

---

# Modélisation du transfert de chaleur et de masse : impact de la perméabilité à l'air et de l'hystérésis pour le béton de chanvre

AIT OUMEZIANE Y. \* — MOISSETTE S. \* — BART M. \* —  
LANOS C. \*

UEB - LGCGM, Equipe Matériaux Thermo-Rhéologie, INSA-IUT, Rennes,  
20 avenue des buttes de Coësmes, 35043 Rennes  
yacine.ait-oumeziane@univ-rennes1.fr

---

*RÉSUMÉ.* Dans le cadre de la caractérisation hygrothermique de matériaux à faible impact environnemental, un modèle unidimensionnel de transfert de masse et de chaleur a été implémenté sous COMSOL. Ce modèle a été validé en s'appuyant sur les résultats d'un benchmark (HAMSTAD WP2). Il est ensuite confronté, à des résultats expérimentaux mesurés sur une paroi de béton de chanvre représentative d'un mur en conditions réelles. La discordance entre les résultats expérimentaux et les résultats d'un modèle non hystérique conduit à envisager deux axes d'amélioration : la prise en compte d'un éventuel transfert d'air et la modélisation de l'hystérésis de l'isotherme de sorption.

*ABSTRACT.* In the context of hygrothermal characterization of environmentally friendly materials, a non hysteretic 1D model, for describing mass and heat transfer is implemented with COMSOL. The model is validated thanks to an international benchmark HAMSTAD WP2. Numerical and experimental results from hemp concrete wall submitted to real climatic solicitations are compared. The poor agreement between these one conducts to analyse the air transfer through the wall and the modeling of sorption isotherm hysteresis.

*MOTS-CLÉS :* transfert, masse, chaleur, modèle numérique, béton de chanvre, hystérésis.

*KEYWORDS:* transfer, mass, heat, numerical model, hemp concrete, hysteresis.

---

## 1. Introduction

Dans le contexte actuel de développement durable, le choix de matériaux de construction à faible impact environnemental peut s'avérer judicieux. Ces matériaux, lors de leur mise œuvre et de leur utilisation, présentent peu d'émissions polluantes, un faible coût énergétique et sont de bons isolants... Le béton de chanvre (mélange de chènevotte et de chaux) est un matériau de plus en plus étudié (Samri, 2008) (Evrard, 2008). Afin de prédire correctement le comportement hygrothermique du matériau, un modèle numérique unidimensionnel de transfert de masse et de chaleur basé sur les travaux de Künzel (1995) a été développé.

L'objectif de cette étude est de souligner la difficulté de modéliser le comportement hygrothermique d'une paroi de béton de chanvre sous sollicitations réelles. Ainsi, les résultats d'un modèle numérique vont être confrontés aux résultats expérimentaux mesurés sur une paroi en béton de chanvre. Celle-ci a été mise en place dans une enceinte biclimatique capable de reproduire les conditions représentatives de climats intérieur et extérieur. Le modèle retenu pour cette étude semble adapté à une telle étude. Une première comparaison entre résultats expérimentaux et numériques doit confirmer ce choix et orienter d'éventuels ajustements de la modélisation.

## 2. Présentation du modèle

### 2.1. Hypothèses – équations générales

Le modèle présenté ici se limite à la modélisation du transfert d'air, de chaleur et d'humidité en régime instationnaire au sein d'un milieu poreux en configuration 1D. Conformément aux travaux de (Künzel *et al.*, 1995), la température  $T$  et l'humidité relative  $\varphi$  ont été choisies comme potentiels gouvernant les transferts de chaleur et de masse.

