

# Influence de l'hystérésis sur le comportement hygrothermique d'une paroi multicouche de bâtiment

Dylan LELIEVRE<sup>1</sup>, Thibaut COLINART<sup>1\*</sup>, Anthony MAGUERESSE<sup>1</sup>, Patrick GLOUANNEC<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne (LIMATB) - EA4250

Université de Bretagne-Sud, Université Européenne de Bretagne

Rue de Saint Maudé, BP 92 116, 56 321 Lorient Cedex

(\* auteur correspondant : thibaut.colinart@univ-ubs.fr)

**Résumé** – Cette communication porte sur l'analyse des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment. Celle-ci est constituée d'une couche de béton de chanvre recouverte de mortiers de chaux sur sa face extérieure et de couches d'enduits (à base de chaux et de sable ou de chanvre) sur sa face intérieure. La description numérique des transferts dans chaque couche se base sur un modèle qui a été développé et validé lors de l'étude du comportement hygrothermique du béton de chanvre seul [1]. Le modèle tient compte en particulier des phénomènes de changement de phase, mais également de l'hystérésis des courbes de sorption. Les résultats numériques sont comparés à des données expérimentales (température, humidité relative) obtenues sur une paroi de 6 m<sup>2</sup> placée dans une enceinte bi-climatique [2]. Les résultats montrent un accord satisfaisant entre les simulations et les expériences. Par ailleurs, on note que la prise en compte de l'hystérésis dans la modélisation conduit à des variations d'humidité plus importantes et nécessite de lever une incertitude sur la teneur en eau initiale.

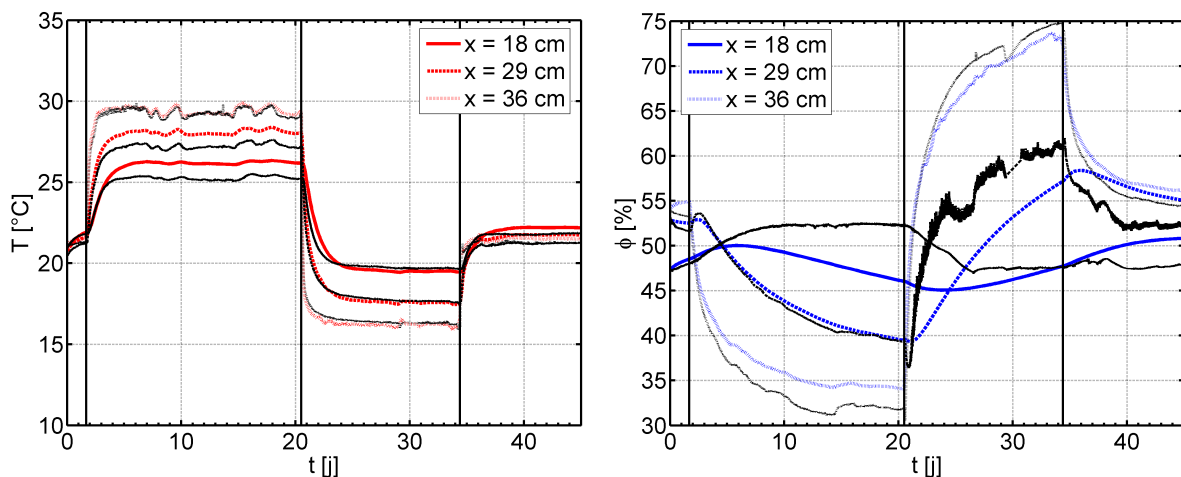


Figure 1 : Evolutions expérimentales et simulées de la température (gauche) et de l'humidité relative (droite) à 18, 29 et 36 cm dans une paroi multicouche de béton de chanvre.

