

# Modélisation hygrothermique du béton de chanvre incluant les effets de l'hystérésis et de la perméabilité variable du matériau

Georges Costantine<sup>1\*</sup>, Chadi Maalouf<sup>1</sup>, Tala Moussa<sup>1,2</sup>, Elias Kinab<sup>3</sup>, Guillaume Polidori<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INSTITUT DE THERMIQUE, MÉCANIQUE, MATÉRIAUX (ITHEMM) - EA 7548, Université de Reims-Champagne-Ardenne URCA, Campus Moulin de la Housse, 51687 Reims

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, The International University of Beirut (BIU), Beirut, Lebanon

<sup>3</sup> Université Libanaise, Faculté de Génie, Branche II, Roumieh, Liban

\*[georges.costantine@univ-reims.fr](mailto:georges.costantine@univ-reims.fr), [chadi.maalouf@univ-reims.fr](mailto:chadi.maalouf@univ-reims.fr), [tala.moussa@univ-reims.fr](mailto:tala.moussa@univ-reims.fr),  
[elias.kinab@ul.edu.lb](mailto:elias.kinab@ul.edu.lb), [guillaume.polidori@univ-reims.fr](mailto:guillaume.polidori@univ-reims.fr)

---

*RESUME.* Les études expérimentales et numériques sur le béton de chanvre sont de plus en plus développées à l'échelle de la paroi. Néanmoins, la prise en compte de l'hystérésis hygroscopique entre ses courbes de sorption dans la modélisation reste un sujet controversé. Ce papier vise à valider le comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre en comparant deux modèles numériques : le premier, un modèle standard de transfert de chaleur et de masse utilisant la courbe moyenne de sorption ; et le second, un modèle tenant compte de l'hystérésis du béton de chanvre. L'impact de la perméabilité à la vapeur d'eau du béton de chanvre sur les résultats est aussi mis en question. Les résultats préliminaires montrent que le fait de tenir en compte de l'hystérésis du béton de chanvre et de modéliser sa perméabilité en fonction de la teneur en eau permettent de mieux prédire son comportement hygrothermique à l'échelle de la paroi.

*MOTS-CLÉS :* béton de chanvre, hystérésis, perméabilité à la vapeur

---

*ABSTRACT.* Experimental and numerical studies on hemp concrete are increasingly developed on the wall scale. However, the consideration of hygroscopic hysteresis between its sorption curves in the modeling remains a controversial subject. In this context, the aim of this paper is to validate the hygrothermal behavior of a hemp concrete wall by comparing two numerical models: the first, a standard model of heat and mass transfers using the average sorption curve; and the second, a model taking into account the hysteresis of hemp concrete. The impact of the vapor permeability of hemp concrete on the results is also tested. Preliminary results show that taking into account the hysteresis of hemp concrete and modelling its permeability as a function of water content improve the predict of its hygrothermal behavior on the wall scale.

*KEYWORDS:* hemp concrete, hysteresis, water vapor permeability

---

## 1. INTRODUCTION

L'amélioration de la qualité de l'air intérieur, la durabilité et l'optimisation des performances énergétiques des habitats sont devenues les enjeux majeurs du secteur du bâtiment français. Ceci est en rapport direct avec les niveaux d'humidité relative élevés qui stimulent la croissance des moisissures et augmentent les risques d'allergies et de maladies pulmonaires (Wolkoff 2018). Par conséquent, la prédiction de l'humidité relative dans les enveloppes bio-sourcées de bâtiments est d'une grande importance dans la modélisation numérique (Viitanen et al. 2010).

