

# Identification des propriétés thermiques et hydriques d'une paroi de bâtiment

Abdelmalek Benséfia<sup>1</sup>, Mohamed Boussaid<sup>1</sup>, Tahar Loulou<sup>2</sup>, P. Glouanec<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université M'hamed Bougara de Boumerdès, Algérie

<sup>2</sup>Université de Bretagne Sud, LIMAT<sup>B</sup>, Lorient, France

**Résumé :** Il s'agit d'étudier le comportement thermique et hydrique de matériaux nouveaux du type bétons, confectionnés avec divers produits tels le chanvre, la sciure de bois, les copeaux métalliques ou grains de polystyrène expansé, lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations externes variables en termes de température et d'humidité. Dans une première approche, nous résolvons les équations adimensionnelles de Luikov représentant les transferts de chaleur et de masse dans un milieu poreux avec une température et une concentration variant en fonction du temps. Sur la face avant de l'échantillon, on applique un profil de concentration de l'air en créneau ce qui permet d'améliorer les sensibilités sur les paramètres caractérisant les échanges thermo-hydriques. En utilisant seulement deux capteurs de température et deux capteurs de concentration, les deux premiers en face avant et les suivants en face arrière. Nous réussissons à identifier par l'utilisation des techniques inverses, méthode Levenberg-Marquardt les six paramètres suivants : les nombres de Biot thermique et massique, les nombres de Luikov, de Posnov, de Kossovitch et le facteur de conversion de phase. Des mesures simulées et bruitées sont utilisées pour la mise en œuvre de l'analyse de sensibilité et de l'inversion.

## Nomenclature

$Bi$	nombre de Biot	$\phi$	concentration sans dimension
$c$	chaleur spécifique	$\tau$	temps sans dimension
$Ko$	nombre de Kossovich	$\varepsilon$	taux de changement de phase
$L$	épaisseur de l'échantillon	$\delta$	coefficient du gradient thermique
$Lu$	nombre de Luikov	$\theta$	température sans dimension
$Pn$	nombre de Posnov	$\psi$	température sans dimensions de l'air
$U$	concentration en °M	$\varphi$	Concentration sans dimension de l'air
$T$	température en °C	$a$	diffusivité
$X$	abscisse sans dimension	$t$	temps en secondes
$x$	abscisse avec dimension	$\Delta h$	chaleur latente de vaporisation

## Indices

$T$	relatif à la température	*	relatif à l'air
$M$	relatif à la masse	$O$	relatif à l'état initial
$S$	simulé	$e$	exacte

## 1. Introduction

Des matériaux de construction nouveaux recyclables et bon marché, dits éco-matériaux sont régulièrement conçus. Leur utilisation nécessite l'identification de leurs propriétés tant mécaniques que thermiques et hydrauliques.

L'étude bibliographique montre que des efforts ont été fait pour identifier par inversion les propriétés thermo-hydrauliques de matériaux comme le bois et la céramique et c'est le cas d'un article de référence réalisé par Orlando et al. [1,2], qui résolvent les équations linéaires sans dimensions de Luikov, avec une condition de flux imposée sur une face de l'échantillon

et une condition du troisième type imposée avec température et concentration constantes de l'air sur l'autre face. Les auteurs utilisent la méthode de Levenberg-Marquardt. En raison des faibles sensibilités obtenues notamment sur le nombre de Posnov  $Pn$  et sur le facteur de conversion de phase  $\varepsilon$  ces derniers n'ont pu être estimés. L'identification des quatre paramètres a été possible par la mesure simultanée de la température et de l'humidité sur plusieurs capteurs répartis sur l'échantillon. Kanevce et al. [3] font de même pour des produits alimentaires tels que les pommes de terre en tranche. Les paramètres identifiés toujours par Levenberg-Marquardt sont les diffusivités thermique et massique ainsi que le coefficient de convection de masse, à partir d'une seule mesure de la température en fonction du temps.