## Références

- [1] Lelièvre D., Colinart T., Glouannec P., Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses, *Energy Build.* 84 (2014), 617–627
- [2] Colinart T., Glouannec P., Pierre T., Chauvelon P., Experimental study on the hygrothermal behavior of a coated sprayed hemp concrete wall, *Buildings* 3 (2013), 79–99

## Nomenclature

$c_p$	capacité thermique, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$D^T$	coefficient de diffusion, $kg \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}$
$D^\varphi$	coefficient de diffusion, $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
$e$	épaisseur, $m$
$h_c$	coefficient de convection, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$h_r$	coefficient de rayonnement, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$L_v$	chaleur latente de vaporisation, $J \cdot kg^{-1}$
$p_v$	pression de vapeur, $Pa$
$S$	surface d'échange, $m^2$
$T$	température, $^\circ C$
$t$	temps, $s$
$x$	abscisse, $m$
$w$	teneur en eau, $kg \cdot kg^{-1}$

### *Symboles grecs*

$\beta$	coefficient de convection massique, $s \cdot K \cdot m^{-1}$
$\theta$	capacité hydrique, -
$\lambda$	conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\mu_v$	facteur de résistance à la diffusion de la vapeur, -
$\rho_s$	masse volumique sèche, $kg \cdot m^{-3}$
$\phi$	humidité relative, -

### *Indices et exposants*

<i>ext</i>	extérieur
<i>int</i>	intérieur
<i>l</i>	liquide
<i>v</i>	vapeur

## 1. Introduction

Durant les dernières décennies, un grand nombre de travaux traitant de l'efficacité énergétique des bâtiments ont montré les effets positifs des matériaux hygroscopiques sur la consommation énergétique du bâtiment [3], sur les performances des systèmes de conditionnement d'air [4] ou sur la qualité des ambiances intérieures en raison d'un amortissement des variations d'humidité relative [5][6]. Cependant, la fiabilité de ces résultats numériques dépend de la qualité de la description des transferts de chaleur et de masse dans les matériaux et aux interfaces avec l'air. Si les résultats de l'annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie ont montré une prédiction satisfaisante du comportement hygrothermique des matériaux hygroscopiques [7], certains travaux complémentaires soulignent l'importance d'améliorer la description des phénomènes physiques, en prenant en compte l'hystérésis des courbes de sorption [8][9]. Par ailleurs, dès lors qu'on s'intéresse à des parois multicouches de bâtiment, il convient alors de gérer les difficultés numériques aux interfaces, notamment en raison des discontinuités de teneur en eau [10].

Alors que les matériaux hygroscopiques classiques, tels que le plâtre ou le béton cellulaire, ont été abondamment étudiés dans la littérature, une attention croissante est portée sur le comportement hygrothermique des matériaux biosourcés, comme les mélanges chanvre-chaux, en raison de leur qualité environnementale [11] et de leurs propriétés hygrothermiques intéressantes [12][13]. Dubois [14] a développé un modèle négligeant l'hystérésis et l'a confronté à des données expérimentales mesurées sur un échantillon de béton de chanvre. Tran Le [15] a évalué la performance énergétique de bâtiment avec une enveloppe de béton de chanvre, mais n'ont pu valider leur résultats au regard de données expérimentales. Enfin, Aït Oumeziane [16] a amélioré le modèle de Kunzel [17] en tenant compte de l'hystérésis et l'a comparé à des mesures de température et d'humidité relative dans une paroi multicouche de béton de chanvre. Si la prédiction est satisfaisante pour des tests isothermes, des différences notables subsistent pour des tests non-isothermes.

Dans cette étude, on s'attache donc à étudier le comportement hygrothermique d'une paroi multicouche de béton de chanvre en conditions non-isotherme. 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 [1]. Les résultats numériques de ce modèle sont ensuite confrontés à des données expérimentales obtenues sur une paroi instrumentée [2] en s'appuyant des analyses de sensibilité.

## 2. Présentation du dispositif expérimental en enceinte bi-climatique

Dans le cadre du projet ANR BETONCHANVRE, un dispositif d'essai en enceinte bi-climatique a été mis en place au sein du laboratoire pour étudier des parois de 6 m<sup>2</sup> de surface. Dans cette étude, la paroi est composée de 36 cm de béton de chanvre projeté et d'enduits de dégrossi et de finition d'environ 1 cm d'épaisseur sur les faces intérieure et extérieure [2]. Respectant les pratiques professionnelles, l'enduit de finition intérieur est un mélange chaux/chanvre, alors que les trois autres enduits sont des mélanges chaux/sable.

