

Etude de l'évolution de l'humidité et de la température lors du séchage d'un milieu poreux: le bois

L. Aissani^{1*}, N. Attaf² et E. Mezaache³

¹ Laboratoire de Moteurs à Combustion Interne et Pollution,
Université des Frères Mentouri, Constantine, Algérie

² Laboratoire de Couches Minces et Interfaces, Université des Frères Mentouri, Constantine, Algérie

³ Laboratoire de Physico Chimie des Surfaces et Interfaces, Université du 20 Août 1955, Skikda, Algérie

Résumé - Dans ce travail, nous présentons un modèle mathématique décrivant les évolutions des transferts de chaleur et de masse dans un corps poreux humide baignant dans un milieu aux conditions de température et d'humidité déterminées. Les phénomènes couplés de transfert de chaleur et de masse sont décrits par les équations spatio-temporelles bidimensionnelles de Luikov. Les équations adimensionnelles et leurs conditions aux limites sont discrétisées à l'aide de la méthode des différences finies: explicite pour la dérivée partielle temporelle et implicite pour les dérivées spatiales. Les évolutions de la température et de l'humidité sont représentées, dans le temps et dans l'espace, sous formes d'isothermes et d'isoteneurs en eau. Elles nous ont permis de mettre en évidence, dans le corps étudié, le développement de trois régions avec des gradients de température et d'humidité, ainsi que des taux de changements de phase différents. Ce résultat est en rapport avec la configuration géométrique et les conditions aux limites imposées.

Abstract - In this work, we present a mathematical model relating the evolutions of heat and mass transfer in a moist porous body situated in a medium with imposed moisture and temperature conditions. The phenomena of heat and mass transfer are described by the coupled two-dimensional Luikov's equations. The difference finite method is used for the numerical resolution of dimensionless equations system and their boundary conditions. The evolutions of these parameters are represented, in time and space, as isothermals and iso-concentrations forms. They permit us to show the development of three regions with distinct moisture and thermal gradients and the change in the rates of phases. This result is related to the geometrical configuration and the imposed boundary conditions.

Mots clés: Séchage - Milieu poreux - Luikov - Gauss-Seidel.

1. INTRODUCTION

Le séchage est l'une des techniques humaines les plus anciennes servant à diminuer le taux d'humidité dans divers matériaux. Il est utilisé dans le textile, l'agriculture, l'habitat et l'industrie. Dans le premier séchoir industriel à bois qui fut construit en Angleterre, en 1727, à l'usage de la construction navale [1], la circulation d'air n'y est assurée que par convection naturelle.

Pendant ces dernières décennies, malgré l'augmentation des prix des sources d'énergie conventionnelle, des contraintes plus strictes sur la qualité du produit, la préservation de l'environnement et la sécurité ont été imposées. Pour satisfaire à ces exigences, des actions de recherche sont menées afin d'optimiser les procédés industriels.

* aissalb@yahoo.fr

Sur le plan scientifique, le séchage est une opération caractérisée par des transferts couplés de chaleur, de masse et de quantité de mouvement. L'abaissement du taux d'humidité crée dans le produit un vide interstitiel qui occasionne, dans une certaine limite, une variation de forme et de dimensions (retrait, déformation, fissuration, ...).

Ces changements de forme peuvent rendre le produit impropre à l'usage. En conséquence, il est utile d'approfondir l'étude des différents phénomènes thermiques et physiques entrant dans l'opération de séchage.

Pour la modélisation mathématique de ces phénomènes, Luikov [2-4] a proposé un modèle, qui est basé sur un système couplé d'équations de diffusion, tenant compte de l'effet du gradient de température sur la migration de l'humidité. Le calcul des champs de température et d'humidité dans un milieu poreux, à partir des conditions initiales et aux limites et des propriétés thermo physiques apparentes dans la formulation, constitue un problème direct de transfert de chaleur et de masse [5, 6].

