

# Prise en compte des transferts de masse dans la détermination de la conductivité thermique de matériaux bio-sourcés

T. COLINART<sup>1\*</sup>, T. PIERRE<sup>1</sup>, P. 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** – La conductivité thermique des matériaux de construction est classiquement obtenue en interprétant des mesures de type « plaque chaude » ou « ruban chaud » à l'aide d'un modèle thermique stationnaire ou transitoire. Cependant, certains de ces matériaux, notamment les matériaux bio-sourcés, présentent une sensibilité à l'humidité et nécessitent de prendre en compte les transferts de masse. Dans le cadre de cette communication, un modèle est développé sous COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> pour décrire les transferts de chaleur, d'air et d'humidité dans le béton de chanvre. Ce modèle est utilisé pour évaluer la conductivité apparente d'un milieu partiellement saturé et pour simuler les expériences de mesure de conductivité thermique. Les résultats obtenus montrent l'importance de la prise en compte des transferts de masse dans l'évaluation de la conductivité thermique.

## 1. Introduction

Sous l'impulsion du Grenelle de l'environnement et de la parution récente du label « Bâtiment biosourcé » [1], les matériaux biosourcés présentent un large potentiel d'utilisation dans le secteur de la construction, notamment en raison d'atouts environnementaux essentiels – tels que le stockage de carbone, la « renouvelabilité » des matières premières ou encore de faibles besoins en énergie grise [2]. Parmi ces matériaux, le béton de chanvre est actuellement un des plus utilisé, mais également un des plus étudié. Si actuellement la recherche d'une formulation respectant des contraintes mécaniques minimales attire les laboratoires de Génie Civil, l'évaluation des propriétés hygrothermiques et les conséquences sur la consommation énergétique d'un bâtiment constitue un autre point d'intérêt [3]. Par exemple, les propriétés thermiques à l'état sec ou à un état de référence privilégié (20 °C – 50 %) ont été fréquemment évaluées à l'aide des techniques classiques de plaque chaude gardée [4], de sonde fil [4], de boîte chaude [5], ou encore de fil chaud [6][7]. Plus récemment, des mesures ont été réalisées au laboratoire avec un ruban chaud pour des températures et des humidités relatives allant respectivement de -3 °C à 30 °C et de 0 % à 95 % [8]. Toutes ces données expérimentales sont habituellement interprétées à l'aide d'un modèle purement conductif pour évaluer la conductivité et la diffusivité thermiques [8]. Cependant, les travaux menés par Moyne *et al.* [9][10][11] sur l'évaluation de la conductivité thermique des matériaux poreux humides nous invitent à distinguer trois notions de conductivité :

- la conductivité « vraie » qui provient directement de l'écriture de la loi de Fourier sur le milieu continu homogène équivalent ;
- la conductivité « apparente » qui tient compte des transferts couplés de chaleur et de masse (humidité et air) et des changements de phase associés se produisant lors de l'expérience ;
- la conductivité « effective » qui ajoute à la conductivité « vraie » un terme considérant les évaporations-condensations.

De ces études est confirmé que, contrairement à la conductivité « apparente », la conductivité « vraie » ne rend pas compte du comportement thermique du matériau (même pour des faibles températures) pour des expériences de type « plaque chaude » ou de type « flash » [9]. De plus, il est montré l'importance des gradients d'humidité et surtout de pression totale sur l'évaluation des propriétés thermiques.

Dans cette communication, l'objectif est de prendre en compte les transferts de masse dans l'évaluation de la conductivité thermique d'un matériau biosourcé hygroscopique qu'est le béton de chanvre. Pour cela, l'approche consiste à simuler ces transferts couplés à l'aide d'un modèle développé avec COMSOL Multiphysics® ; ce modèle a notamment été utilisé pour l'étude du comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre [12][13]. Une comparaison entre les conductivités « apparente » et « vraie » est alors proposée et permet d'évaluer l'impact des transferts de masse sur les transferts de chaleur.

## 2. Dispositifs expérimentaux et analyse thermique

Deux dispositifs expérimentaux sont disponibles au laboratoire pour évaluer la conductivité thermique apparente  $\lambda_{app}$  de matériaux : la plaque chaude gardée et le ruban chaud.