Le transfert de masse s'effectue par diffusion d'air, par diffusion de vapeur régie par la loi de Fick et par conduction liquide gouvernée par la loi de Darcy. Dans ces conditions, les équations de conservation de masse sur l'eau et l'air prennent la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dw}{d\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_p p_{sat} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \delta_p \varphi \frac{dp_{sat}}{dT} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K \rho_w R_{H_2O} \frac{T}{\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} + K \rho_w R_{H_2O} \ln(\varphi) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ \quad - \delta_a \frac{0.622}{p_{atm}} \frac{\Delta P}{e} \left( p_{sat} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \varphi \frac{dp_{sat}}{dT} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_a \frac{\Delta P}{e} \right) = 0 \end{array} \right. [1]$$

avec  $w$  la teneur en eau,  $\delta_p$  la perméabilité du matériau humide,  $p_{sat}$ ,  $p_{atm}$ ,  $p_a$  respectivement la pression de vapeur saturante, la pression atmosphérique, la pression partielle d'air,  $\rho_w$  la masse volumique de l'eau,  $K$  la conductivité liquide du matériau,  $R_{H_2O}$  la constante des gaz parfait,  $\delta_a$  la perméabilité à l'air du matériau et  $\Delta P/e$  le gradient de pression totale auquel est soumise la paroi.

Le transfert de chaleur s'effectue par conduction, convection et changement de phase liquide vapeur au sein du matériau. L'équation de conservation de la chaleur s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \rho_0 C^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + (C_{pv} T + l_v) \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_p p_{sat} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \delta_p \phi \frac{dp_{sat}}{dT} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ + C_{pi} T \frac{\partial}{\partial x} \left( K \rho_w R_{H_2O} \frac{T}{\phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} + K \rho_w R_{H_2O} \ln(\phi) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + C_{pa} T \frac{\partial}{\partial x} \left( 2 \delta_a \frac{\Delta P}{e} \right) \end{aligned} \quad [2]$$

avec  $\rho_0$  la masse volumique sèche du matériau,  $C_{pv}$ ,  $C_{pl}$ ,  $C_{pa}$  les chaleurs spécifiques respectivement de la vapeur, de l'eau liquide et de l'air,  $C^*$  la chaleur spécifique du matériau humide,  $\lambda$  la conductivité thermique équivalente du matériau humide et  $l_v$  la chaleur latente d'évaporation. Plus de détails concernant l'écriture des équations constitutives du modèle sont données dans (Ait Ouméziane *et al.*, 2011).

## 2.2. Conditions limites

En considérant un mouvement d'air dirigé de l'intérieur vers l'extérieur, les conditions limites s'expriment suivant les équations ci-dessous :

$$g_{ext} = \beta_{ext} (p_{ext} - p_{surf}) + \frac{0.622}{p_{atm}} \rho_a V (p_{ext} - p_{surf}) \quad [3]$$

$$g_{int} = \beta_{int} (p_{int} - p_{surf}) \quad [4]$$

$$q_{ext} = h_{ext} (T_{ext} - T_{surf}) + \rho_a C_a V (T_{ext} - T_{surf}) + l_v g_{ext} \quad [5]$$

$$q_{int} = h_{int} (T_{int} - T_{surf}) + l_v g_{int} \quad [6]$$

où les paramètres  $h$  et  $\beta$  désignent respectivement les coefficients d'échange convectifs de chaleur et de masse. Le coefficient  $h$  est évalué arbitrairement à la valeur usuelle de  $5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  pour les faces intérieure et extérieure. Le coefficient  $\beta$  est obtenu par l'application de la relation de Lewis, conduisant à des valeurs avoisinant  $5.10^{-8} \text{ s.m}^{-1}$  pour les deux faces.

### 2.3. Résolution numérique et validation du modèle

Le modèle est implémenté sous COMSOL Multiphysics, logiciel de calcul par éléments finis particulièrement bien adapté à la résolution de systèmes d'équations différentielles instationnaires fortement couplées appliquées à des structures multicouches et multidimensionnelles rencontrées dans l'enveloppe des bâtiments.

Le modèle a été comparé à d'autres modèles existants au travers de 5 cas tests issus d'un benchmark international HAMSTAD WP2 (Aït Ouméziane *et al.*, 2011). La modélisation mise en œuvre reproduit correctement les profils de température et d'humidité pour des parois multicouches soumises à diverses variations climatiques. Cette validation numérique certifie de la performance du modèle implémenté et de l'efficacité du logiciel de résolution numérique COMSOL Multiphysics.