Pour des cas simples, tels que les formes cylindrique et sphérique, les solutions obtenues par Luikov et Mikhailov [7] sont basées sur l'utilisation des transformations de Laplace. Ces mêmes problèmes sont traités par Mikhailov et Özisik [8] par la méthode de transformation des intégrales finies et ont aboutis aux mêmes solutions que celles de Luikov et Mikhailov.

Par ailleurs, Lobo *et al.* [9], montrent, plus tard, que les solutions précédentes ignorent la possibilité d'existence de valeurs propres dans le plan complexe, et que cette voie peut être examinée. Si les valeurs propres existent, ces solutions peuvent induire des erreurs importantes.

Dans le présent travail, nous tentons de modéliser le séchage d'une plaque épaisse d'un matériau poreux humide soumis, parallèlement à sa face supérieure, à un écoulement laminaire et permanent d'air chaud. La résolution des équations couplées de transfert de chaleur et de masse dans le matériau humide nous permet de suivre l'évolution spatio-temporelle de la température et de l'humidité au sein de ce corps.

2. FORMULATION DU PROBLEME

2.1 Position du problème

Nous considérons le modèle physique suivant: le matériau humide de forme parallélépipédique (h , L , l) est représenté sur la figure 1. x représente la distance mesurée suivant le sens de l'écoulement de l'air asséchant, parallèlement à la surface supérieure du matériau, l'origine 0 est prise sur sa surface inférieure, y est la coordonnée normale à la surface. La face gauche ($x = 0$) de ce dernier est soumise à un courant d'air chaud avec les conditions (U_∞ , T_∞ et w_∞) supposées constantes au bord d'attaque.

Afin de simplifier la formulation des équations, nous considérons les hypothèses suivantes:

- L'étude de la couche limite au-dessus et au-dessous des faces supérieures et inférieures du matériau ne fait pas l'objet de ce travail.
- Seule l'interface air-matériau se trouve en contact avec l'air ambiant.
- Les effets de bord des autres faces sont négligeables de sorte qu'il n'y ait ni échange thermique ni échange massique.

Le phénomène de thermo-migration est bidimensionnel.

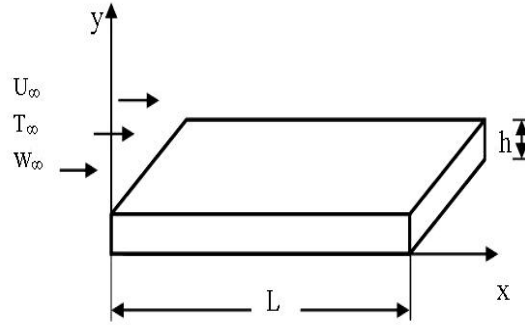


Fig. 1: Représentation schématique du modèle et du système de coordonnées

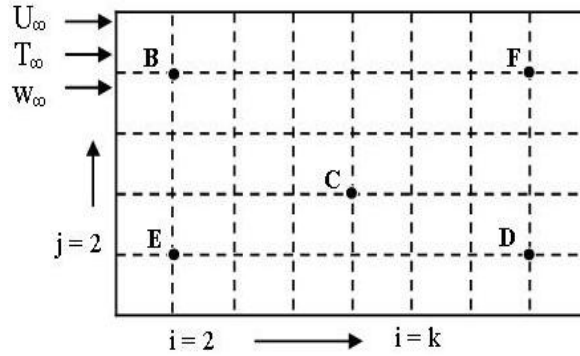


Fig. 2: Définition du maillage et localisation des points représentatifs:
 B(2, 20), C(20, 10), D(38, 2), E(2, 2), F(38, 20)

Ces hypothèses conduisent au système d'équations ci-dessous qui décrit les transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux et humides connues sous le nom d'équations de Luikov [10]:

Equation d'énergie

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_q \times \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \varepsilon \times \frac{L_v}{C_p} \times \frac{\partial w}{\partial t} \quad (1)$$