En ce qui concerne le présent travail, nous réussissons à identifier l'ensemble des paramètres (six paramètres au total :  $Bi_T, Bi_m, Ko, Lu, Pn, \varepsilon$ ) en utilisant seulement deux capteurs de température et deux capteurs de concentration situés respectivement sur les faces avant et arrière de l'échantillon.

## 2. Formulation du problème direct

Le modèle géométrique est un échantillon de type mur à faces parallèles soumis sur la face arrière à un flux de chaleur constant et imperméable à l'humidité. Sur la face avant un écoulement d'air à température constante assure une condition de convection. L'humidité de l'air subit une évolution en créneau. Les équations de transfert de masse et de chaleur décrivant le problème direct s'écrivent sous forme adimensionnelle comme suit :

$$\frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} - \varepsilon Ko \frac{\partial \phi(X, \tau)}{\partial \tau} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi(X, \tau)}{\partial \tau} = Lu \frac{\partial^2 \phi(X, \tau)}{\partial X^2} - LuPo \frac{\partial^2 \phi(X, \tau)}{\partial X^2} \quad (2)$$

$$\theta(X, 0) = 0 \quad (3)$$

$$\phi(X, 0) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial X} = -Q(\tau) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi(0, \tau)}{\partial X} - Pn \frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial X} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta(1, \tau)}{\partial X} = Bi_T [\psi(\tau) - \theta(1, \tau)] - Bi_m Lu (1 - \varepsilon) [\varphi(\tau) - \phi(1, \tau)] \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi(1, \tau)}{\partial X} = Bi_m [\varphi(\tau) - \phi(1, \tau)] - Bi_T Pn [\theta(1, \tau) - \psi(\tau)] \quad (8)$$

Les sensibilités par rapport aux paramètres recherchés sont définies comme suit :

$$\frac{\partial F(X, \tau)}{\partial P_i} = \frac{F(X, \tau; P_1, P_2, \dots, P_i + \Delta P_i, \dots, P_6) - F(X, \tau; P_1, P_2, \dots, P_i - \Delta P_i, \dots, P_6)}{2\Delta P_i} \quad (9)$$

où la variable  $F$  représente soit la température soit la concentration.

La variation temporelle de la concentration de l'air sans dimensions est définie par :

$$\varphi(\tau) = \begin{cases} 1.5, & 0 < \tau < \frac{\tau_{max}}{3} \\ 1, & \frac{\tau_{max}}{3} < \tau < \frac{2\tau_{max}}{3} \\ 1.5, & \tau > \frac{2\tau_{max}}{3} \end{cases} \quad (10)$$

Les grandeurs sans dimensions du problème direct, donné par les équations (1)-(8), sont définies comme suit :

$$\begin{aligned} \theta(X, \tau) &= \frac{T(x, t) - T_0}{T_{max} - T_0}, & \phi(X, \tau) &= \frac{u_0 - u(x, t)}{u_0 - u_{max}}, & Q(\tau) &= \frac{q.l}{k_T(T_{max} - T_0)}, \\ \tau &= \frac{at}{l^2} & X &= \frac{x}{l} & \psi(\tau) &= \frac{T_s(\tau) - T_0}{T_{max} - T_0}, & \varphi(\tau) &= \frac{u_0 - u_a(\tau)}{u_0 - u_{max}}, & T_{max} &= \max(T_s(\tau)), \\ u_{max} &= \max(u^*(\tau)), & Lu &= \frac{a_m}{a} & Pn^* &= \delta \frac{T_{max} - T_0}{u_0 - u_{max}}, & Bi_T &= \frac{hl}{k_T}, \\ Bi_m &= \frac{h_m l}{k_m}, & Ko^* &= \frac{\Delta H(u_0 - u_{max})}{c(T_{max} - T_0)}, & Bi_m^* &= Bi_m [1 - (1 - \varepsilon) Pn^* Ko^* Lu] \end{aligned}$$

La résolution du problème direct se fait par différences finies utilisant un schéma implicite pur en temps avec itération à chaque pas de temps. Les évolutions de la température et de la concentration sur les faces avant et arrière sont représentées par les figures 1-a et 1-b. Nous avons considéré la température de l'air constante et la concentration variant en créneau.

