

## Simulation des transferts hygrothermiques d'une paroi en béton de chanvre en régime dynamique

C. Maalouf<sup>1</sup> - A.D. Tran Le<sup>1</sup> - T.H. Mai<sup>1</sup> - E. Wurtz<sup>2</sup> - K. C. Mendonça<sup>3</sup>

<sup>1</sup> LTM. - Laboratoire de Thermomécanique, GRESPI, Université de Reims  
Faculté des Sciences, BP. 1039, Moulin de la Housse,  
F-51687 Reims, Cedex 2.

[chadi.maalouf@univ-reims.fr](mailto:chadi.maalouf@univ-reims.fr), [tran-001@etudiant.univ-reims.fr](mailto:tran-001@etudiant.univ-reims.fr), [ton-hoang.mai@univ-reims.fr](mailto:ton-hoang.mai@univ-reims.fr)

<sup>2</sup> INES, Savoie Technolac, 50 Avenue du lac Lemans, BP 332,  
73375 Le Bourget du Lac.

[etienne.wurtz@univ-savoie.fr](mailto:etienne.wurtz@univ-savoie.fr)

<sup>3</sup> LST, Pontifical Catholic University, 1155, Prado Velho,  
Curitiba, Brazil

[k.mendonca@pucpr.br](mailto:k.mendonca@pucpr.br)

---

*RESUME : Le béton de chanvre est de plus en plus recommandé par les éco-constructeurs car le chanvre est une plante renouvelable, recyclable et qui ne se dégrade pas avec le temps. Elle répond ainsi parfaitement aux nouvelles exigences du bâtiment liées au label Haute Qualité Environnementale. Afin d'intégrer ce matériau dans le bâtiment, il est important d'étudier son comportement hygrothermique. Dans ce papier, on présente les premiers résultats de l'étude du comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre en régime dynamique et on la compare à d'autres matériaux utilisés actuellement dans la construction. Pour cela l'environnement orienté objet SPARK a été utilisé. Les transferts d'humidité se font sous forme liquide ou vapeur. La phase liquide est supposée se déplacer par capillarité tandis que la phase vapeur se diffuse en fonction des gradients de pression partielle de vapeur. Les simulations sont aussi utilisées pour tester plusieurs modèles de complexité décroissante : coefficients de diffusion variables, constants, diffusion isotherme et coefficients nuls (pas de transfert d'humidité).*

*MOTS - CLES: béton de chanvre, modélisation, comportement hygrothermique, SPARK.*

---

*ABSTRACT : Hemp concrete is more and more recommended by the eco-builders because hemp is a renewable plant, recyclable and does not degrade within time. It corresponds perfectly to the requirements of High Environmental Quality buildings. To integrate this material into buildings, it is important to study its hygrothermal behaviour. In this paper, we present the first results of the study of the hygrothermal behaviour of a hemp concrete wall in dynamic conditions and we compare it with other materials used in the construction. The simulation environment SPARK was used. Moisture transport is made through liquid or vapour phases. The liquid phase is supposed to move by capillarity whereas the vapour phase diffuses under vapour partial pressure gradient. The simulations are also used to test several models of different complexity: variable transport coefficients, constant transport coefficients, isothermal distribution and null coefficients (no transport of humidity).*

*KEYWORDS : Hemp concrete, modelling, hygrothermal behaviour, SPARK.*

---

### 1. INTRODUCTION

Dans le cadre du développement durable, les nouvelles réglementations en matière d'isolation thermique dans le secteur du bâtiment, conduisent les chercheurs à la recherche de nouveaux matériaux pour constituer des systèmes économes en énergie. Cette recherche s'est très vite dirigée vers l'utilisation de matériaux issus de la matière végétale. Ceux-ci sont, soit directement issus de la transformation de produits cultivés (chanvre, par exemple), soit issus de la valorisation de leurs déchets. Parmi les nouveaux matériaux à base végétale, le chanvre est le plus utilisé dans la construction. Sa mise en application est encore limitée. Les recherches effectuées jusqu'à ce jour

((Collet, 2004), (Cerezo, 2005), (Elfordy *et al.*, 2007)) ont permis de déterminer les propriétés physiques de ce matériau. Ces valeurs ne reflètent que partiellement le confort ressenti dans les locaux dont les parois sont en béton de chanvre. Son rôle de régulateur hygrothermique est à ce titre assez difficile à quantifier et on trouve rarement dans la littérature des études portant sur les enveloppes d'isolation à base végétale pour l'habitat.