De nombreux modèles HAM (Heat And Moisture) qui prennent en compte différentes formes de transport de masse (phase liquide ou vapeur de l'eau) ont été développés et testés sur les parois en béton de chanvre (Samri 2008) (Evrard and De Herde 2010) (Maalouf et al. 2014) (Rahim et al. 2017). Dans ce contexte, en dépit des limites rencontrées dans de nombreux outils de simulation (Kwiatkowski et al. 2009) en raison de la complexité d'implémentation, le phénomène d'hystérésis d'un matériau hygroscopique a fait l'objet de plusieurs études. Dans ses travaux sur le béton de chanvre, Oumeziane (2013) a prouvé que considérer l'hystérésis du matériau améliore les résultats de la modélisation, en particulier pendant la phase de désorption en portant une attention particulière aux choix de conditions initiales représentant la vraie histoire hydrique du matériau. De plus, Lelievre et al. (2014) et Colinart et al. (2016) ont étudié le phénomène d'hystérésis dans les parois en béton de chanvre monocouches et multicouches. Ils ont montré que la prédiction du comportement hygrothermique est significativement améliorée lorsque l'hystérésis, initialisée à partir de la courbe de désorption, est prise en compte. D'un autre côté, Fabbri and McGregor (2017) ont suggéré des résultats prometteurs en utilisant la courbe de sorption moyenne en raison du fait que la capacité hydrique du béton de chanvre ne change pas fortement lorsque des cycles d'humidité relative modérée (entre 85% et 23% HR) sont appliqués.

Ces résultats montrent que l'impact de la prise en compte de l'hystérésis reste controversé à l'échelle de la paroi. Dans ce contexte, l'objectif de ce papier est d'appréhender le comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre à l'échelle de la paroi en utilisant deux modèles numériques : le premier est un modèle standard de chaleur et de masse basé sur la courbe moyenne de sorption. Et le deuxième tient en compte de l'hystérésis du béton de chanvre dans la modélisation. Les résultats sont comparés aux données expérimentales fournies par Lelievre et al. (2014). Dans une deuxième partie, l'impact de la perméabilité variable du béton de chanvre est testée. L'environnement orienté-objet SPARK est utilisé tout au long de l'étude (Tittlein 2008)(Tran et al. 2009).

## 2. MODELISATION DE L'HYSTERESIS

La modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse respecte le modèle d'Umudus (Mendes et al., 1999) basé sur la théorie de Philip et De Vries. Les équations de conservation de chaleur et de masse sont les suivantes (Costantine et al. (2020)),  $\theta$  étant la teneur volumique en eau ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $T$  la température en °C,  $D_T$  et  $D_\theta$  les coefficients de transports massiques sous gradient de température et de teneur en eau respectivement,  $\rho_0$  la masse volumique à l'état sec du matériau,  $Cp_m$  la capacité thermique moyenne,  $\lambda$  la conductivité thermique du matériau,  $L_v$  la chaleur latente de vaporisation et  $\rho_l$  la masse volumique de l'eau:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\rho_0 Cp_m \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \rho_l \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{\theta v} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \right) \quad (2)$$

Les courbes de sorption sont modélisées en utilisant l'approche empirique de Rode (Rode et al. 2007) (Rode et Grau 2008) applicable sur les matériaux hygroscopiques dans une plage d'humidité relative de (20 - 98%). L'équation de la courbe de sorption est donnée par:

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left( 1 - \frac{\ln \varphi}{A} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

où  $\theta_s$  est la teneur en eau maximale à saturation,  $\varphi$  l'humidité relative en % et A, n sont deux constantes de calibration. Physiquement, une hystérésis est observée entre les courbes de sorption des matériaux hygroscopiques, à savoir le béton de chanvre. Effectivement, l'eau n'est pas absorbée par les pores de ces matériaux de la même manière avec laquelle elle en est désorbée.

De nombreux modèles décrivant le phénomène d'hystérésis ont été présentés dans la littérature. En fait, trois modèles globaux peuvent être distingués: les modèles physiques développés par Mualem (1974), les modèles mathématiques de Kool et Parker (1987) et les modèles empiriques proposés par Pedersen (1990). Les deux premiers modèles sont prédictifs et ne nécessitent que la connaissance des courbes de sorption principales. Les modèles empiriques nécessitent au moins une courbe de sorption principale pour fonctionner correctement. Dans ce travail, grâce à la facilité de l'implémentation dans l'outil de simulation SPARK, l'approche empirique proposée par Rode-Pedersen sur le bois est retenue. Cette dernière s'appuie sur les valeurs pondérées des capacités hydriques du matériau ( $\xi$ ) ou, en d'autres termes, les pentes des courbes d'adsorption et de désorption données par:

$$\xi_{hys,a} = \frac{\gamma_a(\theta - \theta_a)^2 \xi_d + (\theta - \theta_a)^2 \xi_a}{(\theta_d - \theta_a)^2} \quad (4)$$

$$\xi_{hys,d} = \frac{(\theta - \theta_a)^2 \xi_d + \gamma_d(\theta - \theta_a)^2 \xi_a}{(\theta_d - \theta_a)^2} \quad (5)$$

où a et d représentent l'adsorption et la désorption, respectivement,  $\gamma_a$  et  $\gamma_d$  deux constantes de calibration. La modélisation de l'hystérésis permet de prendre en compte l'historique hydrique du matériau par identification des transitions entre les cycles d'adsorption et de désorption. Cette identification est effectuée en analysant les signes mathématiques des variations de la teneur en eau au temps actuel et celle aux pas de temps précédents.