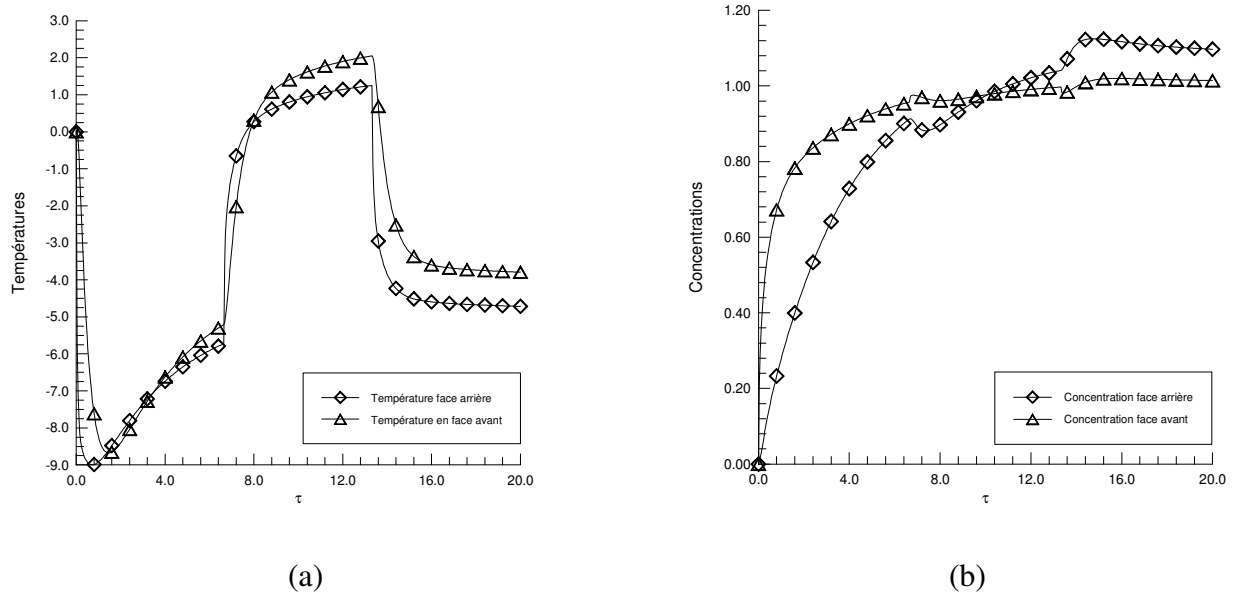


Figure 1 : Evolutions de la température (a) et de la concentration (b) sur les faces avant et arrière de l'échantillon.

La résolution du système représentant le problème direct a été faite en utilisant les données du tableau 1.

$L$	m	0.05	$T_0$	°C	24	$k_m$	kg/ms°M	$2.4 \times 10^{-7}$	$Bi_T$	2.5
$\rho_0$	kg/m <sup>3</sup>	2000	$T_S$	°C	60	$\delta$	°M/°C	0.56	$Bi_m$	3.33
$h_T$	W/m <sup>2</sup> °C	17	$u_0$	°M	80	$c$	J/kg°C	607	$Lu$	0.20
$h_m$	kg/m <sup>2</sup> s°M	$1.6 \times 10^{-5}$	$u^*$	/	40	$c_m$	kg/kg°M	$1.3 \times 10^{-3}$	$Pn$	0.84
$k_T$	W/m°C	0.34	$Bi_T$	/	2.5	$\Delta h$	J/Kg	$2.5 \times 10^6$	$Ko$	49
$q$	W/m <sup>2</sup>	36.72	$Q$	/	0.15	/	/		$\varepsilon$	0.20

Tableau 1 : Données de l'échantillon de céramique et du problème direct

On remarque que les températures sans dimensions sont négatives sur les deux faces de l'échantillon, pour des temps faibles et à cause du phénomène de vaporisation. Ces températures augmentent lorsque l'effet de vaporisation diminue suite au chauffage imposé à la face arrière. Les concentrations sans dimensions sur les deux faces augmentent, alors que la concentration réelle diminue en raison de la définition adoptée de  $\phi(X, \tau)$ . L'évolution de la concentration est faiblement perturbée par le créneau de l'humidité de l'air.

