}$ (cf. Figure 2). Ces données sont modélisées par un modèle de GAB.

$$w = \frac{w_m \times C \times K \times \varphi}{(1 - K \times \varphi) (1 + K(C - 1)\varphi)} \quad (7)$$

Selon que l'ajustement se fait sur tout le domaine d'humidité (0 - 97 %) ou uniquement sur un domaine restreint (30 % - 80 %), les coefficients w_m , C et K peuvent prendre des valeurs différentes. Trois valeurs d'ajustement pour la courbe d'adsorption principale sont présentées dans le Tableau 1.

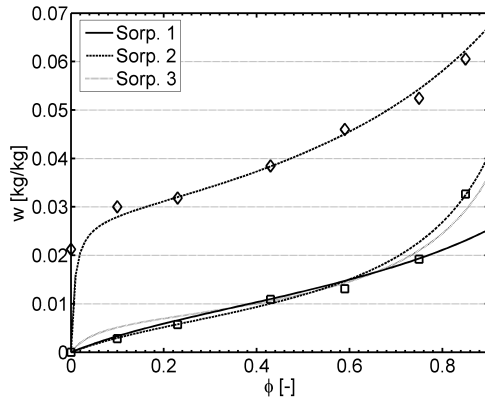


Figure 2 : Courbes d'adsorption et de désorption principales : mesures (points) et modèles (lignes).

	w_m	C	K
Sorption 1	0,012	5	0,65
Sorption 2	0,0073	30	0,85
Sorption 3	0,0081	5	0,9
Désorption	0,028	200	0,65

Tableau 1 : Valeurs des paramètres ajustés du modèle de GAB.

Pour prendre en compte le phénomène d'hystérésis, les approches empirique de Pedersen (1990) et phénoménologique de Mualem (1974) sont testées. Dans le modèle de Pedersen, les capacités hydriques de courbes intermédiaires d'adsorption et de désorption prennent la forme suivante :

$$\theta_{ad,hys} = \frac{B(w - w_{ad})^A \theta_{des} + (w - w_{des})^A \theta_{ad}}{(w_{des} - w_{ad})^A} \quad (8)$$

$$\theta_{des,hys} = \frac{(w - w_{ad})^A \theta_{des} + C(w - w_{des})^A \theta_{ad}}{(w_{des} - w_{ad})^A} \quad (9)$$

Avec A , B et C des coefficients empiriques à déterminer. Généralement, A est fixé à 2.

Dans le modèle de Mualem, la teneur en eau d'une phase de sorption ou de désorption intermédiaire s'exprime comme :

$$w_{des,hys}(\varphi) = w_j - \left(w_{ad}(\varphi_j) - w_{ad}(\varphi) \right) \frac{(w_s - w_{des}(\varphi))}{(w_s - w_{ad}(\varphi))} \quad (10)$$

$$w_{ad,hys}(\varphi) = w_i - \left(w_{ad}(\varphi_j) - w_{ad}(\varphi) \right) \frac{(w_s - w_{des}(\varphi_i))}{(w_s - w_{ad}(\varphi_i))} \quad (11)$$

avec (φ_i, w_i) et (φ_j, w_j) les valeurs minimales et maximales de l'humidité relative et de la teneur en eau dans un cycle de sorption/désorption et w_s la teneur en eau à saturation.

Les coefficients de transferts hydriques sont évalués par la méthode de la coupelle, décrite dans la norme ISO 12572. Des mesures effectuées sur une coupelle sèche (0/50 %) indiquent que $\mu_{dry} \approx 10$. Les paramètres p_1 et p_2 ont été respectivement évalués à $p_1 = -10,6$ et $p_2 = -0,7$ par technique inverse à partir de cinétique de séchage (Zaknune et al. 2013). Enfin, les propriétés thermiques ont été mesurées par microcalorimétrie et par la technique transitoire du plan chaud (Pierre et al. 2013). On trouve $c_p = 1007 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\lambda = 0,21 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. ANALYSE DE LA PHASE D'ADSORPTION ET INFLUENCE DE L'ISOTHERME