La plaque chaude gardée est une méthode de mesure stationnaire. Expérimentalement, une différence de température ( $T_c - T_f$ ) est imposée aux bornes d'un échantillon d'épaisseur  $e$  et la densité de flux dissipé  $\varphi$  est mesurée. La conductivité thermique  $\lambda_{app}$  se déduit de la relation :

$$\lambda_{app} = \varphi \frac{e}{(T_c - T_f)} \quad (1)$$

Pour cette étude, les matériaux sont soit à l'état sec, soit conditionnés à une humidité relative de 50 % et  $T_c = 25$  °C et  $T_f = 15$  °C.

Pour évaluer  $\lambda_{app}$  à d'autres niveaux de température  $T$  et d'humidité relative  $HR$ , un banc de mesure spécial a été développé pour exploiter les possibilités de la technique pseudo-transitoire du ruban chaud (cf. Figure 1). Deux échantillons enserrant un ruban chaud sont mis en équilibre dans un dessiccateur dans lequel l'humidité relative  $HR$  peut être contrôlée entre 3 % et 95 % à l'aide d'une solution saline saturée. Ce dessiccateur est lui-même placé dans une boîte dans laquelle la température  $T$  peut être contrôlée entre -3 °C et 30 °C grâce à un bain thermostaté. Lorsque l'équilibre thermohydrrique des échantillons est atteint, l'expérience suivante est répétée au minimum à trois reprises : un échelon de puissance thermique  $\phi$  est dissipé par effet Joule dans l'élément chauffant (de type Minco,  $L = 60,1$  mm,  $l = 25,4$  mm,  $R = 115$   $\Omega$ ), engendrant ainsi un échauffement local des échantillons. L'élévation de la température  $T_{exp}(0,t)$  est mesurée au centre du ruban à l'aide d'un thermocouple de type K et enregistrée toutes les 0,5 s en même temps que la tension  $U$  et le courant  $I$  traversant le ruban.

Pour interpréter cette mesure, le problème thermique transitoire du plan chaud a été mis en équation par Ladevie [14] dans un repère cartésien pour un milieu 1D semi-infini ( $x \rightarrow \infty$ ). Le système comprend un ruban de capacité  $m_r c_r$  qui dissipe un flux thermique  $\phi$  à travers sa surface  $S$  dans un échantillon de conductivité apparente  $\lambda_{app}$  et d'effusivité  $E = \sqrt{\lambda_{app} \rho c_p}$ . Entre le ruban et l'échantillon est également considérée une résistance de contact  $R_{th}$ . Le formalisme des quadripôles thermiques [15] permet de modéliser ce système et d'écrire la transformée de Laplace de la température  $\theta(0,p)$  au centre du ruban sous la forme [16]:

$$\theta(0, p) = \frac{\phi}{p} \frac{1 + R_{th} ES \sqrt{p}}{m_r c_r p + (R_{th} m_r c_r p + 1) ES \sqrt{p}} \quad (2)$$

où  $p$  est la variable de Laplace. Une transformation inverse de  $\theta(0, p)$  permet alors de revenir à l'évolution temporelle de la température  $T(0, t)$  au centre du ruban.

Sachant que des mesures de la capacité thermique  $c_p$  ont été réalisées à l'aide d'un microcalorimètre ( $\mu$ DSC3, Setaram) à différentes températures et humidités relatives, les propriétés thermiques ( $m_r c_r$ ,  $R_{th}$ ,  $\lambda_{app}$ ) sont alors estimées pour chaque couple  $T/HR$  en minimisant l'écart quadratique entre les températures expérimentales  $T_{exp}(0, t)$  et théoriques  $T(0, t)$  aux temps courts à l'aide d'un algorithme de type Levenberg-Marquardt.

### 3. Modélisation des transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité

#### 3.1. Equations constitutives du problème

Dans cette partie, on s'attache à décrire les transferts couplés de chaleur, d'air et d'humidité dans un matériau poreux hygroscopique lors des expériences classiques de mesure de conductivité thermique. Pour cela, le milieu est supposé homogène, continu et non déformable. De plus, nous faisons les hypothèses d'équilibre thermodynamique local entre les phases (liquide, gazeuse et solide) et d'absence d'effets liés à la gravité. Enfin, la pression totale de la phase gazeuse étant prise comme constante, deux variables d'état suffisent à décrire ce problème. Si la température apparaît naturellement comme une première variable, la seconde peut être choisie arbitrairement entre la teneur en eau massique  $w$ , l'humidité relative  $HR$  ou, comme pour cette étude, la pression de vapeur  $p_v$ .