Dans ce papier, on s'intéresse au comportement hygrothermique de ce matériau et on le compare à d'autres matériaux. D'abord on présente les équations de transfert de chaleur et de masse dans une paroi (modèle Umidus) (Mendes *et al.*, 2003). Ces équations ont été implémentées dans l'environnement de simulation SPARK qui est adapté aux problèmes complexes (Sowell *et al.*, 2001). Ensuite on utilise les simulations afin d'étudier le comportement d'une paroi en béton de chanvre soumise à une sollicitation de température et d'humidité et on la compare à d'autres matériaux. De même plusieurs modèles ont été testés : le modèle du logiciel WUFI+ qui prend en compte la variation des coefficients de diffusion en fonction de l'humidité relative, un modèle à coefficients constants, un modèle à diffusion isotherme et un modèle sans transfert d'humidité.

## 2. MODÈLES PHYSIQUES

### 2.1 MODELES MATHEMATIQUES

L'humidité peut être transportée par diffusion, capillarité, convection et par introduction non intentionnelle d'eau. Elle peut être présente dans n'importe quel système de paroi sous forme solide (glace), liquide et vapeur. Ceci crée des interactions de transport complexes pendant lesquels certains matériaux stockent et accumulent l'eau dans leur structure poreuse ce qui peut entraîner des dommages mécanique, biologique et chimique selon les conditions environnementales, la teneur en eau, l'histoire et les propriétés intrinsèques du matériau. Comprendre et prédire les transferts d'humidité dans l'enveloppe du bâtiment est un phénomène d'importance primordiale afin de prédire et d'améliorer la performance des bâtiments et en particulier leur durabilité.

Dans la littérature on trouve plusieurs modèles permettant de modéliser les transferts hygrothermiques dans une paroi. Ces modèles diffèrent par leur approche et leur complexité. Ils sont surtout basés sur la théorie de Philip et de Vries (Philip *et al.*, 1957). Pour notre étude, on a utilisé le modèle d'Umidus ((Mendes *et al.*, 1997), (Mendonça, 2004)), qui considère que l'humidité traverse le matériau poreux sous forme liquide et vapeur. La phase liquide est supposée se déplacer par capillarité tandis que la phase vapeur se diffuse en fonction des gradients de pression partielle de vapeur. Avec ces considérations, l'équation bilan en humidité devient :

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_T \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_\theta \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \right) \quad [1]$$

Avec comme conditions aux limites (en  $x=0$  et  $x=L$ ) :

$$-\rho_l \left( D_T \frac{\partial T_s}{\partial x} + D_\theta \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \right) \Bigg|_{x=0,e} = h_{M,e} (\rho_{ve,a,e} - \rho_{ve,s,e}) \quad [2]$$

$$-\rho_l \left( D_T \frac{\partial T_s}{\partial x} + D_\theta \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \right) \Bigg|_{x=L,i} = h_{M,i} (\rho_{ve,s,i} - \rho_{ve,a,i}) \quad [3]$$

L'équation de bilan d'énergie indique que la variation d'énergie en fonction du temps est liée à la fois à la chaleur échangée par conduction ainsi qu'au changement de phase dans les pores :

$$\rho_0 C P_m \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + L_v \rho_l \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{T,ve} \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{\theta,ve} \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \right) \right) \quad [4]$$