## 3. Propriétés du béton de chanvre et dispositif expérimental

### 3.1. Propriétés du béton de chanvre

Les propriétés du béton de chanvre sont obtenues à partir d'une campagne expérimentale menée au laboratoire. Les dispositifs expérimentaux sont décrits en détails dans (Collet *et al.*, 2008). Dans cette étude, les propriétés thermo-hyriques sont considérées indépendantes de la teneur en eau du matériau. Les valeurs suivantes sont utilisées : la masse volumique sèche  $\rho_0 = 390 \text{ kg.m}^{-3}$ , la conductivité thermique  $\lambda = 0.11 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , la chaleur spécifique  $C_0 = 1000 \text{ J.kg}^{-1}$  et la perméabilité à la vapeur  $\delta_p = 2.5.10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ .

L'isotherme de sorption, déterminée à 23°C, présente une hystérésis (cf. figure 1), phénomène observé également sur de nombreux matériaux de construction hygroscopiques (bois, plâtre...).

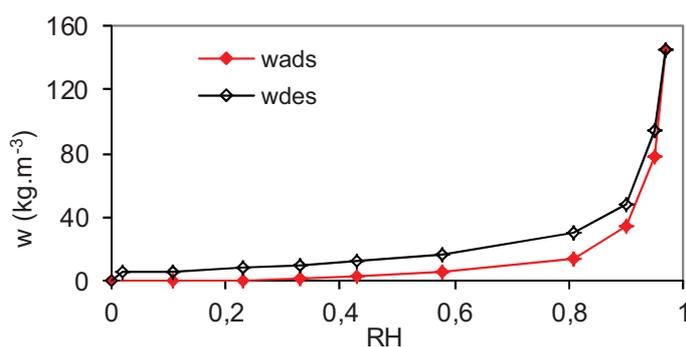
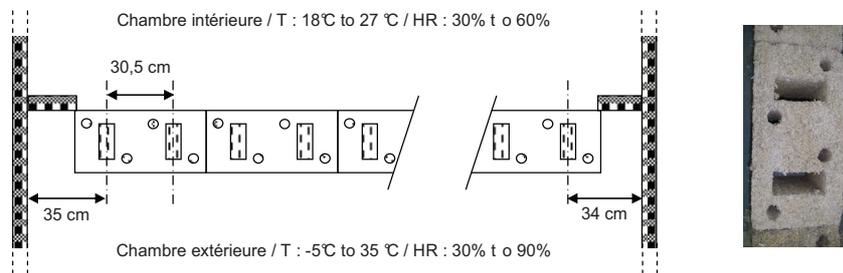


Figure1. Adsorption et désorption du béton de chanvre

### 3.2. Description de la paroi

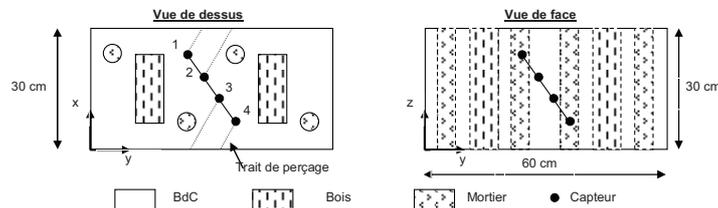
Deux chambres climatiques, capables de reproduire des conditions typiques de climats intérieur et extérieur, sont séparées par un mur composite ( $2,10 \times 2,30 \text{ m}^2$ ) constitué de blocs de béton de chanvre (60 cm x 30 cm x 30 cm) et de poteaux en bois (cf. figure 2). Les blocs présentent deux réservations rectangulaires destinées à recevoir les poteaux et quatre réservations circulaires permettant le passage des réseaux d'un bâtiment. Le mortier assurant l'assemblage et le remplissage des orifices non utilisés est constitué d'eau, de chaux et de chènevotte. L'assemblage ainsi réalisé est tout à fait représentatif d'un mur réel d'une maison en béton de chanvre.