L'écriture des lois de Darcy, de Kelvin et de Clapeyron dans le domaine capillaire, et par extension dans le domaine hygroscopique, implique que le transport convectif de gaz est nul et que la densité de flux de liquide  $q_l$  s'écrit :

$$q_l = -\frac{\rho_l}{\mu_l} K k_{rl} \nabla p_l = D_l^{pv} \nabla p_v + D_l^T \nabla T \quad (3)$$

avec

$$D_l^{pv} = \frac{\rho_l}{\mu_l} K k_{rl} \frac{\rho_l RT}{M_w p_v} \quad (4a)$$

$$D_l^T = D_l^{pv} \frac{p_v}{T} \left( \ln HR - \frac{M_w L_v}{RT} \right) \quad (4b)$$

où  $K$  est la perméabilité absolue du milieu [ $m^2$ ],  $k_{rl}$  est la perméabilité relative du milieu à la phase liquide [-] et  $L_v$  l'enthalpie massique de changement de phase [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ].

Dans le domaine hygroscopique, les flux diffusifs de vapeur  $q_v$  et d'air sec  $q_a$  s'écrivent par l'intermédiaire de la loi de Darcy comme :

$$q_v = -q_a = -\rho_s D_{v-air}^{eff} \nabla x_v = D_v^{pv} \nabla p_v + D_v^T \nabla T \quad (5)$$

avec

$$D_v^{pv} = -\frac{M_w}{RT} D_{v-air}^{eff} \quad (6a)$$

$$D_v^T = \frac{M_w p_v}{RT^2} D_{v-air}^{eff} \quad (6b)$$

où  $D_{v-air}^{eff} = f D_{v-air}$  est le coefficient de diffusion effective de la phase vapeur [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ],

$D_{v-air} = 2,17 \cdot 10^{-5} \left( \frac{p_0}{p_g} \right) \left( \frac{T}{273,15} \right)^{1,88}$  est le coefficient de diffusion binaire de l'eau dans l'air

et  $f$  est un facteur supposé prendre en compte entre autres la réduction de la surface disponible pour la diffusion, l'augmentation de la tortuosité des pores, ou encore la constriction des lignes de flux [9]. En physique du bâtiment, il est plus fréquent de rencontrer la notion de résistance à la vapeur  $\mu_{sec}$ , qui vaut  $\mu_{sec} \approx 1/f$  en première approximation.

Les équations de conservation de l'humidité (phase liquide + vapeur) et de l'air sec s'écrivent :

$$\rho_s \frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot (q_v + q_l) \quad (7)$$

$$\rho_s \frac{\partial w_a}{\partial t} = \nabla \cdot q_v \quad (8)$$

Le terme de stockage fait apparaître la teneur en eau massique  $w$ , qui est liée à la température et à la pression de vapeur par l'intermédiaire de l'isotherme de sorption. Lors de l'étude du comportement thermo-hydrigue d'une paroi de béton de chanvre [17], il est apparu nécessaire de prendre en compte de la thermo-dépendance de l'isotherme de sorption et d'écrire le terme de stockage sous la forme :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \left( \frac{\partial w}{\partial p_v} \right)_T \frac{\partial p_v}{\partial t} + \left( \frac{\partial w}{\partial T} \right)_{p_v} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

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

$$\rho_s \frac{\partial}{\partial t} (h_s + w_l h_l + w_v h_v + w_a h_a) = -\nabla \cdot (\lambda \nabla T + q_l h_l + q_v h_v + q_a h_a) \quad (10)$$

ce qui donne :

$$\overline{\rho_s c_p} \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot \left( (\lambda + L_v D_v^T) \nabla T + L_v D_v^{pv} \nabla p_v \right) - (q_l c_{pl} + q_v (c_{pv} - c_{pa})) \nabla T \quad (11)$$

où  $h_i$  sont les enthalpies spécifiques [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ],  $\overline{\rho_s c_p} \approx \rho_s (c_{ps} + c_{pl} w + c_{pa} w_a)$  la capacité thermique spécifique et  $\lambda$  la conductivité « vraie » du matériau.