Les conditions aux limites sont les suivantes :

$$-\lambda_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial x} - L_v \rho_l \left( D_{T,ve} \frac{\partial T_s}{\partial x} + D_{\theta,ve} \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \right)_{x=0,e} = h_{T,e} (T_{a,e} - T_{s,e}) + L_v h_{M,e} (\rho_{ve,a,e} - \rho_{ve,s,e}) + \Phi_{ray,e} \quad [5]$$

$$-\lambda_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial x} - L_v \rho_l \left( D_{T,ve} \frac{\partial T_s}{\partial x} + D_{\theta,ve} \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \right)_{x=L,i} = h_{T,i} (T_{s,i} - T_{a,i}) + L_v h_{M,i} (\rho_{ve,s,i} - \rho_{ve,a,i}) - \Phi_{ray,i} \quad [6]$$

En réalité les coefficients de transport sont difficiles à déterminer. Pour cela afin d'étudier leur influence on va considérer les sous-modèles suivants (la conductivité thermique est considérée constante) :

**Modèle\_0** : Modèle complet dans lequel les coefficients de transport varient en fonction de l'humidité relative. Ce modèle est basé sur les équations du logiciel WUFI+ (Kunzel, 1995). Dans ce modèle, l'équation de l'isotherme de sorption est approximée par une relation de la forme :

$$\theta = \theta_f \left[ \frac{b-1}{b-\varphi} \right] \varphi \quad [7]$$

où  $\theta_f$  et  $b$  sont des constantes qui dépendent de la nature du matériau. Si cette relation est valable pour certains matériaux, elle peut induire des erreurs pour d'autres comme dans le cas du béton normal et du béton de chanvre.

**Modèle\_1** : Modèle dans lequel tous les coefficients de transport sont constants et les fonctions isothermes de sorption sont basées sur des données expérimentales.

**Modèle\_2** : Nous négligeons l'effet de la température sur le transfert de l'humidité donc les coefficients  $D_T$ , et  $D_{VT}$  dans le modèle 1 sont mis à 0.

**Modèle\_3** : Dans ce dernier modèle, nous ne tenons compte que du transfert de chaleur.

Afin de résoudre le système obtenu, les équations ont été implémentées dans l'environnement de simulation SPARK, un environnement orienté objet permettant de résoudre de façon efficace les systèmes d'équations différentielles (Sowell *et al.*, 2001). La méthode des différences finies a été utilisée (schéma implicite). Les modèles implémentés ont été validés dans le cadre de l'annexe 41 de l'agence internationale de l'énergie (Annex 41).

## 2.2 MATERIAUX UTILISES

Matériaux	Densité	Conduc- thermique $\lambda$	Chaleur spécifique	$D_\theta$	$D_T$	$D_{\theta v}$	$D_{Tv}$
	kg/m <sup>3</sup>	W/m.K	J/kg.K	m <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /(s.K)	m <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /(s.K)
Béton de chanvre	413	0,11	1000	1,16E-09	1,02E-12	1,07E-09	1,02E-12
Béton normal	2300	1,6	850	6,39E-10	7,91E-14	2,29E-11	7,91E-14
Brique extrudée	1650	0.6	850	1,00E-08	1,50E-12	5,32E-09	1,50E-12

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux étudiés.

Concernant les caractéristiques hygrothermiques des matériaux utilisés, elles sont données dans la littérature (pour le béton normal et la brique ((WUFI), (Mendes *et al.*, 2003)), et pour le béton de chanvre (Collet, 2004), (Cerezo, 2005)). Les caractéristiques des matériaux utilisés pour les modèles 1,2 et 3 sont présentées dans le tableau 1 pour une humidité relative de 50%.

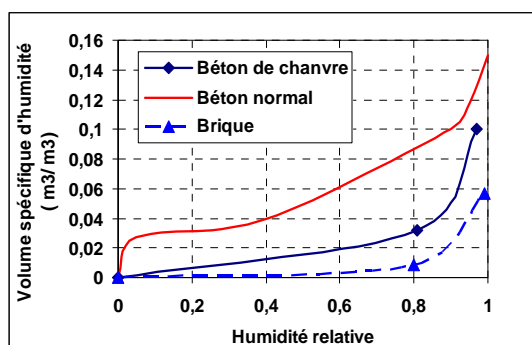


Figure 1 : La fonction isotherme de sorption du béton de chanvre, de la brique et du mortier.

