

Transferts thermique et massique dans un milieu poreux soumis à un écoulement turbulent

Dalel Helel , Besma Graba , Nizar Lefi, Noureddine Boukadida

*Laboratoire d'Energie et de Matériaux, Ecole Supérieure des Sciences et de la Technologie
de Hammam Sousse, Tunisie*

Heleldalel@yahoo.fr, besma_grabe@yahoo.fr, nizarlefi@yahoo.fr, noureddine.boukadida@gmail.com

Résumé : Ce travail consiste à étudier numériquement les transferts de chaleur et de masse lors du séchage d'un milieu poreux non saturé et indéformable ayant les caractéristiques d'une brique. Ce milieu est placé à l'intérieur d'un canal horizontal exposé à un écoulement turbulent en convection forcée d'un mélange air-vapeur d'eau. Pour le milieu poreux, le modèle numérique utilisé est celui de Whitaker basé sur la moyenne sur un VER. Le modèle de turbulence utilisé est le modèle K- ϵ à faible nombre de Reynolds de Launder et Sharma. Nous présentons essentiellement dans ce travail l'évolution spatio-temporelle des différents paramètres à l'intérieur du milieu poreux, à l'interface et dans le fluide asséchant. La prise en compte de la variabilité des coefficients locaux d'échange thermique et massique permet de mieux cerner et bien comprendre les mécanismes des transferts de chaleur et de masse au sein du milieu poreux et dans le fluide asséchant au cours du processus de séchage.

Mots clés :

Milieu poreux, Transfert thermique, Ecoulement turbulent, Cinétique de séchage

I. Introduction

Les transferts couplés de chaleur et de masse au sein d'un milieu poreux interviennent dans des nombreux processus naturels ou industriels, à des échelles fortement variables (champs pétroliers, alimentation hydrique des plantes, séchage des produits ou des matériaux de construction, etc.). Dans une application du type séchage, la principale préoccupation des industriels et des chercheurs est donc de mettre au point de nouvelles techniques permettant d'améliorer la qualité du produit à sécher tout en optimisant la consommation d'énergie. Pour atteindre cet objectif il faut maîtriser les différents mécanismes complexes des transferts de chaleur et de masse à l'intérieur du milieu poreux et dans le fluide asséchant au cours de l'opération de séchage. Parmi les études scientifiques approfondies menées sur les processus mis en œuvre lors d'une opération de séchage et sur l'étude des principaux procédés de séchage, nous citons les travaux de Basilico et al. [1] qui traitent la formulation mathématique du problème et de P. Perré et al.[2] qui sont intéressés aux phénomènes des transferts de chaleur et de masse à l'intérieur du bois, et à son couplage avec les conditions externes lors d'un séchage par convection forcée à basse et à haute température. Mobarki et al. [3-4] ont développé un modèle mathématique qui gouverne les transferts de chaleur et de masse durant le séchage convectif et convectif-radiatif d'un milieu poreux non saturé. Le but principal de ce modèle est de résoudre des problèmes numériques rencontrés au moment de l'apparition d'un front du séchage lorsque l'opération du séchage est faite à hautes température et concentration en vapeur d'eau ambiantes. Dans le même thème, Helel et al. [5] ont étudié le transfert de chaleur et de masse par convection forcée lors du séchage d'un milieu poreux par un écoulement laminaire d'air humide dans un canal horizontal. Ils ont principalement montré que la variabilité spatiotemporelle des coefficients des transferts de chaleur et de masse affecte sensiblement les profils de la température, de la pression et de la saturation en eau dans le milieu poreux au cours de processus du séchage.

Le présent travail consiste à étudier numériquement les transferts bidimensionnels de chaleur et de masse pour simuler le processus de séchage d'un milieu poreux non saturé exposé à un écoulement turbulent en convection forcée à l'intérieur d'un canal horizontal.