### 3.2. Conditions aux limites et initiales

Ces équations sont résolues pour une simulation d'une expérience de type « plaque chaude » d'une part et pour une simulation d'une expérience de type « ruban chaud » d'autre part (cf. Figure 2). Dans le premier cas, des conditions de flux nul de matière et de chaleur sont imposées sur toutes les surfaces, hormis sur celles où la température est imposée. Dans le second cas, les symétries du dispositif expérimental permettent de simplifier le problème et des conditions de température, de pression totale et de pression de vapeur sont imposées sur les surfaces extérieures. Un quart de ruban est ajouté dans le modèle géométrique, permettant ainsi d'introduire le flux thermique dissipé au niveau de l'élément chauffant, une résistance de contact, ainsi que la capacité thermique du ruban.

Pour les deux expériences, le matériau est supposé initialement en équilibre en température et en humidité relative avec son environnement.

### 3.3. Paramètres de simulation

Ces simulations sont appliquées à des échantillons de béton de chanvre dont les propriétés thermohydrauliques sont les suivantes :

- la capacité calorifique  $c_p$  varie de  $0,93 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour un état sec à  $0^\circ\text{C}$  à  $1,35 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour un état humide à  $20^\circ\text{C}$ . La capacité  $c_{ps}$  de la particule solide de béton de chanvre (c'est-à-dire sans porosité) est supposée égale à  $1\,000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .
- Des mesures effectuées au laboratoire indiquent que  $\mu_{\text{sec}} \approx 8$ .
- En l'absence de données sur les perméabilités intrinsèque et relative du béton de chanvre, le coefficient de diffusion liquide est exprimé comme :

$$D_i^{pv} = D_i^w \left( \frac{\partial w}{\partial p_v} \right)_T \quad (12)$$

avec  $D_i^w = 10^{-8} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  par analogie avec le béton cellulaire.

- Un modèle de GAB est utilisé pour prendre en compte la thermo-dépendance de l'isotherme de sorption :

$$\frac{w}{w_n} = \frac{C * K * HR}{(1 - K * HR) (1 + K * (C - 1) HR)} \quad (13)$$

avec  $C = 65 \exp\left(\frac{E_1 - E_m}{RT}\right)$  et  $K = 0,43 \exp\left(\frac{M_w L_v - E_m}{RT}\right)$ ,  $E_1 \approx 45,9 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  et  $E_m \approx 42,4 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  étant les chaleurs molaires d'adsorption monocouche et multicouche.

## 4. Résultats et discussions

### 4.1. Simulation d'une expérience de type « plaque chaude »

La conductivité thermique apparente  $\lambda_{app}$  de deux échantillons de densité différente a été déterminée à  $20^\circ\text{C}$  pour trois humidités relatives par un modèle thermique (cf. équation (1)) et les résultats sont consignés dans le Tableau 1. On constate notamment que la conductivité thermique apparente  $\lambda_{app}$  augmente avec l'humidité relative et la densité du matériau.

HR (%)	$c_p$ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Matériau	$\rho_s$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Modèle Th $\lambda_{app}$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Modèle HAM $\lambda$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Différence (%)
3 %	990	1	377	0,071	0,0708	0,28
		2	474	0,090	0,0898	0,22
50 %	1050	1	377	0,089	0,0863	3,03
		2	474	0,106	0,1032	2,64
95 %	1350	1	377	0,107*	0,1013	5,33
		2	474	0,122*	0,1161	4,84

Tableau 1 : Conductivités thermiques de deux échantillons de béton de chanvre déterminées pour une simulation de type « plaque chaude » à trois humidités relatives par les modèles Th et HAM. (\*Les données du modèle Th à 95 % sont une extrapolation des données du modèle Th à 3 % et 50 %).