### 3. VALIDATION A L'ECHELLE DE LA PAROI

Les propriétés du béton de chanvre sont mesurées expérimentalement par Lelievre et al. (2014) et sont résumées dans le tableau 1,  $w$  étant la teneur massique en eau dans le matériau ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) et T la température en K. Les isothermes de sorption du béton de chanvre sont aussi mesurées expérimentalement à 23 °C en utilisant la méthode gravimétrique de la norme ISO 12571 (ISO 2013).

Propriétés	Densité $\rho$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Capacité thermique $C_p$ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	Conductivité thermique $\lambda$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	Emissivité $\varepsilon$ (-)	Perméabilité $\pi$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ )
Béton de chanvre	450	1000	$0,00818 + 2,76 \times 10^{-4}T + 0,0024w$	0,8	$0,4 \times 10^{-10}$

Tableau (1) : Propriétés du béton de chanvre selon les mesures de Lelievre et al. (2014)

En appliquant la méthode des moindres carrés, les courbes de sorption sont calées suivant l'équation (3) comme montré dans Figure (1). D'autre part, le modèle de l'hystérésis proposé par Rode pour le bois est adapté pour le béton de chanvre. Les coefficients retenus de  $\gamma_a$  et  $\gamma_d$  retenus sont 0,85 et 0,97 respectivement. Cette calibration est effectuée en comparant les variations des masses expérimentales des échantillons en béton de chanvre données par Lelievre (2015) et celles prédites par le modèle numérique à hystérésis durant le protocole Nord Test (voir Figure (2)). Le but dans ce qui suit c'est

d'étudier le comportement hygrothermique d'une paroi de 36 cm en béton de chanvre (Figure (3)) à travers deux modèles numériques. Le premier est un modèle standard de transfert de chaleur et de masse se basant sur la courbe moyenne de sorption (Mod\_1). Le second tient en compte de l'hystérésis du béton de chanvre, initialisée à partir de la courbe d'adsorption (Mod\_2). La paroi est soumise pendant 87 jours à des cycles variables de température et d'humidité relative de son côté extérieur (Tableau (2)), tandis que son côté intérieur est en contact avec une ambiance de 23 °C et de 50 % d'humidité relative.