Equation de transfert d'humidité

$$\frac{\partial w}{\partial t} = a_m \times \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + a_m \times \delta \times \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

Les conditions initiales et aux limites

a- Conditions initiales dans le produit

$$t \leq t_0, w = w_0, T = T_0 \quad (2)$$

b- Conditions aux limites

Plan: $x = 0$ (2a)

Pour l'air chaud: $T = T_\infty, w = w_\infty$

Pour le produit:

Energie

$$-\lambda_{pT} \frac{\partial T}{\partial x} = h_T (T(0, y) - T_\infty) + (1 - \varepsilon) \cdot L_v^* \cdot \rho_p^* \cdot a_m \cdot (w(0, y) - w_0)$$

$w(0, y)$ est calculé à partir des isothermes de sorption de Bradley:

$$h_r = \exp[-(K_2 \cdot K_1^{HB} + K_3)] \quad \text{où HB est la teneur en eau (\%) du produit.}$$

Les coefficients K_1 , K_2 et K_3 sont donnés, pour le bois, par Simpson [11] et sont de la forme suivante:

$$K_1 = 0.501 + 0.00262 T - 0.505 \times 10^{-5} T^2$$

$$K_2 = -7.63 + 0.0807 T - 0.144 \times 10^{-3} T^2$$

$$K_3 = 0.0144 + 0.295 \times 10^{-4} T, \quad \text{où la température } T \text{ est en degré K.}$$

L'humidité relative h_r est aussi reliée à la pression de saturation par $h_r = P_v / P_{sat}$.

P_{sat} est donnée, en fonction de la température, par la relation de Bertrand [12]. P_v est la pression partielle de vapeur d'eau, elle est reliée à la fraction massique dans l'air par la relation:

$$w = 0.622 \times h_r \times \left\{ \frac{P_{sat}}{P - 0.378 \times h_r \times P_{sat}} \right\}$$

Masse

$$-\lambda_{pm} \frac{\partial w}{\partial x} - \lambda_{pm} \frac{\partial T}{\partial x} = h_m \cdot (w(0, y) - w_\infty)$$

$$\text{Plan:} \quad y = 0; \quad 0 \leq x \leq L \quad (2b)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

$$\text{Plan:} \quad y = h; \quad 0 \leq x \leq L \quad (2c)$$

$$\text{Pour l'air chaud:} \quad T = T_\infty, \quad w = w_\infty$$

Pour le produit:

Energie

$$-\lambda_{pT} \frac{\partial T}{\partial y} = h_T (T(x, h) - T_\infty) + (1 - \varepsilon) \cdot L_v \cdot r_0 \cdot a_m \cdot (w(x, h) - w_\infty)$$

$w(x, h)$ est calculé de la même manière que $w(0, y)$.

Masse

$$-\lambda_{pm} \frac{\partial w}{\partial y} - \lambda_{pm} \frac{\partial T}{\partial y} = h_m \cdot (w(x, h) - w_\infty)$$

$$\text{Plan:} \quad y = L; \quad 0 \leq y \leq h \quad (2d)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0$$

3. ADIMENSIONNALISATION DES EQUATIONS

Les variables adimensionnelles suivantes:

$$x^* = \frac{x}{L}; y^* = \frac{y}{h}; T^* = \frac{T}{T_\infty}, t^* = F_0 = \frac{a_q \cdot t}{h^2}; w^* = \frac{w}{w_0}$$

Le critère de similitude Lu caractérise le rapport entre la diffusivité massique et thermique. Les critères de Pn et Lo représentent les échanges internes de chaleur et de masse au sein du produit, le critère de Bi_T représente l'échange de chaleur à la surface. Les petites valeurs de Biot correspondent à un champ de potentiels non développé où les échanges de chaleur se développent lentement [13].