Afin d'accéder aux champs de température  $T$  et d'humidité relative  $\phi$  dans la paroi, des thermohygromètres de type Sensirion SHT-75 ont été implantés au sein du béton de chanvre et aux interfaces avec les enduits (cf. Figure 2). En raison de leur petite taille ( $\varnothing$  6 mm), l'implantation est peu intrusive ; la précision « constructeur » est de  $\pm 0,3$  °C et  $\pm 2$  %. Dans les ambiances intérieure et extérieure, les températures  $T$  et humidités relatives  $\phi$  sont contrôlées indépendamment et mesurées au centre des chambres par des thermohygromètres.

Au final, ce dispositif expérimental permet donc d'étudier la réponse hygrothermique d'une paroi multicouche de bâtiment soumise à diverses sollicitations climatiques [2].

## 3. Modèle hygrothermique de paroi associé à l'expérience

### 3.1. Equations constitutives du problème

La description à l'échelle macroscopique des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans des matériaux poreux hygroscopiques est réalisée sous les hypothèses suivantes :

- les milieux sont supposés homogènes, continus et non déformables ;
- l'équilibre thermodynamique est atteint localement entre les phases ;
- les phénomènes de convection interne et de thermo-migration de la phase liquide, ainsi que les effets de la gravité sont négligés.

Enfin, la pression totale de la phase gazeuse étant supposée constante, deux variables d'état suffisent à décrire ce problème. Ici, la température  $T$  et l'humidité relative  $\phi$  sont choisies en raison de leur caractère continu aux interfaces.

L'équation de conservation de l'humidité (phase liquide + vapeur) s'écrit :

$$\rho_s \theta \frac{\partial \phi}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left( - (D_v^\phi + D_l^\phi) \frac{\partial \phi}{\partial x} - D_v^T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

avec  $\theta = \partial w / \partial \phi$  la capacité hydrique du matériau. Les isothermes de sorption des matériaux du bâtiment présentant fréquemment une hystérésis, la capacité hydrique ne peut être calculée au moyen d'une courbe unique, mais doit être déterminée à l'aide d'un modèle d'hystérésis [18]. Dans ce travail, le modèle de Mualem [19] est choisi pour évaluer la capacité hydrique durant les phases d'adsorption et de désorption :

$$\theta_{ad,hys} = \frac{w_f - w_{des}(\phi_i)}{w_f - w_{ad}(\phi_i)} \theta_{ad} \quad (2)$$

$$\theta_{des,hys} = \frac{w_f - w_{des}}{w_f - w_{ad}} \theta_{ad} - \left( w_{ad}(\phi_j) - w_{ad} \right) \frac{(w_f - w_{des}) \theta_{ad} - (w_f - w_{ad}) \theta_{des}}{(w_f - w_{ad})^2} \quad (3)$$

avec  $w_{ad}$  et  $\theta_{ad}$  (resp.  $w_{des}$  et  $\theta_{des}$ ) la teneur en eau et la capacité hydrique de la courbe d'adsorption principale (resp. désorption),  $w_f$  la teneur en eau à saturation libre et  $\phi_i$  et  $\phi_j$  les humidités relatives minimale et maximale atteintes durant un cycle d'adsorption/désorption.

Les coefficients de diffusion massiques de vapeur et de liquide s'écrivent :

$$D_v^\phi = \frac{\delta_{p,a}}{\mu_v} p_{v,sat}, \quad D_v^T = \frac{\delta_{p,a}}{\mu_v} \frac{\partial p_{v,sat}}{\partial T} \quad \text{et} \quad D_l^\phi = \theta \exp\left(p_1 + \frac{p_2}{w}\right) \quad (4)$$

où  $\delta_{p,a}$  est la perméabilité de l'air sec à la vapeur d'eau (en  $\text{kg.m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ),  $\mu_v$  est le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur,  $p_{v,sat}$  la pression de vapeur saturante et  $p_1$  et  $p_2$  deux coefficients empiriques.

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

$$\rho_s (c_{p,s} + w c_{p,l}) \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_v^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} + D_v^T \frac{\partial T}{\partial x} \right) (L_v + c_{p,v} - c_{p,l} (T - T_{réf})) \quad (5)$$

avec  $L_v$  la chaleur latente de vaporisation de l'eau (en  $\text{J.kg}^{-1}$ ) et  $T_{réf}$  une température de référence que l'on fixe ici à  $23^\circ\text{C}$ .