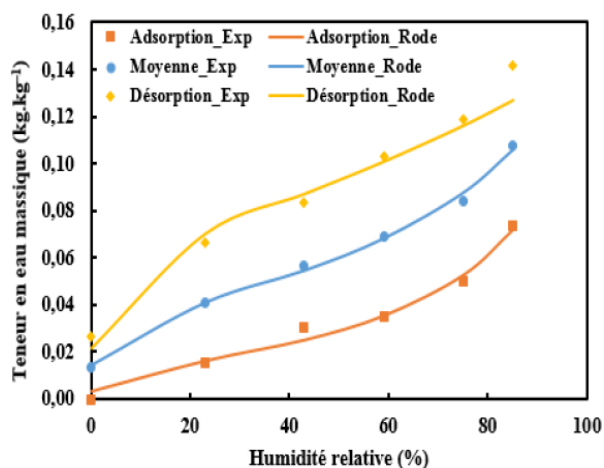


Figure (1) : Calage des isothermes de sorption selon le modèle de Rode

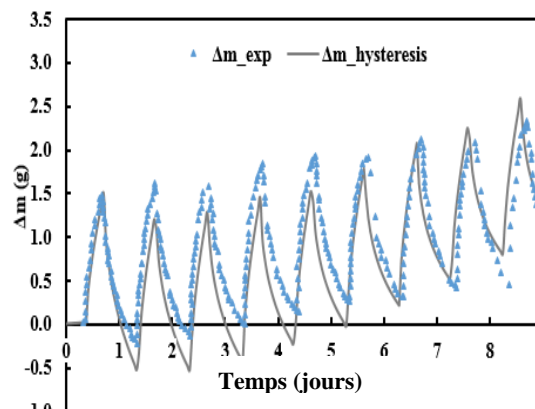
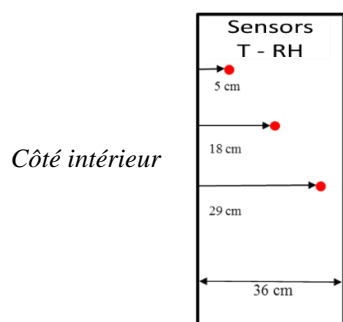


Figure (2) : Calage du modèle à hystérésis



Côté intérieur

Figure (3) : schéma de la paroi instrumentée

Conditions initiales :  $T_0 = 23 \text{ °C}$ ,  $HR_0 = 50 \%$ ,  $P_0 = 1400 \text{ Pa}$

Séquence n°	T (°C)	HR (%)	Pression vapeur (Pa)
1: [0 – 20 jours]	32	50	2360
2: [20 – 55 jours]	32	30	1400
3: [55 – 70 jours]	17	85	1400
4: [70 – 87 jours]	23	50	1400

Tableau (2): Conditions expérimentales du côté extérieur

#### 4. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de la simulation numérique pour les 2 modèles sont présentés ci-dessous. Pour éliminer les effets des conditions initiales, les courbes sont montrées à partir du 5ème jour de l'expérience. Les Figure (5), Figure (7) et Figure (9) montrent que les profils de température sont en accord avec les données expérimentales pour les deux modèles, notamment dans la 3ème séquence avec une sur-prédiction de 0,5 à 1,5 °C dans les première et dernière séquences. Les courbes de l'humidité relative montrent des avantages significatifs pour Mod\_2 surtout dans les deux dernières séquences lorsque la paroi est sollicitée (Figure (4) et Figure (8)). Tandis que Mod\_1 montre des montées réduites et de faibles pics d'humidité relative (Figure (4)). Au milieu de la paroi (Figure (6)), l'évolution dynamique de l'humidité relative est mieux prédite pour Mod\_2. Cependant, les profils ne correspondent pas bien aux mesures expérimentales pour les deux modèles. Ces écarts considérables sont aussi obtenus par Lelievre et al. (2014) au milieu de la paroi. D'ailleurs, vu que les incertitudes sur la position et les mesures des capteurs peuvent dépasser 5 % pour l'humidité relative (Sensirion SHT 75) et 0,8 °C pour la température (thermocouples de type K) (Lelievre (2015)), les deux modèles sont ainsi validés à

l'échelle de la paroi. De plus, Mod\_1 ignorant l'hystérésis, fonctionne bien pendant les 55 premiers jours. Plus tard, lorsque les cycles de conditions d'adsorption et de désorption sont appliqués, la prise en compte de l'hystérésis (Mod\_2) améliore la prédiction de l'humidité relative. Concernant les variations de température, il s'avère que la prise en compte de l'hystérésis n'améliore pas les prédictions du modèle standard (Mod\_1) et les deux modèles donnent des résultats proches tout au long de l'expérience.

