

IDENTIFICATION DES PROPRIETES THERMIQUES ET HYDRIQUES D'ECOMATERIAUX PAR TECHNIQUES INVERSES

A. Benséfia¹, M. Boussaid¹ et T. Loulou², P. Glouannec²
¹Université M'hamed Bougara de Boumerdès, Algérie
²Université de Bretagne Sud, Lorient, France

RESUME

L'objectif de cet article est l'identification des propriétés thermo-hydriques de matériaux poreux en phase de séchage. L'échantillon considéré est en céramique. Les équations phénoménologiques de Luikov en une dimension sont appliquées à ce type de milieu lequel est soumis d'un côté à une condition de flux et de l'autre côté à une condition de séchage par l'air, avec température variable en fonction du temps. La technique d'inversion permet d'identifier les paramètres caractéristiques que sont les nombres de Luikov, de Posnov, de Biot massique et thermique, le taux de changement de phase et le nombre de Kossovich. Dans une première phase l'étude numérique que nous menons estime six paramètres moyennant des mesures simulées de température et de concentration en fonction du temps. Quatre capteurs de température et quatre capteurs de concentration non nécessairement implantés aux mêmes endroits permettent ces mesures.

NOMENCLATURE

Bi :	Nombre de Biot	ϕ :	Concentration sans dimension
c :	Chaleur spécifique	τ :	Temps sans dimension
Ko :	Nombre de Kossovich	ε :	Facteur de changement de phase
l :	Epaisseur de l'échantillon	δ :	Coefficient du gradient thermique
Lu :	Nombre de Luikov	θ :	Température sans dimension
Pn :	Nombre de Posnov	ψ :	Température sans dimensions de l'air
u :	Concentration en °M	Δh :	Chaleur latente de vaporisation
T :	Température en °C	a :	Diffusivité
X :	Abscisse sans dimension	t :	Temps en secondes
x :	Abscisse avec dimension	c :	Chaleur spécifique

Indices

T :	Relatif au transfert de chaleur	*	Relatif à l'air
m :	Relatif au transfert de masse	0 :	Relatif à l'état initial

1. INTRODUCTION

Beaucoup de produits nouveaux sont régulièrement mis sur le marché, certains sont poreux et sont soumis au séchage. Parmi ces matériaux on cite des produits des industries pharmaceutiques, alimentaires et des matériaux de construction. Le séchage industriel est un grand consommateur d'énergie et toute initiative visant à réduire la facture énergétique est louable d'où l'intérêt de l'optimisation du séchage.

L'identification des propriétés thermo-hydriques est une nécessité pour parvenir à cet objectif. L'étude bibliographique sur le sujet montre que des articles de référence ont ouvert la voie à l'identification des propriétés de matériaux durant le séchage, on cite les travaux de Orlando et al. [1 et 2] qui résolvent les équations de Luikov, linéaires, 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. L'identification par la technique inverse de Levenberg-Marquardt leur a permis d'identifier quatre des six paramètres caractéristiques. En raison des faibles sensibilités obtenues notamment sur le nombre de Posnov (Pn) et sur le facteur de conversion de phase (ε) ces derniers n'ont pu être estimés. Les matériaux testés sont la céramique et le bois. 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] se sont penchés sur l'identification par techniques inverses des propriétés en diffusion thermique et massique de produits alimentaires et en particulier de la pomme de terre en tranches. La même technique d'inversion est la même que celle utilisée par Orlando. Les paramètres identifiés 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. Nous traitons à travers ce papier un problème similaire en considérant cependant que la température de l'air est variable en fonction du temps et en identifiant par inversion les six paramètres caractérisant le séchage avec la connaissance de quatre thermogrammes et de quatre évolutions de la concentration en fonction du temps, les capteurs étant régulièrement répartis à travers le matériau.