Dans un second temps, la conductivité « vraie »  $\lambda$  a été ajustée dans le modèle thermohydraulique (modèle HAM) de façon à obtenir le même flux thermique en régime permanent au niveau de la source chaude que pour le modèle Th. Dans ce cas, on note que la prise en

compte des transferts de masse conduit à des valeurs plus faibles de conductivité, puisqu'une fraction de l'énergie sert à évaporer une partie du liquide contenu dans le matériau. Néanmoins, les différences restent inférieures à  $6 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  et l'erreur commise reste en deçà de l'incertitude de mesure pour ce type d'expérience.

#### 4.2. Simulation d'une expérience de type « ruban chaud »

Les deux échantillons testés à la « plaque chaude » sont maintenant utilisés pour une expérience de type « ruban chaud ». Parmi les nombreux essais effectués, on retiendra ceux réalisés dans les mêmes conditions (20 °C et 3, 66 et 95 %) et à basse température (0 °C). Dans un premier temps, les paramètres thermiques ( $m_r c_r$ ,  $R_{th}$ ,  $\lambda_{app}$ ) sont estimés par le modèle thermique du plan chaud aux temps courts ( $t_{max} < 50 \text{ s}$ ) et présentés dans le Tableau 2. On constate que les valeurs de conductivités apparentes  $\lambda_{app}$  estimées à 20 °C sont sensiblement en accord avec celles mesurées par une expérience de type « plaque chaude ».

$T \text{ (}^\circ\text{C)} - HR \text{ (}\%)$	$m_r c_r \text{ (J}\cdot\text{K}^{-1})$	$R_{th} \text{ (K}\cdot\text{W}^{-1})$	$\lambda_{app} \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
0 °C – 3 %	0,47	9,2	0,073
20 °C – 3 %	0,44	10	0,076
0 °C – 66 %	0,3	12,5	0,087
20 °C – 66 %	0,28	12	0,091
20 °C – 95 %	0,58	5,4	0,096

Tableau 2 : Paramètres thermiques estimés par le modèle thermique du plan chaud.

Dans un second temps, ces valeurs sont employées dans les modèles Th et HAM (attention :  $\lambda = \lambda_{app}$  pour ces simulations) et les résultats numériques sont confrontés aux expériences sur les Figures 3a et 3b. Aux temps courts, on observe que les modèles Th et HAM ne présentent aucune différence entre eux, ni avec l'expérience. En revanche, le modèle Th diverge de l'expérience et du modèle HAM aux temps longs : les effets d'évaporation commencent à être perceptibles, ce qui implique une élévation moins rapide de la température. Les écarts sont d'autant plus importants que l'humidité relative est élevée alors que l'influence de la température est minimale.

## 5. Conclusions

Une analyse vient d'être menée sur l'évaluation de la conductivité thermique de matériaux de construction biosourcés hygroscopiques et sur l'importance des transferts d'humidité. Pour le béton de chanvre, des conductivités thermiques de l'ordre de  $0.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ont été mesurées. Les simulations d'une expérience de type « plaque chaude » montrent que l'utilisation d'un modèle thermique ne permet pas de remonter à la conductivité « vraie »  $\lambda$  du matériau et conduit à une surestimation de  $\lambda$  allant jusqu'à  $6 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour des conditions très humides. En revanche, les simulations d'une expérience de type « ruban chaud » montrent que la prise en compte des transferts d'humidité n'a que peu d'influence sur les thermogrammes aux temps courts et un modèle thermique du plan chaud doit fournir une bonne estimation de  $\lambda$ . Toutefois, il reste à évaluer le poids de certains paramètres comme la résistance thermique de contact entre le ruban et l'échantillon ou la capacité thermique du ruban et à confirmer ces résultats sur d'autres matériaux de construction.