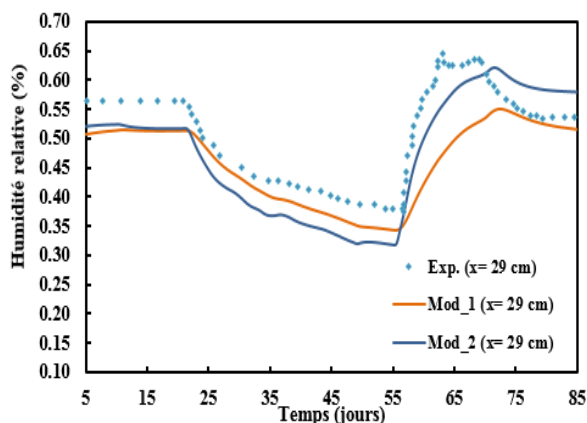


Figure (4) : Comparaison des humidités relatives pour  $x=29$  cm

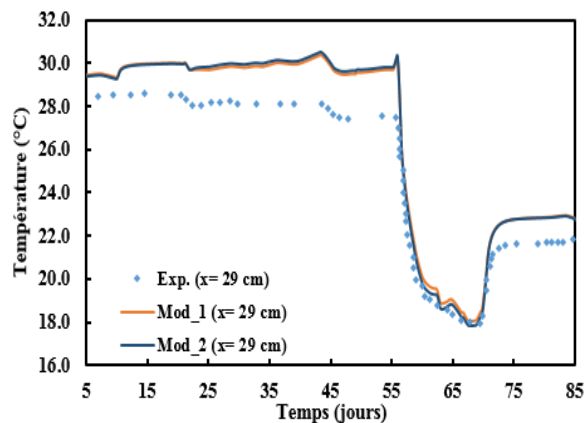


Figure (5) : Comparaison des températures pour  $x=29$  cm

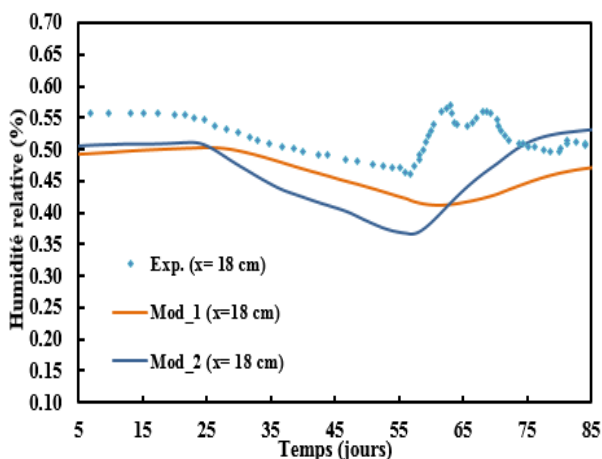


Figure (6) : Comparaison des humidités relatives pour  $x=18$  cm

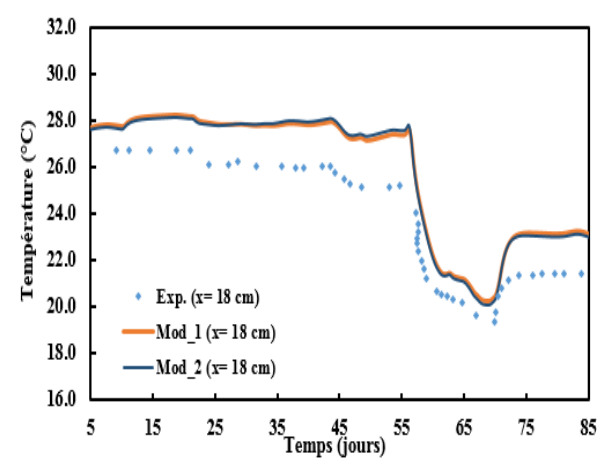


Figure (7) : Comparaison des températures pour  $x=18$  cm

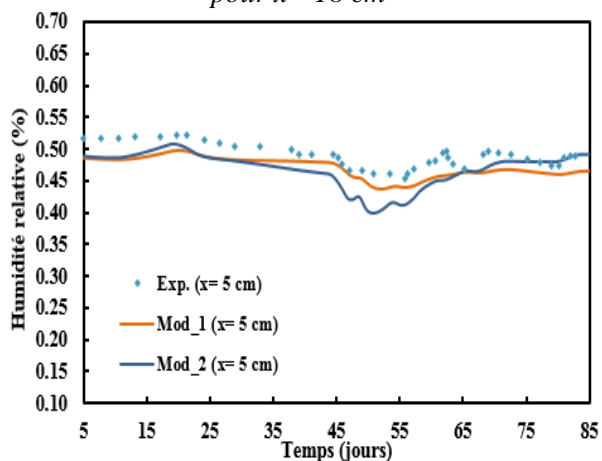


Figure (8) : Comparaison des humidités relatives pour  $x=5$  cm

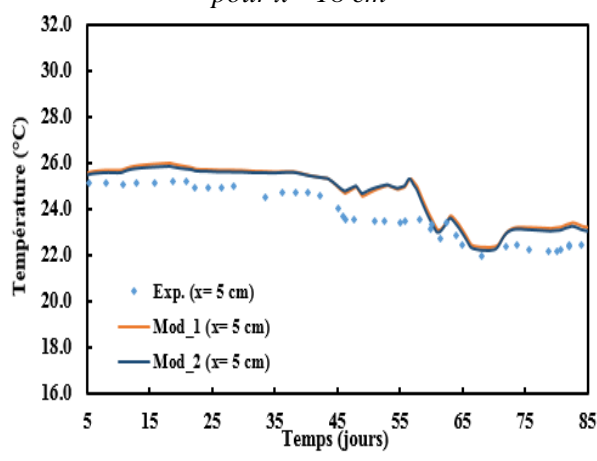


Figure (9) : Comparaison des températures pour  $x=5$  cm

Les simulations précédentes sont effectuées avec une perméabilité constante du béton de chanvre ( $\pi = 0.4 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ). Cependant, selon Collet et al. (2013), la perméabilité à la vapeur du béton de chanvre  $\pi$  doit être exprimée en fonction de l'humidité relative locale  $\varphi$ , comme le montre