### 3.2. Conditions aux limites et initiales

Aux interfaces entre matériaux, un contact parfait est supposé entre les différentes couches, ce qui implique une continuité des températures et des flux thermiques, mais également des humidités relatives et des flux massiques. Aux interfaces avec les ambiances, des conditions de convection et rayonnement sont imposées :

$$-\left( -\left( D_v^\phi + D_l^\phi \right) \frac{\partial \phi}{\partial x} - D_v^T \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \beta \left( \frac{p_{v,air}}{T_{air}} - \frac{p_{v,surf}}{T_{surf}} \right) \quad (6)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} - \left( -D_v^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} - D_v^T \frac{\partial T}{\partial x} \right) (L_v + c_{p,v} - c_{p,l} (T - T_{réf})) = h_c (T_{air} - T_{surf}) + h_r (T_p - T_{surf}) \quad (7)$$

avec  $h_c$  et  $\beta$  les coefficients de transfert de chaleur et de masse par convection. Les échanges radiatifs avec les parois de l'enceinte climatique sont pris en compte à l'aide d'un coefficient d'échange  $h_r$ . On note  $T_p$  la température de la surface de ces parois.

Les conditions initiales de température et d'humidité relative sont celles relevées en différents points de la paroi à l'instant  $t = 0$  et extrapolées sur toute son épaisseur. Les simulations sont réalisées à l'aide de COMSOL Multiphysics®.

### 3.3. Paramètres de simulation

Les propriétés thermophysiques des matériaux ont été caractérisées au sein du laboratoire. Une synthèse est présentée dans le Tableau 1, alors que la Figure 3 montre les courbes de sorption principales mesurées selon le protocole défini dans la norme ISO 12571. On constate notamment que les enduits présentent un caractère moins hygroscopique, un facteur de résistance à la diffusion de vapeur et une conductivité thermique plus élevée que le béton de chanvre, jouant ainsi le rôle de barrière hygrique dans cette paroi.

	Unité	Béton de chanvre	Enduit de chanvre	Enduit sable chaud	Méthode de Caractérisation	Référence
$\rho_s$	$\text{kg.m}^{-3}$	450	935	1650	Pesée et mesure	EN 1015
$c_p$	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	1070	1000	820	Micro-calorimètre	[12]
$\lambda$	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	0,1	0,2	0,5	Ruban chaud	[12]
$\mu_v$	-	5	10	20	Coupelle sèche	ISO 12572

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques des matériaux constituant la paroi multicouche.

## 4. Résultats et discussion

La séquence expérimentale étudiée est menée selon le protocole suivant : la paroi est initialement conditionnée à 23 °C et 50 % jusqu'à stabilisation des températures et humidités relatives en son sein ; du côté intérieur, la température et l'humidité relative sont maintenues à 23 °C et 50 % ; du côté extérieur, la température et l'humidité relative sont portées successivement à 32 °C et 30 % durant 19 jours, 16 °C et 77 % durant 15 jours et à 23 °C et 50 % durant 13 jours tout en maintenant la pression de vapeur constante à environ 1400 Pa. Ces variations visent à entraîner des phénomènes d'adsorption et de désorption dans la paroi. La Figure 2 présente les évolutions de  $T$  et  $\phi$  dans les enceintes intérieure et extérieure, pour lesquelles on constate une bonne stabilité des consignes.

Les profils initiaux de température et d'humidité relative mesurés dans la paroi sont tracés sur la Figure 4a et présentent respectivement des valeurs de l'ordre de  $21,5 \pm 1$  °C et  $51 \pm 3$  %. En revanche, le dispositif expérimental ne permet pas de quantifier la teneur en eau initiale. Néanmoins, elle peut être estimée en considérant les conditions ambiantes auxquelles a été soumise la paroi depuis sa construction. Le béton de chanvre et les enduits, qui ont été fabriqués par voie humide [2], ont d'abord été séché à 23 °C et 50 % : la teneur en eau a évolué le long de la courbe de désorption principale  $w_{des}$ . Dans un second temps, la paroi a été soumise à plusieurs cycles d'adsorption et de désorption durant lesquels l'humidité relative a atteint une valeur minimale de 40 % : la teneur en eau a évolué depuis la courbe de désorption principale  $w_{des}$  vers une courbe d'adsorption primaire  $w_{ad40\%}$  démarrant depuis une humidité relative de 40 %. Ces deux courbes limites sont représentées pour le béton de chanvre sur la Figure 4b. Au final, deux cas sont considérés pour la teneur en eau initiale (cf. Figure 4b) :