Les équations des transferts de chaleur et de masse dans le produit sont:

Equation d'énergie

$$\frac{\partial T^*}{\partial F_0} = A_1 \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} + \varepsilon \cdot K_0 \cdot \frac{\partial w^*}{\partial F_0} \quad (3)$$

Equation de transfert d'humidité

$$\frac{\partial w^*}{\partial F_0} = Lu \cdot \left(A_1 \cdot \frac{\partial^2 w^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 w^*}{\partial y^{*2}} \right) + Lu \cdot Pn \cdot \left(A_1 \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (3a)$$

Les conditions initiales et aux limites deviennent:

- Conditions initiales:

$$t^* \leq t_0^*, w^* = 1, T^* = T_0 / T_\infty \quad (4)$$

- Conditions aux limites associées sont:

Plan: $x^* = 0$ (4a)

Pour l'air chaud: $T^* = 1, w^* = 1$

Pour le produit:

Energie:

$$\frac{\partial T^*}{\partial x^*} = -Bi_T \cdot (T^*(0, y^*) - 1) - (1 - \varepsilon) \cdot Lu \cdot K_0 \cdot (w^*(0, y^*) - 1)$$

Masse:

$$\frac{\partial w^*}{\partial x^*} + Pn \cdot \frac{\partial T^*}{\partial x^*} = -Bi_m \cdot (T^*(0, y^*) - 1)$$

Plan: $y^* = 0; \quad 0 \leq x^* \leq 1$ (4b)

$$\frac{\partial T^*}{\partial y^*} = \frac{\partial w^*}{\partial y^*} = 0$$

$$\text{Plan:} \quad y^* = h/L; \quad 0 \leq x^* \leq 1 \quad (4c)$$

$$\text{Pour l'air chaud:} \quad T^* = 1, \quad w^* = w_\infty^*$$

Pour le produit:

Energie:

$$\frac{\partial T^*}{\partial y^*} = -\text{Bi}_T \cdot (T^*(x^*, h/L) - 1) - \text{Lu} \times K_0 \times \frac{\partial w^*}{\partial y^*}$$

Masse:

$$\frac{\partial w^*}{\partial y^*} + \text{Pn} \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = -\text{Bi}_m \cdot (T^*(x^*, h/L) - 1)$$

$$\text{Plan:} \quad x^* = 1; \quad 0 \leq y^* \leq 1/L \quad (4d)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial x^*} = \frac{\partial w^*}{\partial x^*} = 0$$

4. METHODE DE RESOLUTION

Les équations couplées de transfert de chaleur et de masse [14] et leurs conditions aux limites sont adimensionnalisées et discrétisées (3) et (4a, 4b, 4c 4d) sont discrétisées à l'aide de la méthode des différences finies: explicite pour la dérivée partielle temporelle et implicite pour les dérivées spatiales. On obtient un système de N équations à N inconnues qui découle d'un maillage ($m \otimes n$) (Fig. 2) avec $m = L/\Delta x^*$ et $n = (h/L)/\Delta y^*$. Ce système est résolu à l'aide de la méthode de Gauss-Seidel [15].

Les calculs ont été effectués avec les paramètres suivants:

Produit

Teneur en eau initiale $w = 0.35 \text{ kg/kg}$

Température initiale $T = 20^\circ\text{C}$

Teneur en eau finale du bois $w_{\text{cr}} = 0.13 \text{ kg/kg}$.

Air

Température $T_\infty = 40^\circ\text{C}$ et 80°C

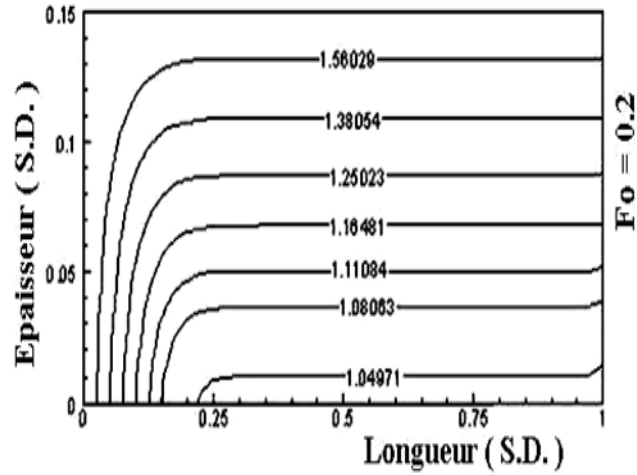
Teneur en eau $w_\infty = 0.01 \text{ kg/kg}$.