l'équation (6). Au contraire, Derluyn et al. (2007; 2012) et Derome et al. (2008) ont montré que la perméabilité à la vapeur d'eau dans un matériau hystérétique dépend de la teneur en eau  $\theta$  et non de l'humidité relative  $\varphi$  (équation (7)). Par conséquent, des cas supplémentaires sont réalisés pour Mod\_2 en tenant compte de la perméabilité variable du béton de chanvre et sont présentés ci-dessous des côtés intérieur et extérieur de la paroi.

$$[f(\varphi)] = 0.32 \times 10^{-10} + 5.18 \times 10^{-10} \times \varphi^{8,38} \quad (6)$$

$$\pi[f(\theta)] = \pi[g^{-1}(\theta)] \text{ avec } g(\theta) = \theta_s \left(1 - \frac{\ln \varphi}{A}\right)^{-\frac{1}{n}} \quad (7)$$

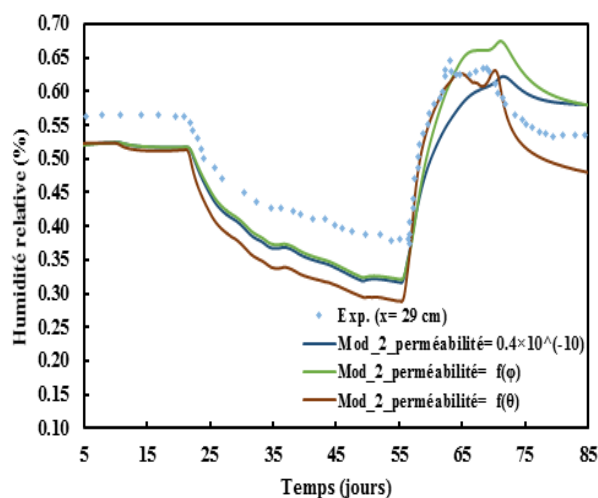


Figure (10) : Comparaison des humidités relatives pour  $x= 29 \text{ cm}$  avec perméabilité variable

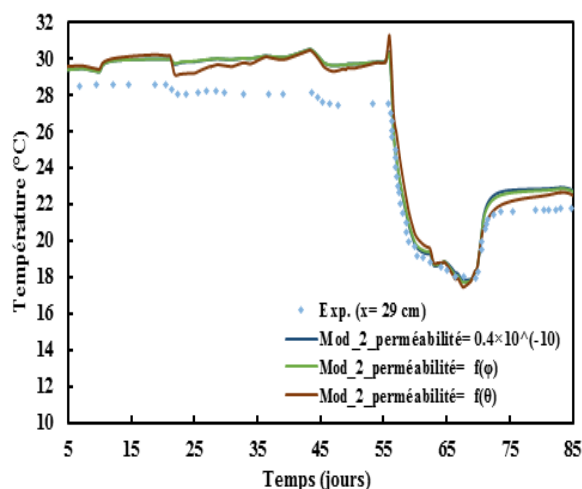


Figure (11) : Comparaison des températures pour  $x= 29 \text{ cm}$  avec perméabilité variable