2. LES EQUATIONS DU PROBLEME DIRECT

L'étude concerne un mur d'épaisseur (l) de faces parallèles d'un matériau poreux soumis en $X=0$ à un flux constant et imperméable, et en $X=l$ à une condition de convection thermique avec température variable en fonction du temps et une condition de convection de masse avec concentration de l'air constante. Les équations régissant le problème sont les équations de Luikov [4] sans dimensions qu'on écrit comme suit :

Equations de la chaleur et de la masse

$$\frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} - \varepsilon K o^* \frac{\partial \phi(X, \tau)}{\partial \tau} \quad \text{En } 0 < X < 1, \tau > 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi(X, \tau)}{\partial \tau} = Lu \frac{\partial^2 \phi(X, \tau)}{\partial X^2} - Lu P o^* \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2}$$

Conditions initiales

$$\theta(X, 0) = 0 \text{ et } \phi(X, 0) = 0 \quad (2)$$

Conditions aux limites

$$\frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial X} = -Q(\tau), \quad \frac{\partial \phi(0, \tau)}{\partial X} - Pn^* \frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial X} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta(1, \tau)}{\partial X} = Bi_T [\psi(\tau) - \theta(1, \tau)] - Bi_m Lu(1 - \varepsilon) [1 - \phi(1, \tau)] \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi(1, \tau)}{\partial X} = Bi_m^* [1 - \phi(1, \tau)] - Bi_T Pn^* [\theta(1, \tau) - \psi(\tau)] \quad (5)$$

Les sensibilités par rapport aux paramètres recherchés $P_i(Bi, Ko, Lu, Pn, \varepsilon)$ sont définies comme suit :

$$\frac{\partial F}{\partial P_i} = \frac{F(P_1, P_2, \dots, P_i + \Delta P_i, \dots, P_n) - F(P_1, P_2, \dots, P_i - \Delta P_i, \dots, P_n)}{2 \cdot \Delta P_i}$$

Avec : $F = \theta, \Phi$

Les grandeurs sans dimensions sont définies comme suit :

$$\theta(X, \tau) = \frac{T(x, t) - T_0}{T_{\max} - T_0}, \quad \phi(X, \tau) = \frac{u_0 - u(x, t)}{u_0 - u^*}, \quad Q(\tau) = \frac{q \cdot l}{k_T (T_{\max} - T_0)},$$

$$\tau = \frac{at}{l^2}, \quad X = \frac{x}{l}, \quad \psi(\tau) = \frac{T_s(\tau) - T_0}{T_{\max} - T_0}, \quad T_{\max} = \max(T_s(\tau)), \quad Lu = \frac{a_m}{a}$$

$$Pn^* = \delta \frac{T_{\max} - T_0}{u_0 - u^*}, \quad Bi_T = \frac{hl}{k_T}, \quad Bi_m = \frac{h_m l}{k_m}, \quad Ko^* = \frac{\Delta H (u_0 - u^*)}{c (T_{\max} - T_0)},$$

$$Bi_m^* = Bi_m [1 - (1 - \varepsilon) Pn^* Ko^* Lu]$$

La résolution du système d'équations (1 à 5) est obtenue par différences finies en adoptant un schéma implicite pur. La température de l'air est considérée variable en fonction du temps. Le tableau 1, regroupe les valeurs avec lesquelles le problème direct a été résolu.

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

l(m)	0.05	T₀ (°C)	24	k_m (kg/ms^oM)	2.4×10^{-7}	Bi_m	3.33
ρ₀ (kg/m³)	2000	T_{max} (°C)	60	δ (°M/°C)	0.56	Lu	0.2
h_T (W/m²°C)	17	u₀ (°M)	80	c (J/kg°C)	607	Pn	0.084
h_m (kg/m²s°M)	1.6×10^{-5}	u[*]	40	c_m (kg/kg°M)	1.3×10^{-3}	Ko	49
k_T (W/m°C)	0.34	Bi_T	2.5	Δh (J/kg)	2.5×10^6	ε	0.2
q (W/m²)	36.72	Q	0.15				

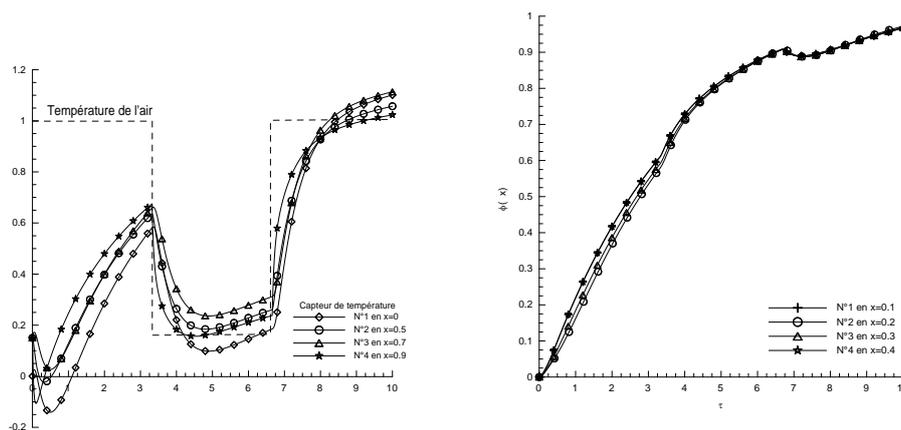


Figure 1: Température sans dimensions et fonction $\phi(x)$ en fonction du temps pour une évolution de la température de l'air en créneau