## Références

- [1] Arrêté du 19 décembre 2012 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « *bâtiment biosourcé* », JORF n°0299 du 23 décembre 2012, page 20332, texte n° 16.
- [2] <http://www.constructions-bioressources.org/> (consulté le 07/01/13).
- [3] TRAN LE, A.D., MAALOUF, C., MAI, T.H.; WURTZ, E., COLLET, F. *Transient hygrothermal behavior of a hemp concrete building envelope*, *Energ Buildings*, 30 (2010), 1797-1806.
- [4] PRETOT S., COLLET F., GLOUANNEC P., LANG V., *Variation des propriétés thermiques de bétons de chanvre en fonction de la formulation*, Actes du colloque SFT (Vannes, 26-29 mai 2009).
- [5] CERESO V., *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*, Thèse de doctorat, ENTPE, Lyon (2005).
- [6] MERCKX B., DUDOIGNON P., GARNIER J. P., MARCHAND D., *Simplified Transient Hot-Wire Method for Effective Thermal Conductivity Measurement in Geo Materials: Microstructure and Saturation Effect*, *Advances in Civil Engineering*, n° 625395, 2012.
- [7] PIERRE T., COLINART T., *Caractérisation thermo-hydrrique d'agro-matériaux à base de chanvre*, Actes du colloque SFT (Perpignan, 24-27 mai 2011), 979-984.
- [8] PIERRE T., COLINART T., GLOUANNEC P., *Measurement of thermal properties of biosourced building materials*, *Int. J. Thermophysics*, Article accepté pour publication.
- [9] DEGIOVANNI A., MOYNE C., *Conductivité thermique de matériaux poreux humides : évaluation théorique et possibilité*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30 (1987), 2225-2245.
- [10] AZIZI S., MOYNE C., DEGIOVANNI A., *Approche expérimentale et théorique de la conductivité thermique des milieux poreux humides – I. Théorie*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31 (1988), 2319-2330.
- [11] MOYNE C., BATSALE J-C., DEGIOVANNI A., *Approche expérimentale et théorique de la conductivité thermique des milieux poreux humides – I. Expérimentation*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31 (1988), 2305-2317.
- [12] COLINART T., GLOUANNEC P., CHAUVELON P., LE BIDEAU P., COLLET F., LANOS C., *Étude et modélisation du comportement thermo-hydrrique d'une paroi en béton de chanvre*, Conférence IBPSA France (Moret-sur-Loing, 9-10 novembre 2010).
- [13] COLINART T., PIERRE T., GLOUANNEC P., *Etude expérimentale et numérique des caractéristiques thermiques d'une paroi multicouche de béton de chanvre*, Acte du colloque de thermique SFT (Bordeaux, 29 mai – 1<sup>er</sup> juin 2012), 543-550.
- [14] LADEVIE B., *Mise au point de dispositifs de caractérisation thermophysique de matériaux isolants solides ou pâteux. Extension aux fluides cisailés*, Thèse de doctorat, ENSAM Bordeaux (1998).
- [15] MAILLET D., ANDRÉ S., BATSALE J-C., DEGIOVANNI A., MOYNE C., *Thermal quadrupoles – Solving the heat equation through integral transforms*, J. Wiley Editeur, Chichester (2000).
- [16] JANNOT Y., MEUKAM P., *Simplified estimation method for the determination of the thermal effusivity and thermal conductivity using a low cost hot strip*, *Meas. Sci. Technol.*, 15 (2004), 1932-1938.
- [17] COLINART T., GLOUANNEC P., PIERRE T., CHAUVELON P., *Évaluation expérimentale et numérique du comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre*, Journée technique C&B : Fonctionnement hygrothermique (Sens, 29 novembre 2012).

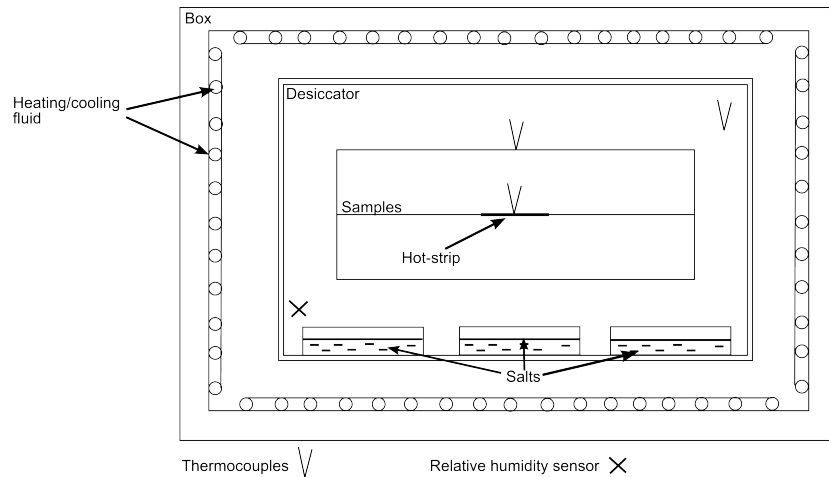


Figure 1 : Dispositif expérimental du ruban chaud. Le contrôle de l'humidité relative se fait dans un dessiccateur par des solutions salines saturées, le contrôle de température est réalisé à l'aide d'un échangeur relié à un bain thermostaté.