La figure 1 montre les isothermes de sorption pour les différents matériaux (celles utilisées dans le modèle 1). On peut remarquer que la teneur en eau du béton de chanvre est plus faible que celle du béton normal mais pour des humidités relatives supérieures à 80% sa capacité d'absorption augmente énormément.

### 3. MODELISATION HYGROTHERMIQUE D'UNE PAROI SIMPLE.

#### 3.1 PRESENTATION DU CAS ETUDIE

Pour comparer les 4 modèles nous choisissons le cas d'une paroi d'épaisseur 10 cm. Cette paroi est soumise aux conditions aux limites suivantes : la face extérieure est adiabatique et imperméable (donc  $h_{M,e}=0$  et  $h_{T,e}=0$ ), la face intérieure échange avec l'air ambiant avec les coefficients d'échange :  $h_{T,e}=3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  et  $h_{M,e}=0.003 \text{ m/s}$ .

Tout d'abord la paroi est en équilibre avec l'air intérieur qui est à 20°C et 40% d'humidité relative, soit une masse volumique de vapeur d'eau de  $0.007 \text{ kg/m}^3$ . Ensuite les conditions de l'air intérieur changent soudainement à 30°C et 70% d'humidité relative.

#### 3.2 RESULTATS

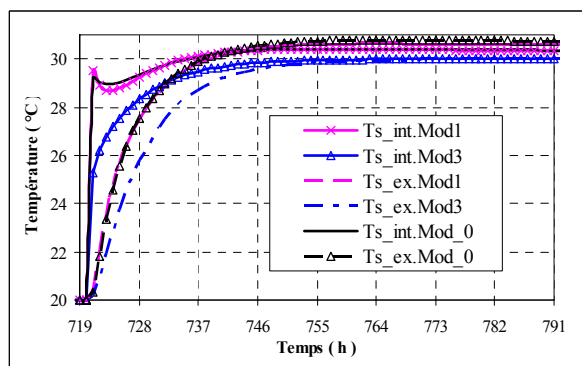


Figure 2 : Variation de la température aux surfaces extrêmes de la paroi en béton de chanvre et pour les modèles 0, 1 et 3.

La figure 2 montre l'évolution de la température aux deux surfaces extrêmes de la paroi en béton de chanvre. Les résultats obtenus pour le modèle 2 étant très proches de ceux du modèle 1, n'ont pas été tracés (car le gradient de température dans la paroi est faible).

Au début de la simulation, le béton de chanvre absorbe fortement l'humidité à la surface jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Ainsi le flux d'humidité entrant dans la face intérieure diminue et devient plus faible que celui qui diffuse dans la paroi. Ainsi le terme lié à la chaleur de sorption dans l'équation 4 devient négatif et sachant que la conductivité du béton de chanvre est faible (le flux conductif est plus faible que celui de la sorption) la température de la surface intérieure diminuera jusqu'à ce que le flux conductif devienne supérieur à celui de la sorption. Pour cela, on constate sur la figure 2 une chute de température au début de la simulation. Quant à la face extérieure (adiabatique et imperméable), sa température devient supérieure à celle de la face intérieure car le phénomène de sorption se poursuit lentement. On note qu'il y a une faible différence de température entre le modèle 0 et 1 alors que les températures sont supérieures à celles du modèle 3 à cause de la chaleur de sorption.

La figure 3 montre la variation de température pour les parois en brique et en béton de chanvre et pour les différents modèles. La chute de température à la surface intérieure de la paroi n'est pas observée dans ce cas car leur conductivité thermique, plus élevée que celle du béton de chanvre, rend le terme conductif plus significatif que celui dû au transfert de l'humidité. De plus nous constatons sur la figure 3.b une différence de l'ordre de 1°C entre les modèles 0 et 1 (du fait de la variation des coefficients de diffusion et de la forme des isothermes de sorption).