La figure 1 résume la solution du problème direct pour la température et la concentration en fonction du temps avec cette condition de température variable en forme de créneau. La température de départ est de 60°C jusqu'au tiers du temps de calcul maximal, durant le second tiers du temps elle chute à 30°C pour ensuite remonter à 60°C. La figure 1 montre que l'évolution de la température en fonction du temps suit celle de l'air. En raison de l'évaporation de l'eau de l'échantillon il arrive que la température de l'échantillon descende en dessous de la température initiale (ici 24°C), ce qui explique les valeurs négatives du graphe. L'évolution de la fonction ϕ

définie par $\phi(X, \tau) = \frac{u_0 - u(x, t)}{u_0 - u^*}$ montre bien que la concentration $u(x, t)$ dans

l'échantillon diminue en fonction du temps. Ajoutons que du fait que l'échantillon subisse un chauffage constant sur sa face arrière il apparaît normal que la température puisse dépasser celle de l'air au bout d'une certaine durée de chauffage.

3. LE PROBLEME INVERSE

L'objectif est d'identifier par inversion du problème représenté par les équations de (1 à 5) régissant le transfert de chaleur et de masse à travers un échantillon poreux sur la surface duquel l'humidité est évacuée non seulement par convection et mais aussi par évaporation. Pour cela nous utilisons la méthode de Levenberg-Marquardt consistant à minimiser au sens des moindres carrés l'écart entre le vecteur solution et le vecteur mesures, pour identifier les paramètres suivants : P_n , K_o , Bi_m , Bi_q , Lu et ε . Nous disposons pour cela de mesures simulées de la température et de la concentration en fonction du temps en quatre endroits. Les capteurs de concentration sont disposés en $x=0.1, 0.2, 0.3$ et 0.4 tandis que les capteurs de température sont disposés en $x=0, 0.5, 0.7$ et 0.9 . La procédure d'inversion consiste à minimiser au sens des moindres carrés la différence entre le vecteur solution estimée par le problème direct et le vecteur solution des mesures simulées. Le vecteur des paramètres correspondant à ce minimum est la solution recherchée. Cette procédure est présentée en détail dans les références [5,6,7].

L'analyse de la matrice de covariance (Tableau 2) des paramètres à identifier montre qu'ils sont faiblement corrélés entre eux, on peut par conséquent les identifier tous en même temps.

Tableau 2 : Matrice de covariance

1.17082	-.50383	-.00053	-.36188	4.21443	-.14139
-.50383	4.07535	-.11229	.28399	-2.26843	.11473
-.00053	-.11229	.00425	-.00273	-.02332	.00282
-.36188	.28399	-.00273	.23817	-1.29559	.03148
4.21443	-2.26843	-.02332	-1.29559	16.83561	-.71402
-.14139	.11473	.00282	.03148	-.71402	.04661

D'un autre côté, nous constatons que les sensibilités par rapport à P_n et ε sont très faibles dans le problème d'Orlande et al. [1 et 2], pour pouvoir améliorer ces sensibilités, nous avons fait varier la température de l'air en fonction du temps. Plusieurs fonctions d'évolution ont été essayées dont l'échelon, le créneau, l'évolution en triangle et l'évolution en sinusoïde. Les sensibilités par rapport aux paramètres à identifier, pour le cas de l'évolution en créneau, sont représentées sur la figure 2. Nous pouvons constater que les sensibilités par rapport aux paramètres à estimer sont

relativement importantes pour permettre leurs identifications et notamment pour les deux paramètres P_n et ε qui bien qu'ayant de faibles sensibilités peuvent raisonnablement être estimés. Nous montrons qu'une évolution variable de la concentration de l'air permet aussi d'améliorer les sensibilités par rapport à ces deux paramètres.