Durant les premiers jours, le matériau est en sorption « pure » : les transferts peuvent être simulés sans tenir compte du modèle d'hystérésis. En revanche, l'influence de l'isotherme d'adsorption principale est analysée en comparant les résultats numériques obtenus pour les trois ajustements du modèle de GAB aux données expérimentales (cf. Figures 3). En haut sont tracées les variations de teneur en eau moyenne, au milieu les variations de température relevées à 15 mm par le thermohygromètre et le thermocouple et en bas les variations d'humidité relative mesurées à 15 mm. Expérimentalement, un écart constant d'environ $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ est constaté entre la mesure du thermocouple et celle du thermohygromètre, mais reste cependant inférieur à l'incertitude de mesure des capteurs.

Numériquement, on observe que la teneur en eau est très sensible à la courbe d'adsorption principale et que son augmentation de teneur en eau est fidèlement reproduite à l'aide de la courbe 1. Celle-ci présente la particularité d'ajuster correctement les points expérimentaux pour des humidités inférieures à 80 %. Les variations de température mesurées par le thermocouple au sein du matériau sont bien reproduites et ne sont pas sensibles à la courbe d'adsorption. Enfin, on observe un léger décalage entre les humidités relatives mesurée et simulées à 15 mm, en particulier sur la phase transitoire. Ce phénomène, déjà observé pour d'autres matériaux, est attribué à des effets dynamiques qui remettent en cause l'hypothèse d'équilibre thermodynamique en tout point du matériau (Scheffler et al. 2011). En revanche, la valeur de l'humidité relative en régime quasi permanent est bien prédite.

4.2. ANALYSE DU CYCLAGE EN HUMIDITE ET INFLUENCE DU MODELE D'HYSTERESIS

A partir du 7^{ème} jour, la phase de désorption, suivie d'une autre phase de sorption commence : l'effet mémoire devient important et un modèle d'hystérésis est requis pour décrire les transferts.

Dans un premier temps, les simulations sont effectuées avec le modèle de Pedersen, pour lequel les paramètres B et C sont empiriquement ajustés à $B = 0,1$ et $C = 0,75$. La Figure 4 présente à nouveau

les variations globales de w et locales de T et ϕ . Globalement, on constate une bonne concordance entre les teneurs en eau simulées et expérimentales pour la phase de désorption et la seconde phase d'adsorption. Localement, la température présente des pics peu après les sollicitations que l'on peut associer à des phénomènes de changement de phase. Ces variations sont reproduites numériquement de manière satisfaisante, tant en terme d'amplitude que de déphasage.