2. Position du problème

Le système étudié est formé d'une plaque poreuse horizontale de longueur 4m et de faible épaisseur 1.2cm, ayant les caractéristiques de la brique constituée d'une matrice solide inerte et indéformable d'une phase liquide (eau pure) et d'une phase gazeuse contenant de l'air sec et de la vapeur d'eau. La face haute de la plaque poreuse représente la paroi basse d'un canal plan horizontal de longueur 4m. Cette plaque est exposée à

un écoulement convectif forcé rentrant dans le canal dont les paramètres ambiants (pression, température et concentration en vapeur d'eau) sont contrôlés. Les parois basse et haute du canal sont écartées d'une distance de 10cm. Les trois autres faces de la plaque sont considérées adiabatiques et imperméables à la matière. Le milieu poreux est initialement isotherme et en équilibre hydrostatique.

3. Formulation

3.1 Equations de conservation

Les équations de conservation s'écrivent:

3.1.1 Dans le canal

Les équations exprimant la conservation de la masse, la quantité de mouvement, de l'énergie et des espèces sont représentées comme suit :

$$\frac{\partial(\rho_g u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_g v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_g u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho_g v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p_g}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} [(\mu_g + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial y}] \quad (2)$$

$$\rho_g c_{pg} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} [(\lambda_g + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial y}] + \rho_g (D_v + D_t)(c_{pv} - c_{pa}) \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial C_v}{\partial y} \quad (3)$$

$$\rho_g u \frac{\partial C_v}{\partial x} + \rho_g v \frac{\partial C_v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} [\rho_g (D_v + D_t) \frac{\partial C_v}{\partial y}] \quad (4)$$

Le modèle utilisé est le modèle k-ε à bas nombre de Reynolds de Launder et Sharma dont l'efficacité a été prouvée dans plusieurs études d'écoulements turbulents. L'équation de l'énergie cinétique turbulente et l'équation du taux de dissipation turbulent sont les suivantes :

$$\rho_g u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho_g v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} [(\mu_g + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial y}] + \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \rho_g \varepsilon \quad (5)$$

$$\rho_g u \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x} + \rho_g v \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} [(\mu_g + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial y}] + C_1 f_\mu \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \frac{\tilde{\varepsilon}}{k} - \rho_g C_2 f_2 \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{k} + E \quad (6)$$

avec μ_t est la viscosité turbulente définie par:
$$\mu_t = \frac{C_\mu f_\mu \rho_g k^2}{\tilde{\varepsilon}}$$

où f_μ est une fonction d'amortissement dépendante de la viscosité.

$$E = 2\mu_g \mu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2, f_\mu = \exp \left[\frac{-3.5}{(1 + Re_t/50)^2} \right], f_1 = 1.0, f_2 = 1 - 0.3 \exp \left(-Re_t^2 \right) \text{ et } Re_t = \frac{k^2}{v \tilde{\varepsilon}}$$

Les constantes de ce modèle sont :

C_μ	σ_k	σ_ε	C_1	C_2
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92

3.1.2 Dans le milieu poreux

- Lois de Darcy pour le liquide et pour le gaz :

$$\bar{V}_l = -\frac{KK_l}{\mu_l} \left[\nabla (\bar{P}_g - P_c) + \bar{\rho}_l \cdot g \right] \quad (7)$$

$$\bar{V}_g = -\frac{KK_g}{\mu_g} \nabla (\bar{P}_g) \quad (8)$$

-Equations macroscopiques de conservation de la masse des phases liquide, vapeur et gazeuse :

$$\frac{\partial \varepsilon_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{V}_l) = -\frac{\dot{m}}{\rho_l} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}_v \bar{V}_v) = \dot{m} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}_g \bar{V}_g) = \dot{m} \quad (11)$$

- Equation de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} C_p \bar{T}) + \nabla \cdot \left[\left(\bar{\rho}_l C_{pl} \bar{V}_l + \sum_{k=a,v} \bar{\rho}_k C_{pk} \bar{V}_k \right) \bar{T} \right] = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla \bar{T}) - \Delta H_{\text{vap}} \cdot \dot{m} \quad (12)$$

3.2 Conditions initiales et aux limites

-Initialement la pression du mélange gazeux, la température et la teneur en liquide sont uniformes à l'intérieur du milieu poreux.