Pas de discrétisations

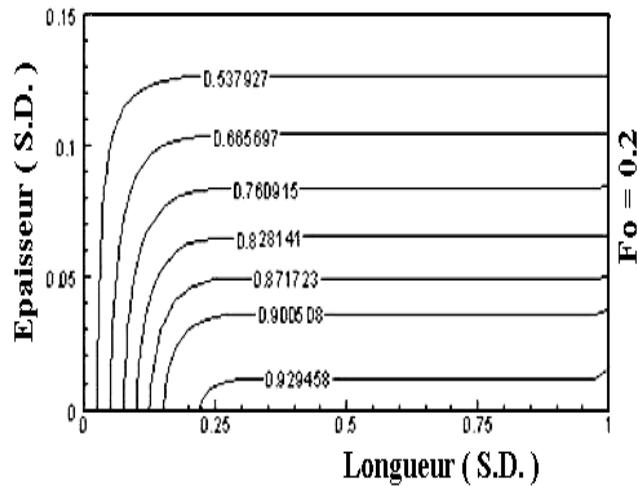
$$\Delta x = 25 \times 10^{-3}, \quad \Delta y = 7.5 \times 10^{-3}, \quad \Delta \text{Fo} = 2 \times 10^{-4}.$$

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats sont présentés en valeurs adimensionnelles. Les évolutions, en fonction du nombre de Fourier, des deux paramètres étudiés, à savoir: la température et la teneur en eau sont représentées respectivement sur les figures 3-a et 3-b.



a- la température



b- la teneur en eau

Fig. 3: Evolutions, température et teneur en eau, en fonction du nombre de Fourier

Pour les faibles valeurs de Fo inférieures à 0.2, les gradients de température et d'humidité sont importants. Au delà de cette valeur, nous observons une lente progression des fronts de séchage comparativement aux augmentations sensibles des températures, ceci est dû à la migration d'eau liquide, se trouvant initialement dans le produit, vers les surfaces de séchage.

Compte tenu de la configuration géométrique du produit étudié, nous observons l'existence de trois zones:

i- deux zones à gradients monodimensionnels de température et d'humidité. De plus, on note que les évolutions dans les deux zones ne sont pas identiques: les gradients selon x^* sont plus importants que selon y^* . On en déduit que le séchage sur la face avant est plus conséquent que sur la face supérieure;

ii- une zone constituée par l'intersection des deux surfaces de transferts (au voisinage de $x^* = 0$ et $y^* = h/L$) dans laquelle les gradients sont bidimensionnels et de valeurs plus grandes. Ce phénomène de coin est confirmé par les résultats de Liu *et al.* [16], ainsi que par Boukadida [17] qui l'attribue à la valeur élevée des coefficients de transfert et de masse dans cette zone. C'est ce coin haut gauche qui va rentrer en premier dans le domaine hygroscopique et qui va finir par sécher en premier.

Cette configuration change en grandeur, mais reste invariable dans la forme pour toutes les valeurs de Fo , c'est-à-dire durant toute la période de séchage. Ce résultat est en accord avec les conditions aux limites imposées.

Les figures 4 et 5 représentent les variations avec le temps (Fo) de la température et de l'humidité en des points choisis dans le matériau, en l'occurrence le point B situé au voisinage immédiat de l'interface supérieure et le point C positionné au milieu du solide (Fig. 2). Ces résultats correspondent à deux températures de séchage différentes, de valeurs 40 °C et 80 °C.