- a. Elle est située sur la courbe de désorption principale ( $w_{init1}$ ),
- b. Elle est située sur une courbe d'adsorption primaire démarrant depuis une humidité relative minimale de 40% ( $w_{init2}$ ).

Les Figures 1 montrent les évolutions mesurées et simulées de  $T$  et  $\phi$  dans la paroi. Pour des raisons de lisibilité, seules les données les plus proches de la sollicitation (à 18, 29 et 36 cm) sont tracées, les autres étant disponibles dans [18]. Expérimentalement, on observe que les valeurs mesurées de  $T$  et  $\phi$  dans la paroi suivent les sollicitations appliquées sur la face extérieure, avec une diminution de l'amplitude et un retard croissant en fonction de la profondeur. Le régime permanent est atteint pour les températures, contrairement aux humidités relatives : cela indique des cinétiques plus lentes pour les transferts hydriques.

Les simulations présentées sur les Figures 1 sont effectuées en imposant une teneur en eau initiale  $w_{init2}$ . Une confrontation très satisfaisante, en terme d'amplitude et de transitoire, est observée pour les températures. Ce point est confirmé par l'analyse des profils de température évalués en régime quasi permanent à la fin de chaque séquence expérimentale (cf. Figure 5a). De même, les variations de  $\phi$  sont dans l'ensemble fidèlement reproduites à différentes positions dans la paroi, hormis un écart dans le transitoire de la phase d'adsorption à 29 cm. Cependant, compte tenu de l'incertitude de la mesure, un bon accord est observé entre les profils simulés et mesurés en régime quasi-permanent (cf. Figure 5b).

L'influence de la teneur en eau initiale sur les valeurs de  $\phi$  à 29cm et 36cm est analysée sur les Figures 6. On observe des différences entre les simulations effectuées avec  $w_{init1}$  et  $w_{init2}$  durant la première phase de désorption, puis un écart constant entre les deux courbes durant la suite de la séquence. Lorsque la teneur en eau initiale est supposée égale à  $w_{init1}$  (i.e. sur la courbe de désorption principale), la capacité hydrique est plus élevée que pour une teneur en eau initiale égale à  $w_{init2}$  (cf. Figure 4b) : cela signifie que les variations de  $\phi$  sont plus faibles pour un flux d'humidité donné (cf. Figure 6). Dès lors que l'humidité relative a atteint un

minimum, les teneurs en eau suivent des courbes d'adsorption principales présentant des pentes similaires, ce qui explique les évolutions parallèles de  $\phi$  durant les deux autres phases.

Pour juger de la pertinence d'un modèle d'hystérésis, les Figures 6 présentent également une simulation réalisée avec la courbe de désorption principale uniquement. Logiquement, aucune différence n'est observée durant la première phase de désorption. En revanche, durant les deux autres phases, les variations d'humidité relative sont nettement plus amorties lorsque l'hystérésis n'est pas prise en compte, en raison d'une capacité hydrique plus grande.

## 5. Conclusion

Un modèle décrivant des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans l'enveloppe d'un bâtiment a été développé en tenant compte de l'hystérésis de teneur en eau et confronté à des champs de température et d'humidité relative mesurés sur une paroi multicouche en béton de chanvre. Même si la concordance n'est pas parfaite en tout point et tout temps, elle reste néanmoins satisfaisante compte tenu de l'hétérogénéité des matériaux (en terme de composition), de l'incertitude expérimentale (teneur en eau initiale, position et sensibilité des capteurs), ainsi que de l'incertitude sur les propriétés hygrothermiques. De plus, il apparaît que la prise en compte de l'hystérésis dans la modélisation conduit à des variations d'humidité plus importantes et nécessite de lever une incertitude sur la teneur en eau initiale.