### 3. Résultats

Pour identifier les paramètres  $Bi_T$ ,  $Bi_m$ ,  $Lu$ ,  $Pn$ ,  $Ko$  et  $\varepsilon$  nous permettant d'avoir toutes les informations concernant le comportement du milieu, sur les plans thermique et massique, nous simulons des résultats expérimentaux sur les faces avant et arrière de l'échantillon et ensuite nous utilisons la méthode de Levenberg-Marquardt qui consiste à minimiser au sens des moindres carrés l'écart entre le vecteur solution et le vecteur mesures. Seuls deux capteurs de température et deux capteurs d'humidité sont nécessaires pour procéder à l'inversion. Les capteurs sont disposés sur les faces avant et arrière de l'échantillon, ce qui simplifierait la réalisation de l'expérience, voir [5,6,7].

Paramètre	$Bi_T$	$Bi_m$	$Lu$	$Pn$	$Ko$	$\varepsilon$
$Bi_T$	1.00000	-0.26754	-0.35937	-0.73789	0.94506	-0.54298
$Bi_m$		1.00000	-0.58600	0.21727	-0.39239	0.78330
$Lu$			1.00000	0.18640	-0.40319	-0.09291
$Pn$				1.00000	-0.69512	0.24597
$Ko$	Symétrie				1.00000	-0.65004
$\varepsilon$						1.00000

Tableau 2 : Matrice de Corrélation

L'analyse de la matrice de corrélation (voir Tableau 2) des paramètres à identifier montre qu'ils ne sont pas corrélés entre eux, à l'exception du couple  $Bi_T$  et  $Ko$ . En effet ces deux paramètres sont faiblement corrélés et leur estimation simultanée peut s'avérer difficile. Après cette étude de la dépendance entre les différents paramètres, on tentera dans la suite de cet article une estimation simultanée des six paramètres à la fois ( $Bi_T, Bi_m, Ko, Lu, Pn, \varepsilon$ ).

L'examen des évolutions des sensibilités par rapport aux paramètres à identifier et qui sont représentées sur les figures 2 et 3, montre que celles par rapport au Biot thermique, le Biot masique, le Luikov et le Kossovitch sont assez importantes pour être facilement identifiées, en utilisant somme toute 2 capteurs de température et 2 capteurs d'humidité. Pour les deux paramètres restant qui sont le Posnov et le facteur de conversion de phase, les sensibilités sont relativement basses. L'utilisation d'une condition de concentration variant avec le temps (ici en créneau) mais aussi de la température peut améliorer ces deux sensibilités pour qu'ils soient identifiables. La figure 2 (a) montre qu'il est possible d'obtenir le paramètre  $\varepsilon$  et la

figure 2 (b) le nombre Posnov. D'autres évolutions de la température et de l'humidité de l'air peuvent être essayées pour améliorer ces deux sensibilités particulièrement.