Dans tous les cas, on observe qu'au début du processus de séchage ($Fo = 0.06$), la température du matériau augmente rapidement. Ce phénomène à une évaporation rapide beaucoup plus accentuée pour le point B que pour le point C. On observe d'autre part que les évolutions de ces deux paramètres sont décalées dans le temps, plus rapidement pour B que pour C. Pour les valeurs de Fo supérieures à la valeur indiquée les gradients deviennent moins importants. Ces résultats sont en bon accord avec ceux trouvés par Mikhailov [5].

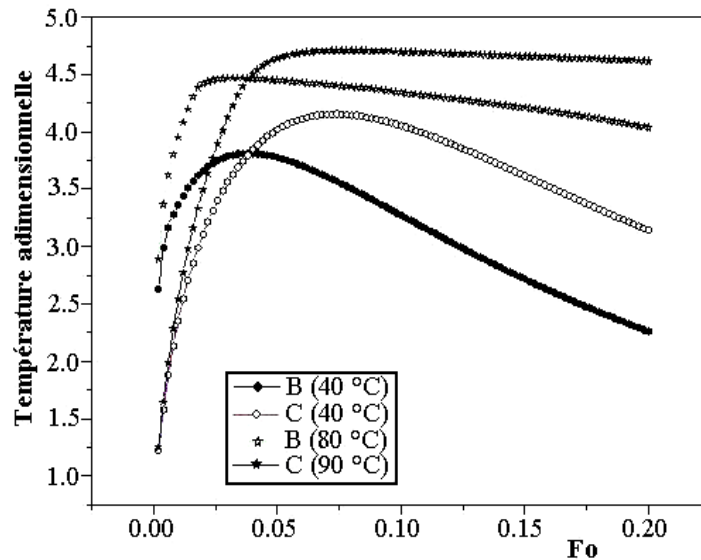


Fig. 4: Evolutions de la température dans le produit en fonction du temps, pour diverses températures de l'air

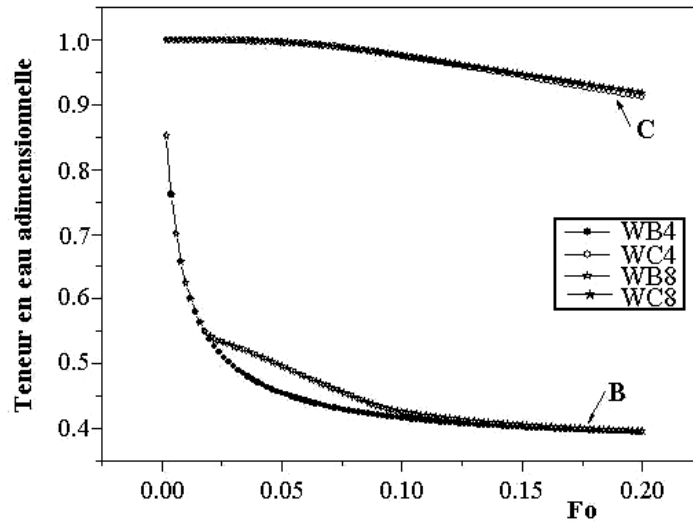


Fig. 5: Evolution de la teneur en eau dans le produit en fonction du temps pour diverses températures de l'air asséchant

La figure 6 représente l'évolution des vitesses de séchage, en divers points du matériau, à savoir les points B et C précédents auxquels s'ajoutent les points D, E et F répartis uniformément dans la géométrie du solide. Ces résultats sont obtenus pour une vitesse de séchage de 80°C. On note que pour les points proches du front de séchage B, E, F, le séchage débute avec une grande vitesse et se stabilise assez rapidement, par contre pour les points C et D, l'évolution est inverse et de moindre grandeur. A partir de Fo de l'ordre de 0.06, le phénomène de séchage devient uniforme dans tous les points du solide.