-A l'entrée du canal la température, la pression et la concentration en vapeur d'eau de l'écoulement libre sont constantes et uniformes. Les conditions pour k et ε à la surface des parois sont données par He et al. :

$$k_i = 0 \text{ et } \varepsilon_i = \nu \left(\frac{\partial^2 k}{\partial y^2} \right)$$

-Les flux de chaleur et de masse normaux aux faces imperméables et adiabatiques de la plaque poreuse sont nuls.

-Sur le côté perméable de la plaque, les flux de chaleur et de masse peuvent être écrits comme suit:

$$\left(\bar{\rho}_l \bar{V}_l + \bar{\rho}_v \bar{V}_v \right)_y = h_{\text{mx}} \left(\bar{\rho}_v^g - \rho_{v0} \right) \quad (13)$$

$$\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} + \Delta H_{\text{vap}} \left(\bar{\rho}_l \bar{V}_l \right)_y = h_{\text{tx}} \left(T_o - \bar{T} \right) \quad (14)$$

4. Méthode numérique

Le système d'équation pour le fluide dans le canal est résolu numériquement par la méthode des différences finies. La résolution numérique avec cette méthode consiste à transformer le système d'équations en un système d'équations algébriques. Pour le milieu poreux, le système d'équations est résolu numériquement par la méthode des volumes finis. Elle a pour principal avantage de respecter rigoureusement les équations de conservation pour chaque volume de contrôle du maillage quelle que soit sa forme. La résolution s'effectue plan par plan dans le sens de l'écoulement et le maillage retenu est un maillage régulier et rectangulaire.

5. Résultats

Nous avons présenté sur la figure 1 les profils verticaux de la température (T), de la concentration en vapeur d'eau (C_v) et des vitesses longitudinale (u) et transversale (v) au centre du canal (x=L/2) pour des différentes instants de séchage dans le cas où T_o=100°C, C_{vo}=10⁻³, U₀=0.2m.s⁻¹, P_{go}=1atm, Re=5000, S_{ini}=30% et T_{ini}=20°C. A un instant donné (fig. 1-a) la température est minimale à l'interface milieu poreux-fluide. Elle augmente en fonction de la hauteur du canal pour tendre vers la température ambiante (100°C). Comme le montre la figure, la couche limite diminue sous l'effet de l'augmentation de la température interfaciale (température du thermomètre humide) en fonction du temps. Cette augmentation dépend de plusieurs paramètres tels que: la phase de séchage dans la quelle se trouve le milieu poreux, la saturation et la température initiales, le régime d'écoulement qui est turbulent, etc. Inversement, la concentration en vapeur d'eau (Fig. 1-b), est maximale à l'interface. Elle diminue en fonction de la hauteur du canal jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur de la concentration ambiante (10⁻³). La concentration interfaciale diminue en fonction du temps. Cette diminution est fortement liée à la teneur en eau interfaciale et à l'augmentation de la température interfaciale. Les profils des vitesses longitudinale et verticale semblent être indépendants du temps (Figs.1-c et 1-d). Les figures 2-a et 2-b

montrent l'évolution longitudinale des coefficients de transfert thermique (h_{tx}) et massique (h_{mx}) le long de l'interface. Ces coefficients sont très importants au voisinage du bord d'attaque puis diminuent pour tendre vers des valeurs quasi-constantes loin du bord. Leur variation est fortement liée au régime d'écoulement, aux conditions ambiantes et à la phase du séchage (phase isenthalpe, phase hygroscopique, ou fin du séchage). La variabilité des coefficients des transferts thermique et massique jouent un rôle moteur sur le mécanisme du transfert de chaleur et de masse à l'intérieur de la plaque et par conséquent sur la cinétique du séchage.

Pour décrire l'état d'avancement du processus du séchage, nous avons porté sur la figure 3 l'évolution de la température et de la saturation du liquide en fonction du temps pour différents nœuds à l'intérieur du milieu poreux et ceci dans les mêmes conditions. La figure 3-a montre l'évolution temporelle de la température pour deux nœuds à l'intérieur du milieu poreux (nœud surfacique près du bord d'attaque et un nœud au centre du milieu). Il est remarquable que le nœud surfacique de la paroi est la partie qui sèche en premier lieu et qui a la plus courte phase isenthalpe. Ceci est principalement dû aux coefficients des transferts thermique et massique qui sont très importants pour un écoulement turbulent. La saturation de l'eau à l'intérieur du milieu poreux (Fig. 3-b) diminue en fonction du temps et devient faible à $t=8h$. Au coin supérieur de l'interface le processus du séchage est plus rapide que pour les autres régions et A $t=14h$, la quasi-totalité de la plaque rentre dans le domaine hygroscopique et le milieu est complètement séché.