## Références

- [3] Osanyintola O.F., Simonson C.J., Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact, *Energy Build.* 38 (2006), 1270–1282.
- [4] Woloszyn M., Kalamees T., Abadie M.O., Steeman M., Kalagsidis S.A., The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings, *Build. Environ.* 44 (2009), 515–524.
- [5] Simonson C.J., Salonvaara M., Ojanen T., Heat and Mass Transfer between Indoor Air and a Permeable and Hygroscopic Building Envelope, Part II – Verification and Numerical Studies, *J. therm. envel. build. sci.* 28 (2004), 161-185.
- [6] Yang X., Fazio P., Ge H. Rao J., Evaluation of moisture buffering capacity of interior surface materials and furniture in a full-scale experimental investigation, *Build. Environ.* 47 (2012), 188–196.
- [7] Woloszyn M., Rode C., Roux J.-J., Synthèse sur la modélisation thermo-hygro-aéroulque des batiments dans l'Annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie, *Conférence IBSPA*, Lyon 2008
- [8] Kwiatkowski J., Woloszyn M., Roux J.-J., Modelling of hysteresis influence on mass transfer in building materials, *Build. Environ.* 44 (2009), 633–642.
- [9] Steeman M., Van Belleghem M., De Paepe M., Janssens A., Experimental validation and sensitivity analysis of a coupled BES-HAM model, *Build. Environ.* 45 (2010) 2202-2217.
- [10] Tariku F., Kumaran K., Fazio P., Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 53 (2010), 3035-3044
- [11] Prétot S., Collet F., Garnier C., Life cycle assessment of a hemp concrete wall: impact of thickness and coating, *Build. Environ.* 72 (2013), 223-231.
- [12] Pierre T., Colinart T., Glouannec P., Measurement of thermal properties of biosourced building materials, *Int. J. Thermophys.* 35 (2014), 1832-1852.
- [13] Collet F., Prétot S., Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012), 58–65.

- [14] Dubois S., Modelling the hygrothermal behaviour of crop-based construction materials, Thèse de doctorat, Université de Liège, 2014
- [15] Tran Le A.D., Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment, Thèse de doctorat, Université de Reims, 2008
- [16] Aït Ouméziane Y., Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre, Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 2013
- [17] Künzeli H.M., Simultaneous heat and moisture transport in building components, IRB-Verlag, 1995
- [18] Lelièvre D., Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés, Thèse de doctorat, Université de Bretagne-Sud 2015
- [19] Mualem Y., Beriozkin A., General scaling rules of the hysteretic water retention function based on Mualem's domain theory, *Eur. J. Soil Sci.* 60 (2009), 652-661.