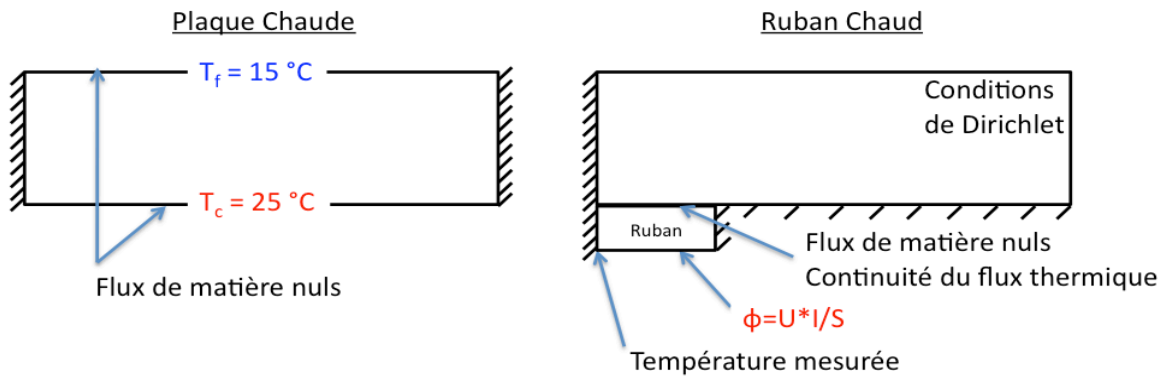


Figure 2 : Géométrie et conditions limites des simulations de type « plaque chaude » et « ruban chaud » (N.B. le ruban chaud n'est pas à l'échelle).

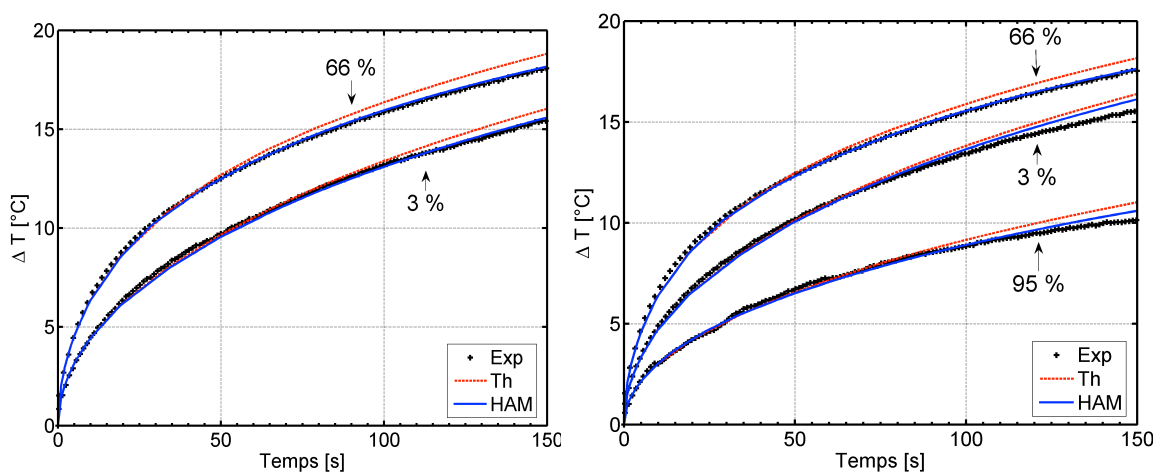


Figure 3 : Thermogrammes expérimentaux et comparaison avec les résultats des modèles Th et HAM pour des simulations de type « Ruban chaud » à 0 °C (gauche) et à 20 °C (droite).