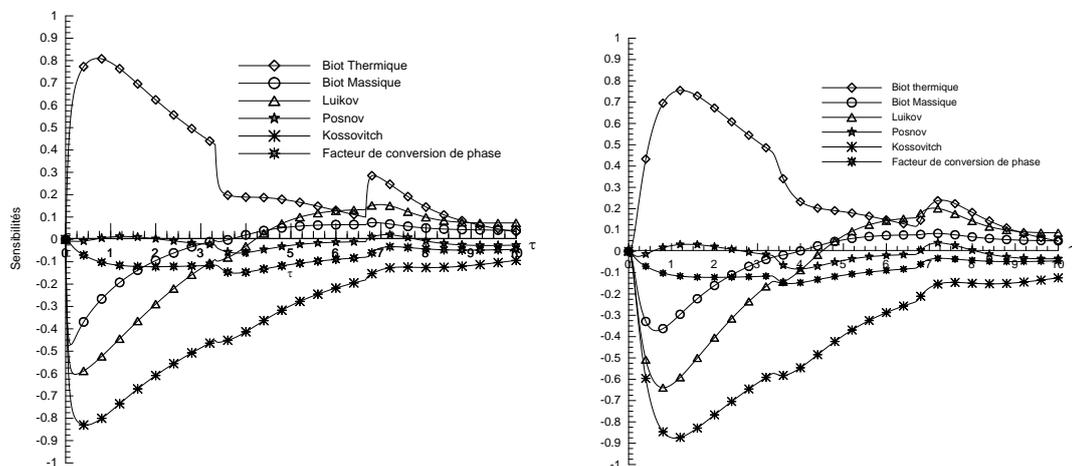


Figure 2 : Sensibilités aux capteurs N°1 et 4, des températures par rapport aux six paramètres à identifier à savoir: Bi_T , Bi_m , Lu , P_n , Ko et ε .

Les résultats obtenus par l'inversion sont regroupés sur le tableau 3. Pour un bruit de 1% par rapport à la valeur maximale de la variable, les résultats sont proches des valeurs exactes dans un intervalle relativement faible. Pour un bruit de 5% les valeurs des paramètres varient entre 1 et 7% et restent tout de même exploitables.

Tableau 3 : Résultats obtenus par inversion pour la céramique

Param.	Exactes	Estimées ($\sigma'=0$)	Estimées ($\sigma'=1\%$ *)	Estimées ($\sigma'=5\%$ **)	% erreur *	% erreur (**)
Bi_T	2.5	2.5000	2.51501	2.5767	0.6	3
Bi_m	3.33	3.3333	3.31526	3.2423	0.5	2.7
Lu	0.238	0.2380	0.23841	0.2399	0.1	0.7
P_n	0.504	0.5040	0.49768	0.4723	1.3	6.5
Ko	8.23723	8.2372	8.28164	8.4645	0.6	2.8
ε	0.2	0.2000	0.19878	0.1939	0.6	3

$F_s = F_e + \omega\sigma$ avec $\sigma = \sigma' \times F_{\max}$, ω : variable aléatoire (générée par la sou routine DRRNOR (IMSL)).

CONCLUSION

Cette étude purement numérique nous a permis d'identifier simultanément les propriétés thermo-hydriques de matériaux poreux telles que les conductivités thermique et massique, le thermo-gradient, le facteur de changement de phase et les coefficients de convection de chaleur h_T et de masse h_m , représentés par les grandeurs

sans dimensions suivantes Bi_T et Bi_m , Ko , Pn , Lu et ε . Dans une première phase, nous avons proposé d'utiliser une température de l'air de séchage variable en fonction du temps ce qui nous a permis d'améliorer quelque peu les sensibilités par rapport au Pn et ε afin de pouvoir les identifier en totalité. L'utilisation de la méthode de Levenberg-Marquardt a permis d'identifier les six paramètres recherchés en adoptant des mesures simulées et bruitées de température et de concentration (quatre capteurs pour chaque variable). La finalité de ce travail est en fait d'étudier le comportement thermo-hydrrique de matériaux nouveaux, types bétons de chanvre, bétons au polystyrène, à la sciure de bois et aux copeaux métalliques en usage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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. I.J.H.M.T 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. Dulikrvich. Estimation of drying thermophysical properties by using temperature measurements, 4th 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. Ozisik, 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, New York 1977.
7. O.M. Alifanov, E. Artyukin, 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'indentification des propriétés thermo-hydrriques d'éco-matériaux de type bétons de chanvre, de sciure de bois et de copeaux métalliques en usage.