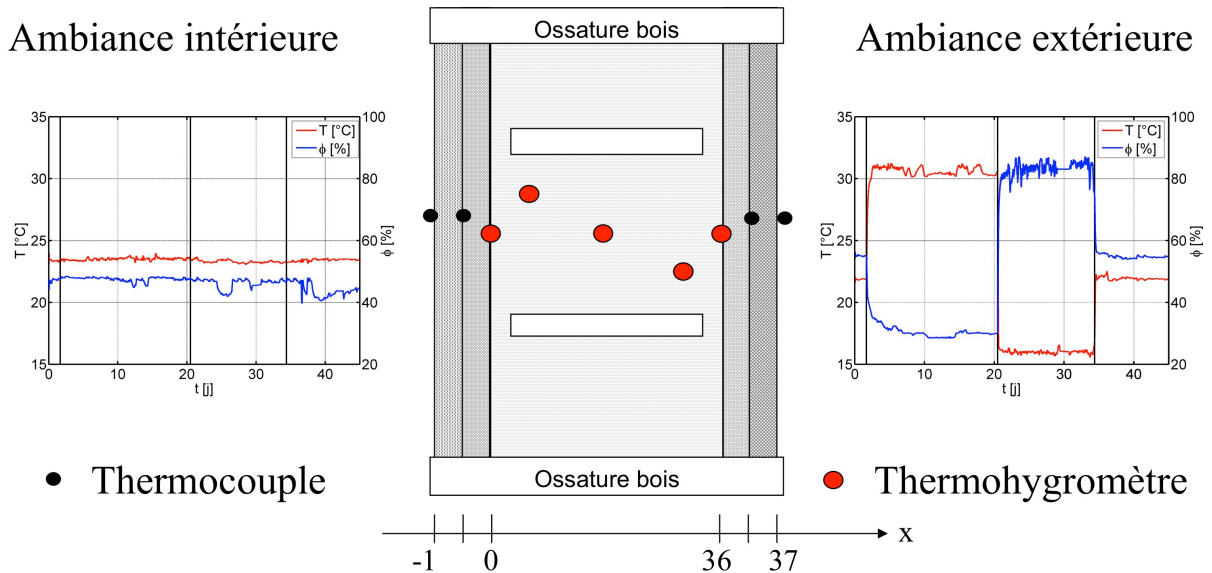


Figure 2 : Schéma du dispositif expérimental avec localisation de l'instrumentation (vue de dessus) et aperçu des conditions dans les chambres intérieures (consigne inchangée) et extérieures.

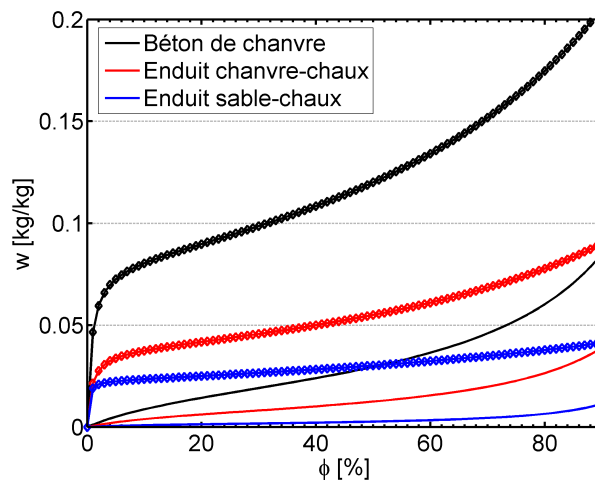


Figure 3 : Isothermes d'adsorption (trait fin) et de désorption (trait épais) du béton de chanvre et des enduits chanvre-chaux et sable-chaux.

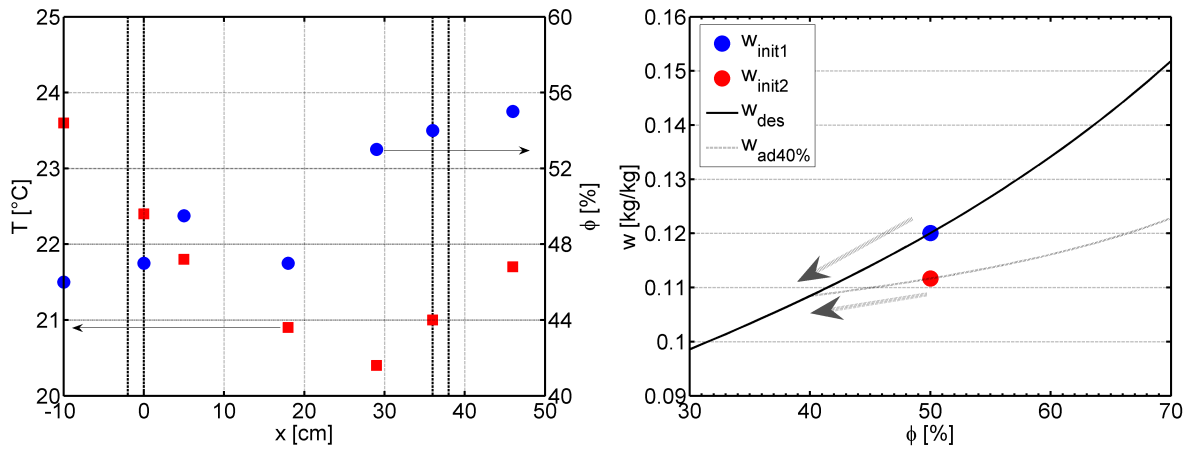


Figure 4 : Conditions initiales mesurées de température et d'humidité relative (gauche) et estimées de teneur en eau (droite).