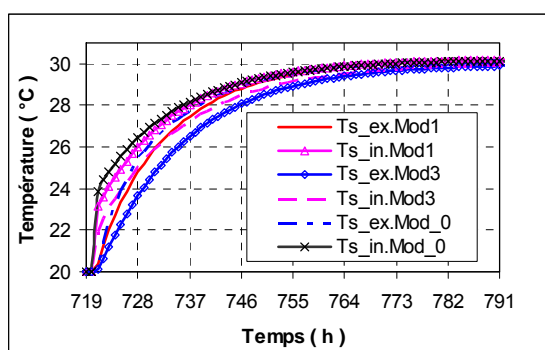


Figure 3a : Brique

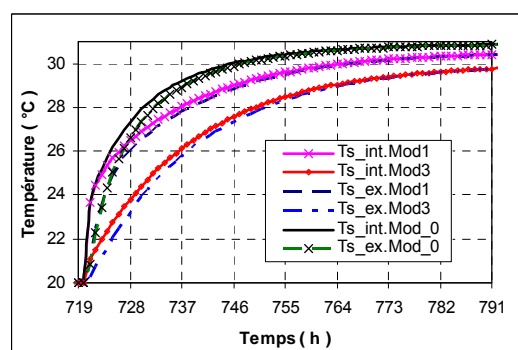


Figure 3b : Béton normal

Figure 3 : Variation de la température aux surfaces extrêmes de la paroi en brique et en béton normal, pour les modèles 1 et 3.

Dans les trois cas, la prise en compte du phénomène de sorption dans les modèles 0 et 1 résulte en une température plus élevée que celle du modèle 3 du fait de la chaleur de sorption dégagée (la différence est plus faible pour la brique car sa teneur en eau est plus faible que les autres matériaux). La température de surface tend vers la température d'équilibre. Selon ces figures, le fait de négliger les transferts d'humidité mène à des erreurs pouvant atteindre 2°C pour les 3 matériaux.

Si la variation des températures des modèles 0, 1 sont assez proches; ceci n'est pas vrai pour la variation de la teneur en eau car son allure dépend de l'équation de l'isotherme de sorption utilisée. Pour cela dans la suite on ne présentera que les résultats du modèle 1 dont les fonctions de sorption

son basées sur des données expérimentales (sachant que le développement d'un modèle à coefficients variables à partir de ces données est en cours).

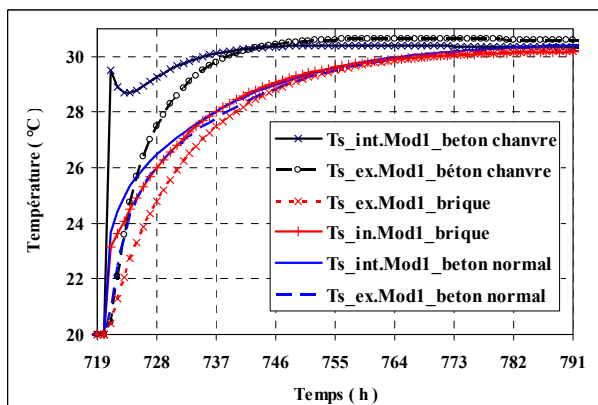


Figure 4a : Evolution de température (°T)

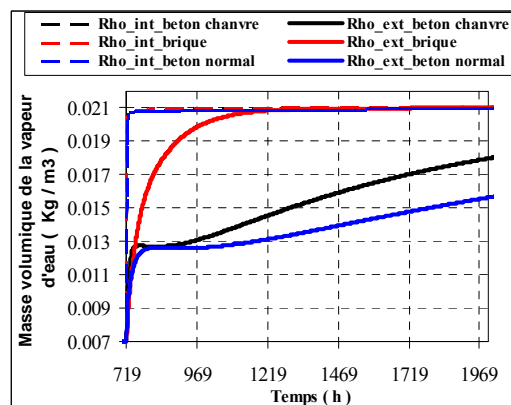


Figure 4b : Evolution de la masse volumique de la vapeur d'eau (Kg/m³)

Figure 4 : Comparaison de la variation de température et de la masse volumique de la vapeur d'eau pour le béton de chanvre, le béton normal et la brique et pour le modèle 1.

Dans la figure 4.a, on compare les températures des surfaces extrêmes du béton de chanvre, du béton normal et de la brique pour le modèle 1. La température des surfaces extrêmes de paroi en béton de chanvre varie plus vite que les autres parois du fait que son inertie thermique est la plus faible.