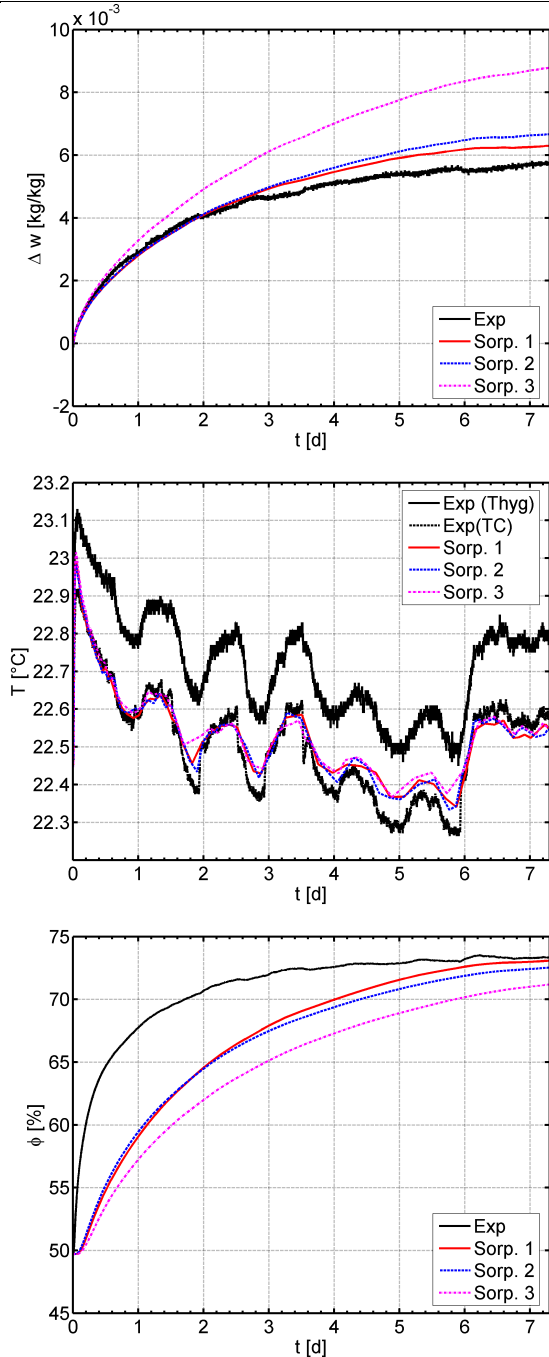


Figure 3 : Evolutions expérimentale et numérique de la variation de teneur en eau moyenne (haut), de la température à 15 mm (milieu) et de l'humidité relative à 15 mm (bas) lors de la phase d'adsorption.

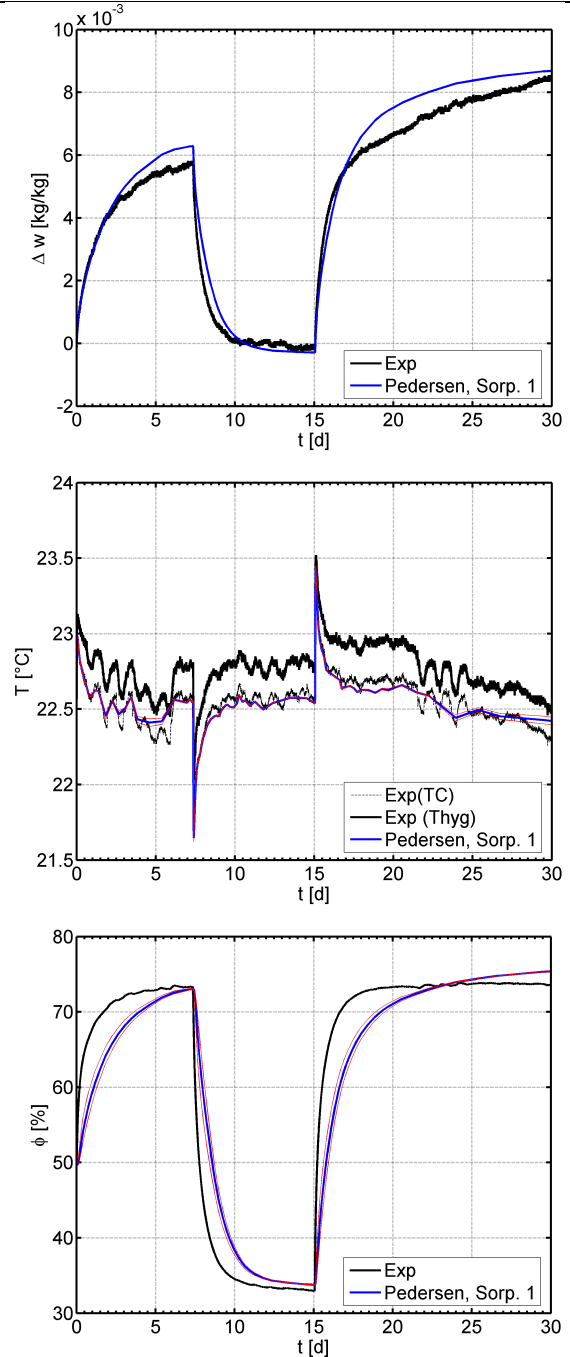


Figure 4 : Evolutions expérimentale et numérique de la variation de teneur en eau moyenne (haut), de la température à 15 mm (milieu) et de l'humidité relative à 15 mm (bas) lors du cycle complet.