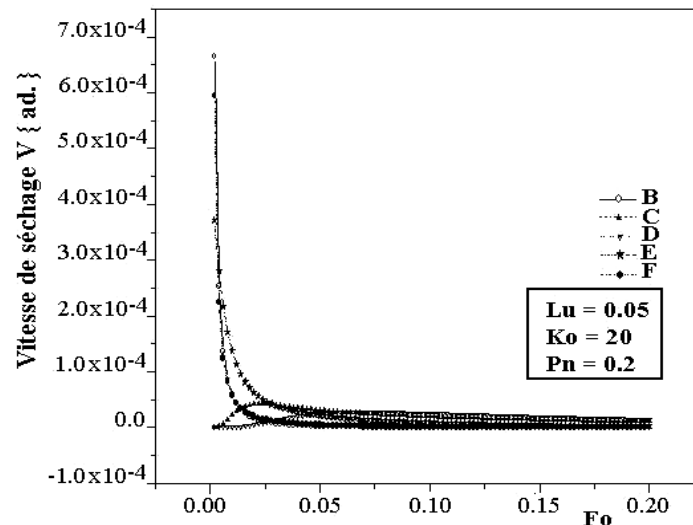


Fig. 6: Evolutions des vitesses de séchage en fonction du temps pour les points B(2, 20), C(20, 10), D(38, 2), E(2, 2), F(38, 20).

Dans leur ensemble, les résultats concordent avec ceux des travaux de Mikhailov [5] et Nijdam *et al.* [18] qui ont modélisé un bois de grande perméabilité.

6. CONCLUSION

En se basant sur le modèle mathématique de Luikov, nous avons élaboré un programme qui permet de décrire les évolutions de la température et de la teneur en eau au cours du séchage dans un milieu poreux constitué d'un morceau de bois. Les résultats de cette étude montre que le séchage ne s'effectue pas de manière uniforme pour l'ensemble des points du matériau. L'extraction de l'humidité est rapide au début du processus et devient difficile par la suite, lorsque la vitesse de séchage devient uniforme pour tout le matériau. Ce phénomène correspond à la valeur de F_0 voisine de 0.06.

La présente étude constitue une approche succincte d'un phénomène complexe qui fait intervenir plusieurs paramètres, tels que le taux de changements de phase, le coefficient de thermo migration, les nombres adimensionnels Lu , Pn , Bi_T et Ko qui influent sur les potentiels de transfert de chaleur et de masse, ainsi que sur leurs taux de changements.

De plus, le bois étant un matériau, outre qu'il soit poreux et vivant, est anisotropique, aux propriétés physiques assez complexes. Son séchage occasionne des contraintes et des déformations dont il est important de tenir compte [19].

NOMENCLATURE

H, L	Epaisseur et longueur du solide, (m)
U	Vitesse d'écoulement de l'air, (m.s)
T	Température de l'air, (K)
w	Humidité absolue de l'air, (kg/kg d'air sec)
a_m	Coefficient de diffusivité massique, ($m^2.s^{-1}$)
a_a	Coefficient de diffusivité thermique, ($m^2.s^{-1}$)
C_p	Capacité calorifique massique équivalente du milieu poreux, (J/kg.K)
L_v	Chaleur latente de vaporisation de l'eau, (J/kg.deg)
h_c	Coefficient de convection de l'air, ($W/m^2.deg$)
h_r	Humidité relative de l'air, (s.d.)
P_{sat}	Pression de saturation de l'air, (Pa)
P_v	Pression partielle de vapeur d'eau, (Pa)

Lettres grecques

ρ_a	Masse volumique de l'air, (kg/m^3)
λ_p	Conductivité thermique du milieu poreux, ($W/m.deg$)
ε	Taux de changement de phase, (s.d.)
δ	Coefficient de thermo migration, (K^{-1})

Nombres sans dimension

Fo	Nombre de Fourier
Lu	$Lu = a_m / a_q$, Nombre de Luikov
Pn	$Pn = \delta \cdot T_\infty / w_0$, Nombre de Posnov
Ko	$Ko = (L_v w_0) / C_p T_\infty$, Nombre de Kossovitch
A ₁	$A_1 = (h/L)^2$, ..Rapport des dimensions du matériau
B _i	$B_i = h_T L / \lambda$, Nombre de Biot