**Figure 2.** Coupe transversale du mur et photographie d'un bloc de béton de chanvre

### 3.3. Métrologie

Afin de suivre les évolutions temporelle et spatiale de la température et de l'humidité relative, des capteurs d'humidité (Sensirions) et des thermocouples ont été mis en place au sein de la paroi, sur les surfaces et dans les ambiances. Les orifices créés pour mettre en place les capteurs sont choisis pour limiter la perturbation des transferts de masse et de chaleur induite par la présence de ces capteurs (figure 3). Le système d'acquisition assure l'enregistrement des mesures toutes les cinq minutes. Dans cet article, les réponses de 4 capteurs d'humidité et de 4 thermocouples assurant le suivi du comportement d'un bloc situé au milieu de la paroi sont présentées et étudiées.



**Figure 3.** Bloc de béton de chanvre instrumenté ( $x_1 = 0.08 \text{ m}$ ,  $x_2 = 0.12 \text{ m}$ ,  $x_3 = 0.18 \text{ m}$  et  $x_4 = 0.22 \text{ m}$ )

### 3.4. Sollicitations climatiques

Dans la séquence étudiée ici, le mur est initialement stabilisé à 40% et 23°C. La durée de l'expérience est de 2 semaines. Au temps  $t=0$ , la consigne pour l'humidité relative de la chambre extérieure est portée à 80%. Les aléas liés au système de régulation de cette enceinte conduisent à des variations de l'humidité relative entre 50% et 80% sur la première semaine du test. Les températures des chambres et les humidités relatives mesurées lors du test sont données sur la figure 4.

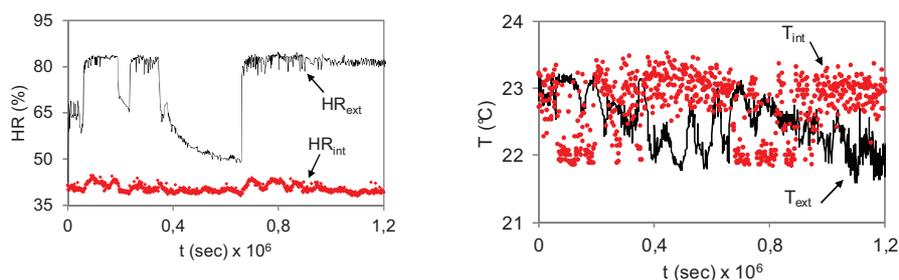


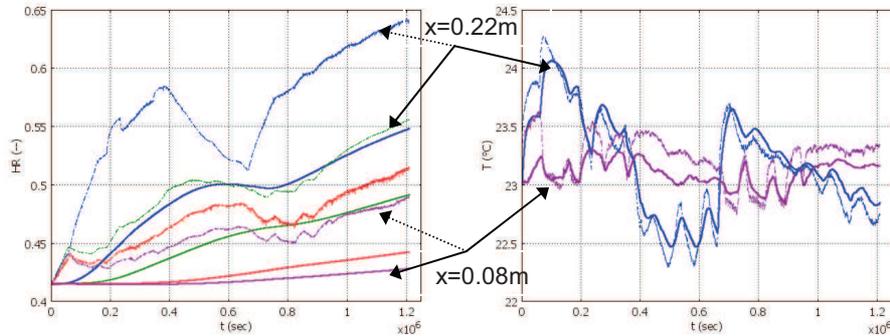
Figure 4. Sollicitations climatiques intérieures et extérieures

## 4. Simulation de la paroi en béton de chanvre

### 4.1. Application directe du modèle sans transfert d'air

La figure 5 présente les résultats expérimentaux et numériques concernant les évolutions de la température et de l'humidité relative en fonction du temps pour 4 profondeurs. Les propriétés thermo-hydriques décrites au paragraphe 3.1 ont été utilisées. En ce qui concerne l'isotherme de sorption-désorption, seule la branche de sorption a été considérée dans cette première approche. Elle est, dans le logiciel COMSOL, interpolée par une fonction cubique par morceaux. Aucun transfert d'air n'est dans un premier temps considéré.