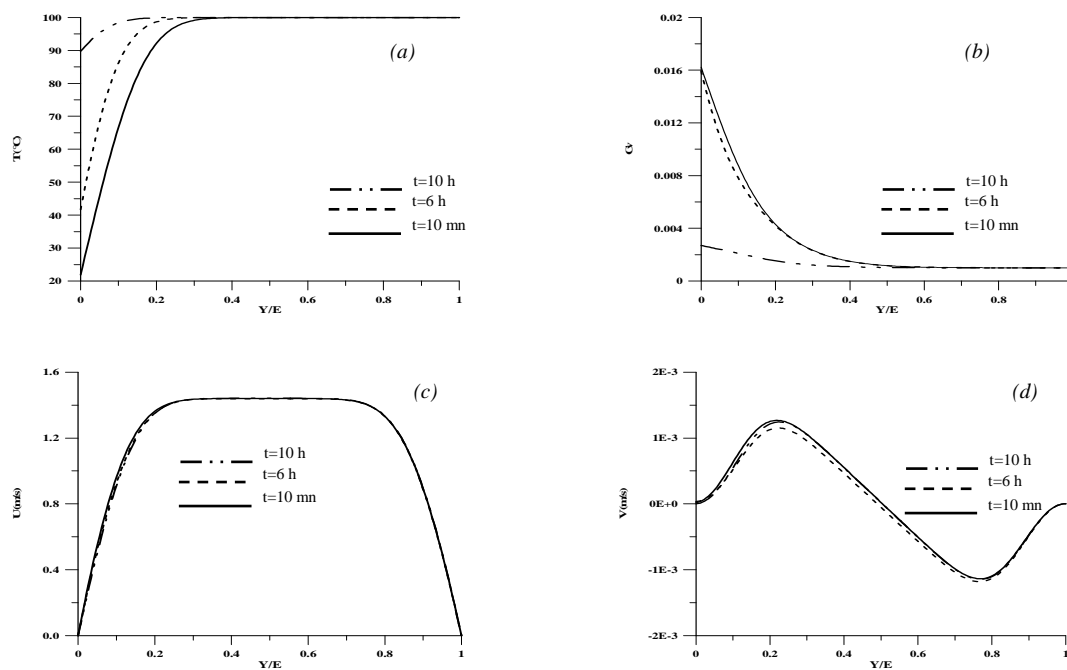


Figure 1: Evolution des différentes grandeurs physiques (T(a), C_v (b), U(c), V(d)) en fonction de Y/E dans la section centrale du canal ($X=L/2$) pour différents instants

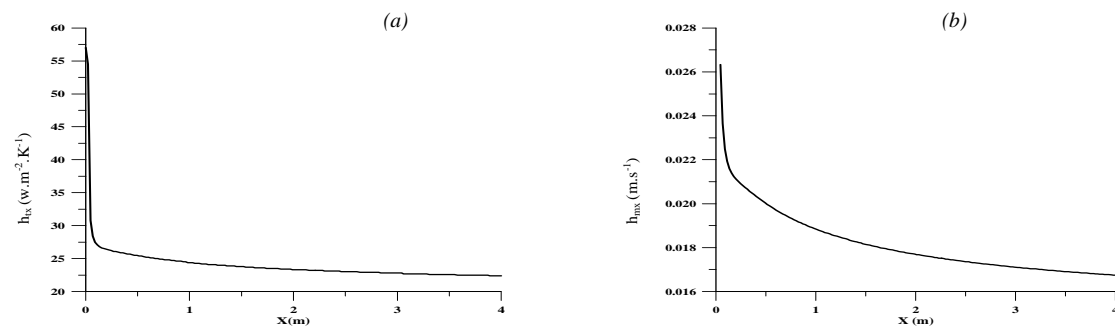


Figure 2: Evolution des coefficients locaux de transfert thermique h_{mx} (a) et massique h_{tx} (b) en fonction de la longueur du canal