Pour l'humidité relative, on observe à nouveau que le transitoire simulé est légèrement déphasé par rapport à l'expérience mais qu'on converge bien vers le même régime permanent. Pour corroborer ces observations, les résultats numériques locaux sont également extraits à 12 mm et à 18 mm (en pointillé sur les Figures 4). Comme on ne constate que peu de dispersion des températures et humidités relatives simulées, l'incertitude associée au positionnement du capteur reste donc faible.

Dans un second temps, des simulations ont été réalisées à l'aide du modèle d'hystérésis de Mualem. Contrairement au modèle de Pedersen, celui-ci ne nécessite pas d'ajuster de paramètres intrinsèques au modèle. Les résultats numériques pour la variation de teneur en eau sont présentés sur la Figure 5a. Avec l'ajustement actuel de la courbe de désorption principale, la teneur en eau est bien estimée lors de la phase de désorption. En revanche, des différences apparaissent entre les deux modèles d'hystérésis lors de la seconde phase d'adsorption. En observant les évolutions locales de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative (cf. Figure 5b), on constate que les évolutions prédites par le modèle de Mualem restent proches de la courbe de sorption principale, alors qu'on observe un effet de pompage pour le modèle de Pedersen. Cette différence notable entre les deux modèles d'hystérésis à l'échelle locale peut alors engendrer des écarts dans les comportements globaux dès lors que le nombre de cycle augmente, comme par exemple dans le protocole Nordtest.

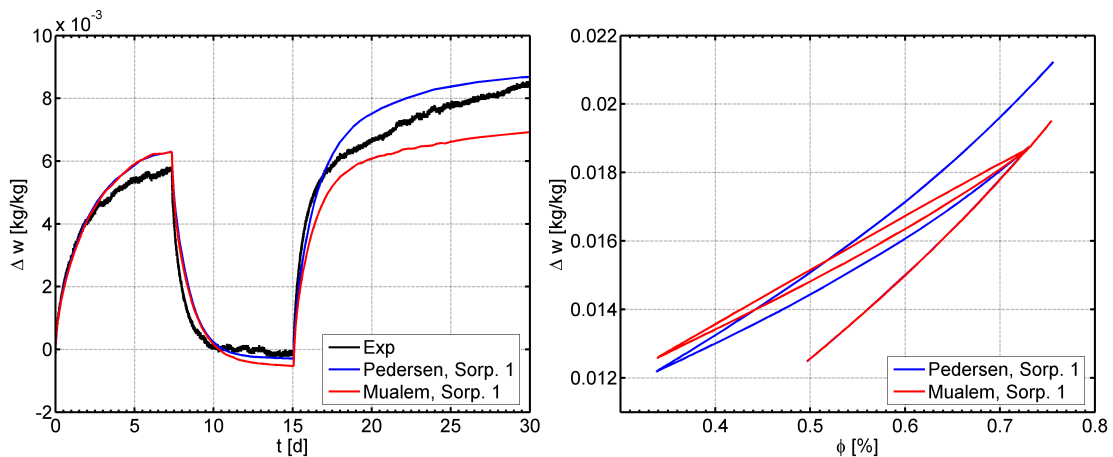


Figure 5 : Evolutions expérimentale et numérique de la variation de teneur en eau moyenne (gauche) et de l'humidité relative à 15 mm (droite) pour les modèles d'hystérésis de Pedersen et de Mualem.

5. CONCLUSION

Dans cette étude, le comportement hygrothermique d'un enduit de finition intérieure biosourcé à base de chaux et de chanvre a été traité numériquement et validé expérimentalement. Dans un premier temps, on a observé qu'un faible écart dans l'ajustement de la courbe d'adsorption principale pouvait engendrer des différences significatives dans la simulation de la teneur en eau moyenne lors d'une phase d'adsorption. De plus, on a constaté durant une phase transitoire des écarts entre les humidités relatives simulées et mesurées qui pourraient être attribués à des effets dynamiques. Dans un second temps, l'hystérésis a été prise en compte à l'aide des modèles empirique de Pedersen et phénoménologique de Mualem. Si le modèle de Pedersen a permis de bien capter la tendance expérimentale, celui-ci nécessite néanmoins l'ajustement de trois coefficients empiriques. Le modèle de Mualem ne nécessite pas d'ajustement empirique, mais requière d'évaluer avec précision la courbe de désorption principale. Cette tâche constitue une première perspective à ce travail. Une seconde