La figure 4.b montre la variation de la masse volumique de la vapeur d'eau des 3 matériaux et pour le modèle 1. Nous observons une augmentation rapide à la surface intérieure. Pour la surface extérieure, l'évolution de la masse volumique de la vapeur d'eau évolue faiblement. Pour la brique la masse volumique de la vapeur à la surface extérieure est plus élevée et elle atteint la valeur d'équilibre plus vite que les autres matériaux (après 20 jours) car elle a un coefficient de diffusion  $D_0$  largement supérieur aux autres.

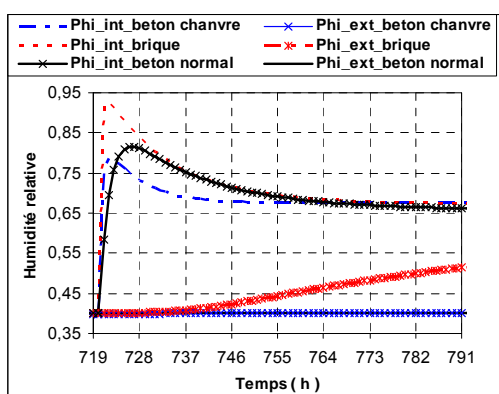


Figure 5a : Evolution de l'humidité relative

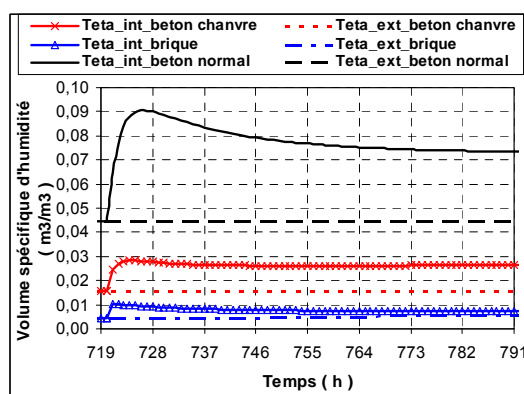


Figure 5b : Evolution de volume spécifique de l'humidité

Figure 5 : Evolutions de l'humidité relative et du volume spécifique d'humidité aux surfaces extrêmes du béton de chanvre, de la brique et du béton normal pour le modèle 1.

La figure 5.a montre l'évolution de l'humidité relative obtenue avec le modèle 1 pour le béton de chanvre, la brique et le béton normal. L'humidité relative à la surface intérieure augmente au début de la simulation puis elle diminue graduellement vers une valeur d'équilibre. Cela est dû au fait que l'humidité relative est le rapport entre la pression partielle et la pression de saturation de la vapeur d'eau. La pression partielle est proportionnelle à la masse volumique de vapeur d'eau et à la température tandis que la pression de saturation est une fonction exponentielle de la température. Dans la partie initiale de la modélisation, l'augmentation simultanée de la température et de la masse volumique de vapeur d'eau mène à une augmentation plus significative de la pression partielle que de la pression de saturation, par conséquent il y a une augmentation de l'humidité relative. Puis, lorsque la masse volumique de vapeur d'eau s'approche de la valeur d'équilibre et son augmentation s'affaiblit, l'augmentation de la pression de saturation l'emporte et l'humidité relative diminue.

La figure 5.b montre l'évolution du volume spécifique d'humidité qui représente le mouvement de l'humidité en phase liquide. Nous observons une même forme que l'évolution d'humidité relative car dans le domaine étudié les isothermes de sorption sont quasi linéaires.