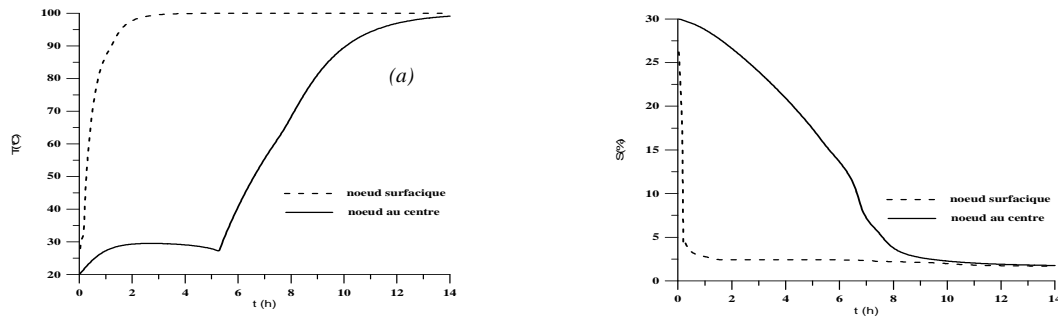


Figure 3: Evolution temporelle de la température (a) et de la saturation en eau (b) pour différents nœuds à l'intérieur du milieu poreux.

6. Conclusion

L'étude numérique bidimensionnelle des transferts de chaleur et de masse a permis d'analyser les différents stades de l'évolution du processus de séchage convectif d'un milieu poreux non saturé ayant les caractéristiques d'une brique soumis à l'effet des différentes couches limites thermique, dynamique et massique turbulentes. Les résultats décrivent le comportement des profils des différents paramètres à l'intérieur et à l'extérieur du milieu poreux. La variabilité spatio-temporelle des coefficients d'échange thermique et massique affecte fortement les profils spatio-temporels de la température et de la saturation en eau à l'intérieur du milieu poreux. La prise en compte de cette variabilité permet éventuellement des économies d'énergie et garantir une meilleure qualité du produit séché.

Nomenclature

C_v concentration en vapeur
 C_p chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
 D_v coefficient de diffusion, $m^2.s^{-1}$
 \dot{m}_v taux de masse évaporée, $Kg.m^{-2}.s^{-1}$
 P pression, Pa
 S saturation en eau
 T température du fluide, K
 t temps, s
 ΔH_{vap} chaleur latente de vaporisation, $J.Kg^{-1}$

Symboles grecs

ε fraction volumique
 λ conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
 μ viscosité dynamique, $Kg.m^{-1}.s^{-1}$

ρ masse volumique, $Kg.m^{-3}$

Indices

a air sec
 eff effective
 g mélange gazeux
 ini initiale
 int interface
 l liquide
 o ambiant
 r face droite
 s solide
 t turbulent
 v vapeur d'eau.

Références

- [1] C. Basilio et M. Martin, Approche expérimentale des mécanismes de transferts au cours du séchage convectif à haute température d'un bois résineux, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 27, pp. 657-668, 1984.
- [2] P. Perré et A. Degiovanni, Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes : séchage du bois à basse et à haute température, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 2463-2478, 1990.
- [3] A. Mobarki, N. Boukadida and S. Ben Nasrallah, The variability effect of fluid thermo-physical properties on convective drying of unsaturated porous media, *Int. Journal of Heat and Technology*, Vol. 21, n. 2, pp. 89-97, 2003.
- [4] A. Mobarki, N. Boukadida and S. Ben Nasrallah, Convective and convective radiative drying of unsaturated porous media at high temperature and high water vapour concentration, *Int. Journal of Heat and Technology*, Vol. 21, n. 2, pp. 183-191, 2003.
- [5] D. Helel and N. Boukadida, Heat and mass transfer during drying process, *Int. Journal of Heat and Technology*, Vol. 26, n. 2, 2008.