consiste à mener d'autres expériences de sorption/désorption sur cet échantillon instrumenté (comme le Nordtest protocole) en vue de valider ce modèle de transfert de chaleur et d'humidité associé aux deux modèles d'hystérésis dans des conditions plus réelles.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Colinart, Thibaut, Patrick Glouannec, Thomas Pierre, Philippe Chauvelon, et Anthony Magueresse. 2013. « Experimental Study on the Hygrothermal Behavior of a Coated Sprayed Hemp Concrete Wall ». *Buildings* 3 : 79-99. doi:10.3390/buildings3010079.
- Janssen, Hans, et Staf Roels. 2009. « Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures ». *Energy and Buildings* 41 : 382-394. doi:10.1016/j.enbuild.2008.11.007
- Kwiatkowski, Jerzy, Monika Woloszyn, et Jean-Jacques Roux. 2009. « Modelling of hysteresis influence on mass transfer in building materials », *Building and Environment* 44 : 633-642. doi:10.1016/j.buildenv.2008.05.006
- Muallem, Yechezkel. 1974. « A conceptual model of hysteresis ». , *Water Resources Research* 10 : 514-520. doi:10.1029/WR010i003p00514
- Pedersen, Carsten Rode. 1990. « Combined heat and moisture transfer in building constructions ». Thèse de doctorat. Technical University of Denmark.
- Pierre, Thomas, Thibaut Colinart, et Patrick Glouannec. 2013. « Measurement of Thermal Properties of Biosourced Building Materials ». *International Journal of Thermophysics*, accepté pour publication. doi:10.1007/s10765-013-1477-0.
- Ramos, Nuno, João Delgado, et Vasco Peixoto de Freitas. 2010 « Influence of finishing coatings on hygroscopic moisture buffering in building éléments ». *Construction and Building Materials* 24 : 2590-2597. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.05.017
- Roels, Staf, et Hans Janssen. 2006. « A comparison of the nordtest and japanese test methods for the moisture buffering performance of building materials ». *Journal of Building Physics* 30 : 137-161. doi:10.1177/174425910606810
- Scheffler, Gregor, et Rudolf Plagge. 2011. « Application of instantaneous profile measurement of moisture content and moisture potential in porous materials », *Materials and Structures* 44 :1517-1536. doi:10.1617/s11527-011-9716-y
- Simonson, Carey, Mikael Salonvaara, and Tuomo Ojanen, 2004. « Heat and Mass Transfer between Indoor Air and a Permeable and Hygroscopic Building Envelope, Part II – Verification and Numerical Studies », *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 28 : 161-185. doi:10.1177/1097196304044395.
- Steeman, Marijke, Marnix Van Belleghem, Michel De Paepe, et Arnold Janssens. 2010. « Experimental validation and sensitivity analysis of a coupled BES-HAM model ». *Building and Environment* 45 : 2202-2217. doi:10.1016/j.buildenv.2010.04.003
- Van Belleghem, Marnix, Marijke Steeman, A. Willockx, Arnold Janssens, et Michel De Paepe. 2011. « Benchmark experiments for moisture transfer modelling in air and porous materials », *Building and Environment* 46 : 884-898. doi:10.1016/j.buildenv.2010.10.018
- Yang, Xiangjin, Paul Fazio, Hua Ge et Ji Wu Rao. 2012. « Evaluation of moisture buffering capacity of interior surface materials and furniture in a full-scale experimental investigation ». *Building and Environment* 47 : 188-196. doi:10.1016/j.buildenv.2011.07.025
- Zakoune, Atika, Patrick Glouannec, et Patrick Salagnac. 2013. « Identification of the Liquid and Vapour Transport Parameters of an Ecological Building Material in Its Early Stages ». *Transport in Porous Media* 98 : 589-613. doi:10.1007/s11242-013-0162-x