Indices

a : air, p : produit, T : thermique, m : massique
 ∞ : loin de la paroi, *: grandeur adimensionnelle

REFERENCES

- [1] C. Moyne et M. Roques, Revue Générale de Thermique, Tome XXV, N°292, pp. 207 - 213, Avril 1986.
- [2] A.V. Luikov, 'Application of Methods of Thermodynamics of Irreversible Processes to Investigation of Heat and Mass Transfer in a Boundary Layer', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 3, pp. 167 – 174, 1961.
- [3] A.V. Luikov, 'Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies', in Advances in Heat Transfert, Academic Press, New York, 1964.
- [4] A.V. Luikov, 'Application of Irreversible Thermodynamics Methods to Investigation of Heat and Mass Transfer', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 9, pp. 139 – 152, 1966.
- [5] M.D. Mikhailov, 'Exact Solution of Temperature and Moisture Distributions in a Porous Half-Space with Moving Evaporation Front', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 18, pp. 797 – 804, 1975.
- [6] J.Y. Liu and S. Cheng, 'Solutions of Luikov's Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 34, N°7, pp. 1747 – 1754, 1966.
- [7] A.V. Luikov and Y.A. Mikhailov, 'Theory of Energy and Mass Transfer', Pergamon Press, Oxford, 1965.
- [8] M.D. Mikhailov and M.N. Özisik, 'Unified Analysis and Solutions of Heat and Mass Diffusion', J. Wiley, New York, 1984.
- [9] P.D. Lobo, M.D. Mikhailov and M.N. Özisik, 'On the Complex Eigenvalues of Luikov System of Equations', Drying Technology, Vol. 5, N°2, pp. 273 – 286, 1987.
- [10] A.V. Luikov, 'Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies', International Journal Heat and Mass Transfer, Vol. 18, N°1, pp. 1 – 17, 1975.
- [11] W.T. Simpson, 'Predicting Equilibrium Moisture Content of Wood by Mathematical Models, Wood and Fiber Sciences, Vol. 5, N°1, pp. 41 – 49, 1973.

- [12] J.F. Saccadura, '*Initiation aux Transferts Thermiques*', CAST, INSA de Lyon, Tec. & Doc., Lavoisier, 1978.
- [13] A.V. Luikov, '*Heat and Mass Transfers*', English Translation, Moscow, Ed. Mir., 1980.
- [14] H. Amir, '*Séchage d'un Matériau Poreux Humide par Convection Forcé d'Air Chaud*', Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Perpignan, 1985.
- [15] B. Carnahan, H.A. Luther and J.O. Wilkes, '*Applied Numerical Methods*', J. Willey & Sons, N.Y. 1967.
- [16] W. Liu, S. Shen, S.B. Riffat, '*Heat Transfer and Phase Change of Liquid in an Inclined Enclosure Packed with Unsaturated Porous Media*', International Journal of Heat and Mass Transfer', Vol. 45, N°26, pp. 5209 - 5219, 2002.
- [17] N. Boukadida, '*Transferts Couplés de Chaleur et de Masse dans un Canal Horizontal. Application au Séchage Convectif*', Proceeding of ICEPC'07, Université Mentouri, Constantine, pp. 337 – 346, 2007.
- [18] J.J. Nijdam, T.A.G. Langrish and R.B. Keey, '*A High-Temperature Drying Model for Softwood Timber*', Chemical Engineering of Sciences, Vol. 55, N°18, pp. 3585 – 3598, 2000.
- [19] R. Rémond, J. Passard and P. Perré, '*The Effect of Temperature and Moisture Content on the Mechanical Behaviour of Wood: A Comprehensive Model Applied to Drying and Bending*', European Journal of Mechanics, A. Solids, Vol. 26, N°3, pp. 558 – 572, 2007.