L'évolution de la température apparaît tout à fait en accord avec les données expérimentales quelle que soit la position au sein de la paroi, seuls les résultats pour deux profondeurs ont été donnés sur la figure 5. Pour l'humidité relative, les résultats ne sont pas satisfaisants : non seulement la cinétique n'est pas respectée mais les amplitudes sont également erronées pouvant conduire à des sous-estimations allant jusqu'à 10% de la valeur attendue. La différence constatée entre l'expérience et la simulation laisse penser que l'humidité ne se diffuse pas suffisamment dans le matériau. Afin d'améliorer les résultats numériques, deux axes d'étude sont envisagés : la prise en compte d'un transfert d'air conduisant à une meilleure diffusion de la vapeur d'eau au sein du matériau et la prise en compte de l'hystérésis caractéristique du comportement hydrique du matériau conduisant à une meilleure représentation du stockage effectif de l'humidité au sein de la paroi.



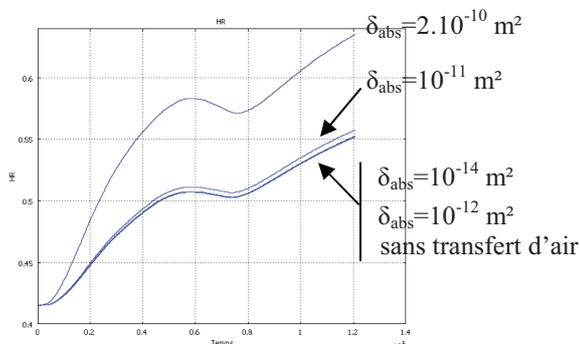
**Figure 5.** Résultats expérimentaux (pointillés) et numériques (trait continu) pour l'humidité relative (à gauche) et la température (à droite) pour différentes profondeurs ( $x = 0.22\text{ m}$ ,  $0.18\text{ m}$ ,  $0.12\text{ m}$ ,  $0.08\text{ m}$ ).

#### 4.2. Réflexion sur la prise en compte du transfert d'air

Le transfert d'air au sein d'un matériau poreux est régi par la différence de pression totale qui existe entre les 2 côtés de la paroi et par la valeur de la perméabilité à l'air du matériau.

Pour conduire notre étude, une mesure au manomètre à eau est réalisée entre les 2 enceintes. La précision du système de mesure ne permet pas de détecter de différence de pression. Par conséquent seules des différences de pression, inférieures à 10 Pa (niveau de précision estimée du système de mesure mis en place) sont susceptibles d'exister. Cette valeur de 10Pa est retenue pour la simulation numérique. D'autre part, la perméabilité à l'air du béton de chanvre étant inconnue, un ordre de grandeur est évalué en s'appuyant sur les valeurs caractéristiques d'autres matériaux. A ce titre, quelques exemples de perméabilité absolue sont fournis ci-après :  $2 \cdot 10^{-10}\text{ m}^2$  pour la laine minérale,  $10^{-12}\text{ m}^2$  pour le sable et  $10^{-14}\text{ m}^2$  pour le calcaire.

La figure 6 montre l'influence de la prise en compte du transfert d'air et de la valeur de la perméabilité à l'air du matériau sur l'évolution de l'humidité relative. Avec une perméabilité absolue élevée (du même ordre de grandeur que la perméabilité de l'air à la vapeur d'eau), on constate qu'un gradient de pression faible permet d'augmenter significativement la répartition de l'humidité au sein de la paroi. Toutefois, l'introduction d'un transfert d'air dans le calcul est insuffisante pour corriger le déphasage temporel qui existe entre résultats expérimentaux et simulés. Afin de poursuivre la réflexion, il apparaît nécessaire de déterminer expérimentalement la perméabilité à l'air du béton de chanvre.