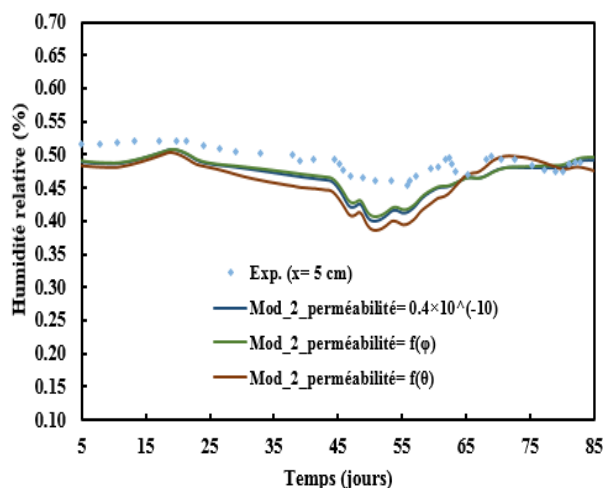


Figure (12) : Comparaison des humidités relatives pour  $x= 5 \text{ cm}$  avec perméabilité variable

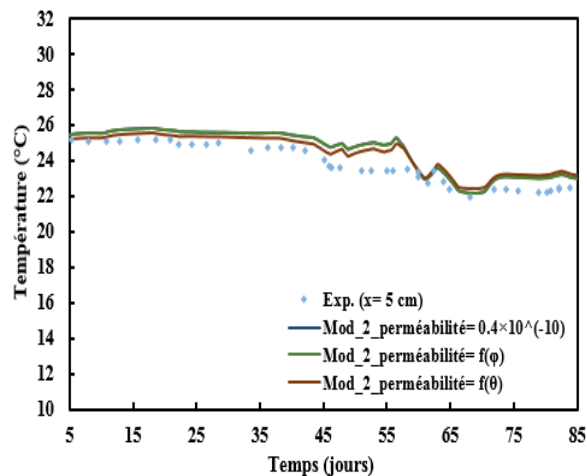


Figure (13) : Comparaison des températures pour  $x= 5 \text{ cm}$  avec perméabilité variable

Les Figure (10) et Figure (12) montrent que la perméabilité variable du béton de chanvre conduit à des variations significatives de la dynamique de l'humidité relative en comparaison avec la perméabilité

constante. En outre, concernant les deux côtés extérieur (Figure (10)) et intérieur de la paroi (Figure (12)), la perméabilité variable en fonction de la teneur en eau est mieux adaptée que celle en fonction de l'humidité relative locale dans la prédiction de l'humidité relative. En ce qui concerne la prévision des températures (Figure (11) and Figure (13)), des améliorations jusqu'à 0,3 ° C au cours des 55 premiers jours sont observées lorsque la perméabilité du béton de chanvre dépend de la teneur en eau dans la paroi. De plus, les résultats sont améliorés de 0,5 ° C dans la dernière séquence du côté extérieur avec une perméabilité prise en fonction de la teneur en eau. En conclusion, les résultats montrent que la prise d'une perméabilité en fonction de la teneur en eau du matériau  $\theta$  améliore la prédiction du comportement hygrothermique du béton de chanvre avec les modèles tenant en compte de l'hystérésis.

## 5. CONCLUSIONS

Dans ce travail, une étude numérique du béton de chanvre à l'échelle de la paroi est effectuée. Un aspect physique essentiel, relatif à tous les matériaux hygroscopiques, y compris le béton de chanvre est étudié. Il s'agit de l'hystérésis entre les courbes de sorption et son impact sur la prédiction du comportement hygrothermique du matériau, une fois prise en compte dans la modélisation. Pour ce faire, deux modèles numériques sont créés et implémentés sous le logiciel SPARK. L'un sans hystérésis et l'autre prenant un compte de l'hystérésis dans la modélisation.