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce papier, on a étudié le comportement hygrothermique d'une paroi monocouche en régime dynamique avec et sans prise en compte des transferts d'humidité. Un modèle de cette paroi a été implémenté dans l'environnement de simulation SPARK, ce qui nous a permis d'étudier le comportement du béton de chanvre et de le comparer à d'autres matériaux. Comparé à la brique extrudée, le béton de chanvre a une teneur en eau plus élevée mais laisse diffuser plus lentement l'humidité. Comparé au béton normal, le béton de chanvre est moins inerte et a une teneur en eau plus faible (pour des humidités relatives inférieures à 80%) mais il permet à la paroi de mieux respirer car l'humidité y diffuse plus rapidement. On peut remarquer que les résultats dépendent de la complexité du modèle utilisé et de l'équation de l'isotherme de sorption, d'où l'importance à accorder au choix du modèle (surtout si on s'intéresse à la teneur en eau dans le matériau). Les modèles en cours de développement vont permettre aussi de tenir compte de la variation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité relative. Il est intéressant de comparer les différents modèles en utilisant des simulations sous conditions réelles (en hiver ou en été pour des régions humides) et pour des parois multicouches afin de choisir le modèle permettant d'obtenir un compromis entre le temps de simulation et la précision. Les résultats seront ensuite validés à l'Université de Champagne Ardenne (ou même aussi par rapport à d'autres résultats expérimentaux de la littérature). Ceci permettra d'effectuer des simulations sur un bâtiment et permettra d'étudier l'interaction du béton de chanvre avec les charges internes.

## NOMENCLATURE

	Définition	Unité
b	coefficient de correction	-----
C	chaleur spécifique	Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
D <sub>T</sub>	coefficient de transport de masse de l'eau lié à un gradient de température	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
D <sub>T,v</sub>	coefficient de transport de la vapeur lié à un gradient de température	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>

$D_{\theta}$	coefficient de transport de masse d'eau associé à un gradient en humidité volumétrique	$m^2 s^{-1}$
$D_{0v}$	coefficient de transport de masse de la vapeur d'eau associé à un gradient en humidité volumétrique	$m^2 s^{-1}$
$h_M$	coefficient d'échange massique	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
$h_T$	coefficient d'échange convectif	$W.K^{-1}.m^{-2}$
T	température	$^{\circ}C$
t	temps	s
x	abscisse	m
$\theta$	volume spécifique de l'humidité	$m^3/m^3$
$\theta_f$	volume spécifique de l'humidité en humidité relative 100%	$m^3/m^3$
$\lambda$	conductivité thermique	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$\rho$	masse volumique	$kg.m^{-3}$

## 7. BIBLIOGRAPHIE

- Annex 41. Whole buiding Heat, Air, Moisture Response;  
<http://www.kuleuven.ac.be/bwf/projects/annex41/protected/overview.php>.
- Cerezo V. (2005). *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*, Thèse de Doctorat, INSA & ENTPE de Lyon, 242 p.
- Collet F. (2004). *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux*, Thèse de Doctorat, INSA de Rennes, 220 p.
- Elfordy S., F. Lucas, Tancret F., Scudeller Y., Goudet L.(2007). Mechanical thermal properties of lime and hemp concrete (« hempcrete ») manufactured by a projection process, *Construction and Building Materials*, (Article in press).
- Kunzel M. (1995). Simultaneous heat and moisture transport in building components, Fraunhofer Institute of building physics, Allemagne, 1995, disponible sur: [http://www.wufi.de/index\\_e.html](http://www.wufi.de/index_e.html) (section: Literatur).
- Mendes N. *Models for prediction of heat and moisture transfer through porous building element*, Thèse de doctorat, 225, Federal University of Santa Catarina, Florianopolis, SC, Brésil, 1997 (en portugais).
- Mendes N., Winkelmann F.C., Lamberts R., Philippi. (2003) Moisture effects on conduction loads, *Energy and Buiding*, v. 35, n. 7, p.631-644, 2003.
- Mendonça K.C. (2004). "Modélisation thermo-aéraulique des locaux climatisés selon l'approche zonale", Thèse de doctorat, Université de La Rochelle.
- Philip, J.R. and De Vries, D.A. (1957). Moisture movement in porous materials under temperature gradients, *Transaction of American Geophysical Union*. V.38, n.2, p.222-232, 1957.
- Sowell E.F., Haves P. (2001). Efficient solution strategies for building energy system simulation, *Energy and Buildings*, vol. 33, p. 309-317.
- WUFI. Wärme und Feuchte instationär consultable sur : [http://www.wufi.de/index\\_e.html](http://www.wufi.de/index_e.html) (section: Basics, Moisture Storage Function ).