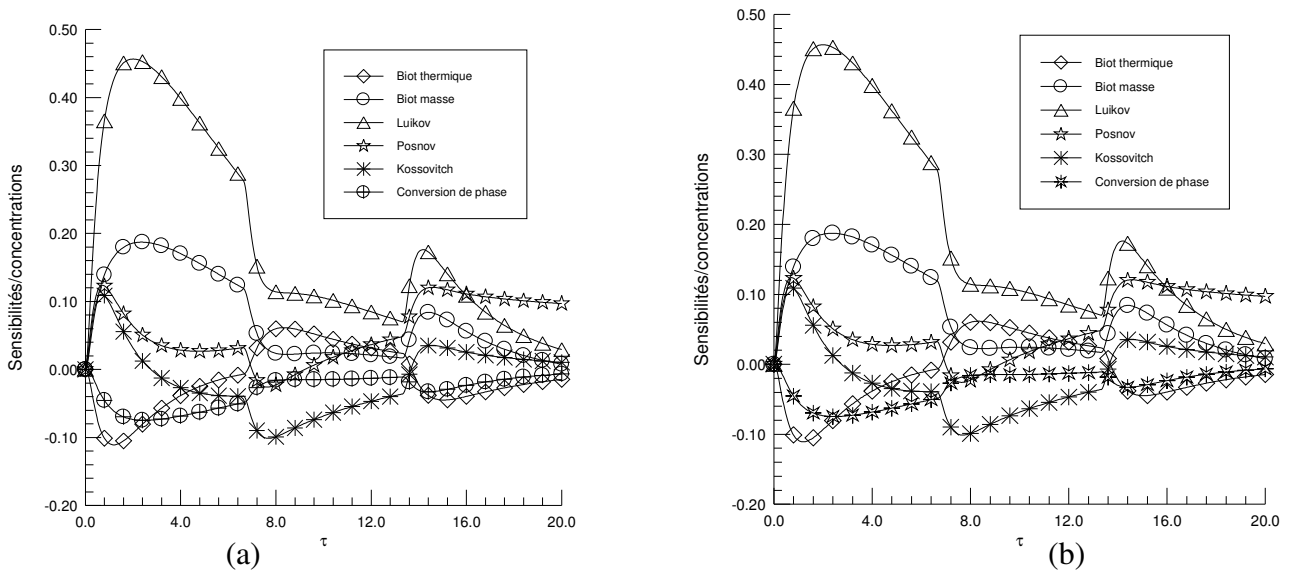


Figure 2 : Sensibilités des températures (a) et des concentrations (b) au niveau du capteur en face arrière par rapport  $Bi_T$ ,  $Bi_m$ ,  $Lu$ ,  $Pn$ ,  $Ko$  et  $\varepsilon$ .

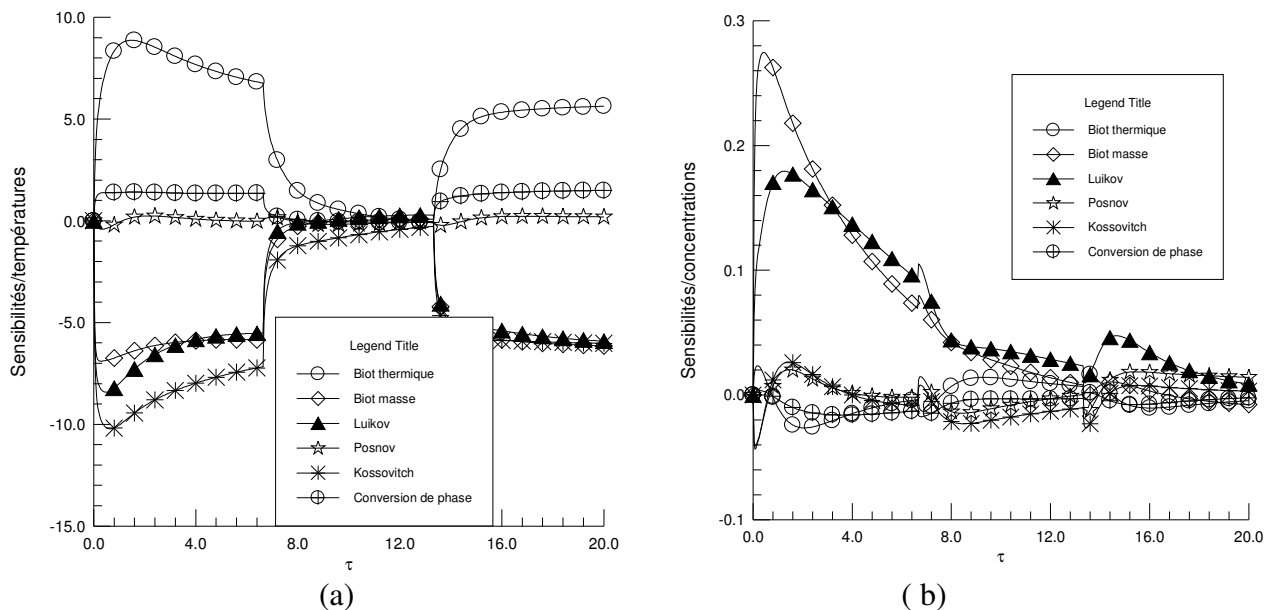


Figure 3 : Sensibilités des températures et des concentrations au niveau du capteur en face avant par rapport  $Bi_T$ ,  $Bi_m$ ,  $Lu$ ,  $Pn$ ,  $Ko$  et  $\varepsilon$ .