Les résultats montrent que l'hystérésis qui permet de prendre en compte l'historique hydrique du matériau permet d'améliorer la prédiction de son comportement hygrothermique à l'échelle de la paroi. Cependant, une attention particulière doit être portée aussi à la modélisation de la perméabilité à la vapeur du matériau. Il a été montré que considérer une perméabilité variable du béton de chanvre permet de mieux prédire l'évolution dynamique des températures et humidités relatives dans la paroi, surtout en utilisant une perméabilité dépendante de la teneur en eau dans le matériau dans les modèles hystériques. Toutefois, il reste à signaler que le modèle standard à courbe de sorption moyenne montre des performances intéressantes en particulier du côté intérieur de la paroi.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- Colinart, T, D Lelievre, and P Glouannec. 2016. "Experimental and Numerical Analysis of the Transient Hygrothermal Behavior of Multilayered Hemp Concrete Wall." *Energy and Buildings* 112: 1–11.
- Collet, F, J Chamoin, S Pretot, and C Lanos. 2013. "Comparison of the Hygric Behaviour of Three Hemp Concretes." *Energy and Buildings* 62 (July): 294–303.
- Costantine, Georges, Chadi Maalouf, Tala Moussa, Elias Kinab, and Guillaume Polidori. 2020. "Hygrothermal Evaluation of Hemp Concrete at Wall and Room Scales: Impact of Hysteresis and Temperature Dependency of Sorption Curves." *Journal of Building Physics*, January, 174425911989638.
- Derluyn, H, D Derome, J Carmeliet, E Stora, and R Barbarulo. 2012. "Hysteretic Moisture Behavior of Concrete: Modeling and Analysis." *Cement and Concrete Research* 42 (10): 1379–88.
- Derluyn, H, H Janssen, J Diepens, D Derome, and J Carmeliet. 2007. "Hygroscopic Behavior of Paper and Books." *Journal of Building Physics* 31 (1): 9–34.
- Derome, D, H Derluyn, W Zillig, and J Carmeliet. 2008. "Model for Hysteretic Moisture Behaviour of Wood." In *Proceedings of the Nordic Symposium on Building Physics*, 959–66. Copenhagen, Denmark.

- Evrard, A, and A De Herde. 2010. "Hygrothermal Performance of Lime–Hemp Wall Assemblies." *Journal of Building Physics* 34 (1): p.5-25.
- Fabbri, A, and F McGregor. 2017. "Impact of the Determination of the Sorption-Desorption Curves on the Prediction of the Hemp Concrete Hygrothermal Behaviour." *Construction and Building Materials* 157 (December): 108–16.
- ISO. 2013. "Hygrothermal Performance of Building Materials and Products-Determination of Hygroscopic Sorption Properties." Switzerland.  
<https://www.sis.se/api/document/preview/916472/>.
- Kwiatkowski, J, M Woloszyn, and J Roux. 2009. "Modelling of Hysteresis Influence on Mass Transfer in Building Materials." *Building and Environment* 44 (3): 633–42.
- Lelievre, D, T Colinart, and P Glouannec. 2014. "Hygrothermal Behavior of Bio-Based Building Materials Including Hysteresis Effects: Experimental and Numerical Analyses." *Energy and Buildings* 84 (December): 617–27.
- Lelievre, Dylan. 2015. "Simulation Numérique Des Transferts de Chaleur et d'humidité Dans Une Paroi Multicouche de Bâtiment En Matériaux Biosourcés." Université Bretagne-Sud.
- Maalouf, C., A.D Tran Le, S.B Umurigirwa, M Lachi, and O Douzane. 2014. "Study of Hygrothermal Behaviour of a Hemp Concrete Building Envelope under Summer Conditions in France." *Energy and Buildings* 77 (July): 48–57.
- Mualem, Y. 1974. "A Conceptual Model of Hysteresis." *Water Resources Research* 10 (3): 514–20.
- Oumeziane, Y. A. 2013. "Evaluation Des Performances Hygrothermiques d'une Paroi Par Simulation Numérique : Application Aux Parois En Béton de Chanvre." INSA de Rennes.
- Pedersen, C. R. 1990. "Transient Calculation on Moisture Migration Using a Simplified Description of Hysteresis in the Sorption Isotherms." *Proceedings of the 2nd Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*, no. Trondheim, Norway.
- Rahim, M, O Douzane, A.D Tran Le, G Promis, and T Langlet. 2017. "Experimental Investigation of Hygrothermal Behavior of Two Bio-Based Building Envelopes." *Energy and Buildings* 139 (March): 608–15.
- Samri, D. 2008. "Analyse Physique et Caractérisation Hygrothermique Des Matériaux de Construction."
- Viitanen, H, J Vinha, K Salminen, T Ojanen, R Peuhkuri, L Paajanen, and K La'hdesmäki. 2010. "Moisture and Bio-Deterioration Risk of Building Materials and Structures." *Journal of BUILDING PHYSICS* 33 (3).
- Wolkoff, P. 2018. "Indoor Air Humidity, Air Quality, and Health – An Overview." *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 221 (3): 376–90.