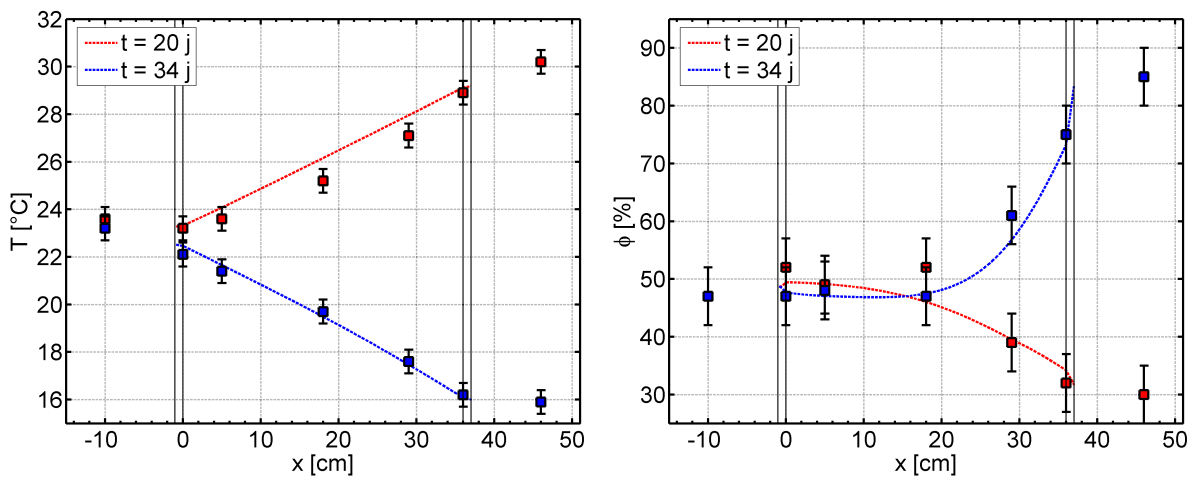


Figure 5 : Profils de température (gauche) et d'humidité relative (droite) mesurés et simulés à la fin des séquences de désorption et d'adsorption.

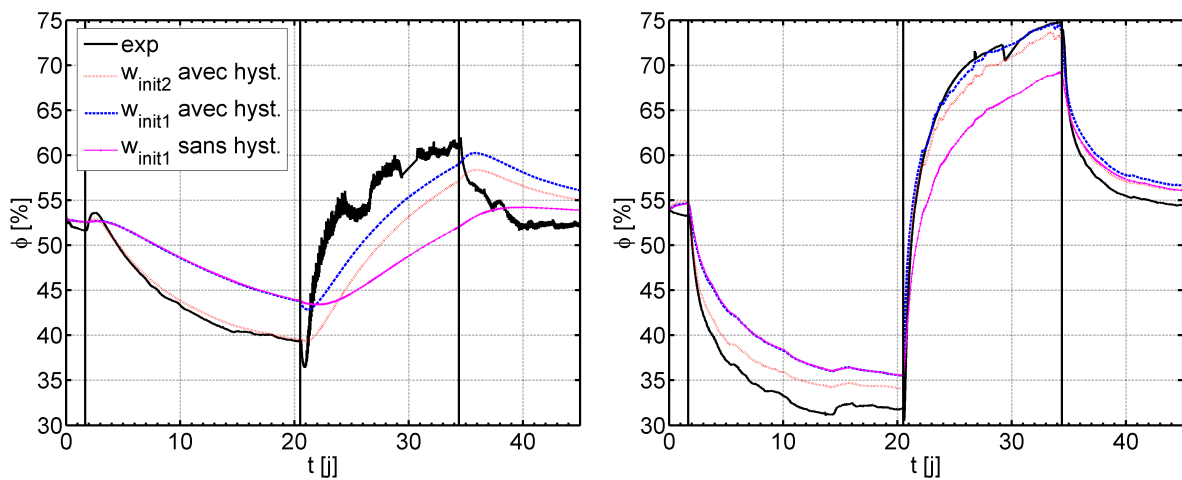


Figure 6 : Influence de la teneur en eau initiale et de l'hystérésis sur la prédiction de l'humidité relative à 29 cm (gauche) et 36 cm (droite).