**Figure 6.** Distribution des humidités relatives à la profondeur de  $x=0.22$  m pour différentes valeurs de perméabilité absolue avec une différence de pression totale de 10 Pa.

#### 4.3. Réflexion sur le comportement hydrique réel du béton de chanvre

Les isothermes de sorption/désorption du béton de chanvre, dites isothermes principales, présentées en figure 1 sont celles utilisées jusqu'ici pour modéliser l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative. Ce sont des courbes « extrêmes » qui ne représentent pas les évolutions réelles de la teneur en eau d'un matériau in situ. Ce cycle principal permet néanmoins d'encadrer correctement la valeur de l'humidité stockée au sein du matériau.

Pour des matériaux hygroscopiques présentant une hystérésis, des études expérimentales ont mis en évidence l'existence de cycles intermédiaires ((Roels *et al.*, 2008) pour du plâtre, (Carmeliet *et al.*, 2005) pour du bois par exemple). Dans tous les cas, ces cycles intermédiaires induisent une diminution de la capacité de stockage (terme  $dw/d\phi$ ) du matériau.

Actuellement, ne disposant pas de résultats expérimentaux concernant les branches intermédiaires pour le béton de chanvre, une modélisation simplifiée est proposée. La construction d'une courbe intermédiaire repose sur les points suivants :

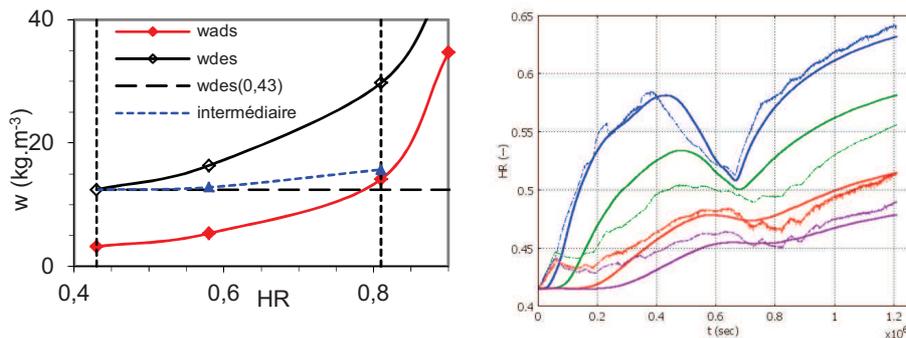
- les courbes d'adsorption et de désorption principales fixent les limites de la teneur en eau
- la teneur en eau initiale est prise égale à  $w_{des}(0.43)$ ,
- la branche intermédiaire est une fonction linéaire par morceaux sur les intervalles [43%-58%] et [58%-81%]. Sur ces deux intervalles le cycle de sorption-désorption du béton de chanvre présente des ouvertures d'hystérésis différentes. Ainsi, ce choix permet la construction d'une branche intermédiaire représentative.

Les points  $w_{inter}(0.58)$  and  $w_{inter}(0.81)$  de la branche intermédiaire sont alors définis par :

$$\begin{aligned} w_{inter}(0.58) &= w_{des}(0.43) + \alpha(w_{des}(0.58) - w_{des}(0.43)) \\ w_{inter}(0.81) &= w_{ads}(0.81) + \alpha(w_{des}(0.81) - w_{ads}(0.81)) \end{aligned} \quad [7]$$

où  $\alpha$  est un paramètre d'ajustement compris entre 0 et 1. Ce paramètre a été calé sur la réponse expérimentale à la profondeur  $x = 0,22$  m, la valeur de  $\alpha = 1/10$  a été retenue.