Les résultats obtenus par l'inversion sont regroupés sur le tableau 3. Nous constatons que pour des valeurs simulées pour un bruit de 1% et 5% par rapport à la valeur maximale de la variable (température ou concentration), les résultats sont proches des valeurs exactes dans un intervalle faible et acceptable.

Paramètre	Exact	Estimé <i>Sans bruit</i>	Estimé <i>Bruit 1%</i>	% erreur	Estimé <i>Bruit 5%</i>	% erreur
$Bi_T$	2.5000	2.5000	2.5150	0.6	2.5767	3
$Bi_m$	3.3333	3.3333	3.3152	0.5	3.2423	2.7
$Lu$	0.2380	0.2380	0.2384	0.1	0.2399	0.7
$Pn$	0.5040	0.5040	0.4976	1.3	0.4723	6.5
$Ko$	8.2372	8.2372	8.2816	0.6	8.4645	2.8
$\varepsilon$	0.2000	0.2000	0.1987	0.6	0.1939	3

Tableau 3 : Résultats obtenus par inversion

## 4. Conclusion

L'étude dont nous proposons les premiers résultats à travers cet article, concerne l'identification des propriétés de matériaux poreux et humides soumis à diverses conditions externes de température et d'humidité. L'objectif à terme est d'identifier l'évolution en fonction du temps de ces propriétés thermo-hydriques dans des conditions d'utilisation normales de ces matériaux. Nous avons réussi à présent à identifier les six paramètres nécessaires à la connaissance du comportement d'un échantillon de céramique, en les considérant comme constants et en partant de mesures simulées sur seulement deux points. Les faces avant et arrière de l'échantillon sont les positions les plus simples pour installer les capteurs et diminuer ainsi le caractère intrusif d'une mesure interne. L'inversion a été possible par la mise en œuvre de la méthode Levenberg-Marquardt d'une part et le choix d'une condition limite adéquate de l'autre (excitation du système). Les résultats obtenus correspondent bien aux mesures artificiellement simulées.

## Références

- [1] L. B. Dantas, H.R.B. Orlande, R.M. Cotta, An inverse problem of parameter estimation for heat and mass transfer in capillary porous media. *Int. Jour. Heat Mass Transfer* 46 (2003) 1587-1598.
- [2] L. B. Dantas, H.R.B. Orlande, R.M. Cotta. Estimation of dimensionless parameters of Luikov's system for heat and mass transfer in capillary porous media. *Int. J. Thermal Sci.* 41 (2001) 217-227.
- [3] L.P. Kanevce, G.H. Kanevce, G.S. Dulikrivich. Estimation of drying thermophysical properties by using temperature measurements, *4<sup>th</sup> International conference on inverse problems in engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, 2002.
- [4] A.V. Luikov, *Heat and Mass in Capillary-Porous Bodies*, Pergamon Press, Oxford, 1966.
- [5] M.N. Osizik, H.R.B. Orlande, *Inverse heat transfer: Fundamentals and applications*, Taylor and Francis, New York, 2000.
- [6] J.V. Beck, K.J. Arnold. *Parameter estimation in engineering and science*, Wiley & Sons, New York 1977.
- [7] O.M. Alifanov, E. Artyukin, and A. Rumyantsev. *Extreme methods for solving ill posed problems with applications to inverse heat transfer problems*, Begell House, New York, 1995.

**Remerciements :** Le présent travail est financé par le projet CMEP algéro-français MDU 719, concernant l'identification des propriétés thermo-hydriques d'éco-matériaux de type bétons de chanvre, de sciure de bois et de copeaux métalliques en usage.