La figure 7 présente la branche intermédiaire ainsi construite et fournit l'évolution de l'humidité relative pour les 4 profondeurs. Les résultats semblent tout à fait satisfaisants pour une valeur de  $\alpha = 1/10$ . Dans la démarche proposée ici, la construction du modèle n'est pas étayée par des phénomènes physiques clairement identifiés. Cependant, l'utilisation du paramètre d'ajustement  $\alpha$  identifié à l'aide d'es enregistrements obtenus à une profondeur donnée permet de prédire correctement l'évolution de l'humidité relative aux trois autres profondeurs.



**Figure 7.** *A gauche, isotherme de sorption et branche intermédiaire construite. A droite, résultats expérimentaux (pointillés) et numériques (trait continu) pour l'humidité relative pour différentes profondeurs ( $x = 0.22$  m,  $0.18$  m,  $0.12$  m,  $0.08$  m) avec prise en compte de la branche intermédiaire ( $\alpha = 1/10$ ).*

## 5. Conclusion

Un modèle de simulation numérique des transferts couplés d'air, de chaleur et de masse au sein d'un milieu poreux 1D a été implémenté sous COMSOL. Le comportement d'une paroi en béton de chanvre mise en place au laboratoire a alors été simulé. Les résultats obtenus avec le modèle sont acceptables vis-à-vis du transfert thermique mais moins ajustés vis-à-vis du transfert hydrique. Une première étude a permis d'évaluer l'influence que peut avoir le transfert d'air à travers la paroi sur les résultats. Pour mieux prendre en compte ce phénomène dans le modèle, il convient de mesurer la perméabilité à l'air du béton de chanvre. La valeur mesurée doit permettre de juger de l'impact de ce paramètre sur les résultats.

La prise en compte de branches intermédiaires sur l'hystérésis présente sur les courbes d'adsorption et de désorption du béton de chanvre, afin de mieux modéliser le stockage d'humidité au sein du matériau, s'avère plus judicieuse que le fait de ne considérer que le cycle principal de sorption. Un travail important reste cependant à réaliser vis-à-vis de l'hystérésis du stockage hydrique du matériau. Des mesures expérimentales de branche primaire d'adsorption et de désorption sont en cours. Celles-ci viendront confirmer ou infirmer la réduction notable de la capacité hydrique du matériau observée lors du calage des simulations numériques. De plus, des modèles d'hystérésis susceptibles de représenter plus fidèlement le stockage de l'humidité au sein du matériau sont actuellement étudiés et comparés ((Mualem *et al.*, 2009), (Carmeliet *et al.*, 2005) ...).

#### Remerciements

Ce travail s'inscrit dans le cadre de deux projets BETON DE CHANVRE ANR-06-MAPR-0002 et PRIR ECOMATX 2005. Les auteurs remercient l'ANR et la Région Bretagne pour leur contribution financière.

#### 6. Bibliographie

- Ait Oumeziane Y. & Bart M. & Moissette S. & Lanos C., *Modélisation du transfert d'air, de masse et de chaleur aux travers de parois multicouche.*, X<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois, Saguenay, Canada, 2011.
- Carmeliet J. & De Wit M. & Janssen H., *Hysteresis and moisture buffering of wood*, Seventh Nordic Symposium on building physics, Reykjavik. Island, 2005.
- Collet F. & Bart M. & Serres L. & Miriel J., *Porous structure and water vapour sorption of hemp-based material.*, *Construction and Building Materials*, Vol 22, p. 1271-1280, 2008
- Evrard A., *Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials*, PhD-Thesis., Université Catholique de Louvain, Belgium, 2008.
- Kunzel H. M., *Simultaneous heat and moisture transport in building components*, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart. Germany, 1995.
- Mualem Y & Beriozkin A., *General scaling rules of the hysteretic water retention function based on Mualem's domain theory*, *European Journal of SOIL Science*, n°60, p 652-661, 2009.
- Roels S., Talukdar P., James C., Simonson C. *Reliability of material data measurements for hygroscopic buffering*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, p 5355-5363, 2010.
- Samri D. *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique*, Thèse de doctorat, Institut National Sciences Appliquées de Lyon, France, 2008.