



**HAL**  
open science

## Transfert de chaleur et de masse dans un milieu poreux non saturé soumis à une convection forcée laminaire

Dalel Helel, Nouredine Boukadida

► **To cite this version:**

Dalel Helel, Nouredine Boukadida. Transfert de chaleur et de masse dans un milieu poreux non saturé soumis à une convection forcée laminaire. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00162866

**HAL Id: hal-00162866**

**<https://hal.science/hal-00162866>**

Submitted on 29 Aug 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# TRANSFERT DE CHALEUR ET DE MASSE DANS UN MILIEU POREUX NON SATURE SOUMIS A UNE CONVECTION FORCEE LAMINAIRE

Dalel HELEL, Noureddine BOUKADIDA

U.R.E.E, Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Sousse, Cité Taffala, 4003 Ibn Khaldoun, Sousse, Tunisie

*dalel.helel@enim.rnu.tn, noureddine.Boukadida@issatso.rnu.tn*

**Résumé :** L'objectif de ce travail est de simuler les transferts bidimensionnels de chaleur et de masse au cours du séchage d'un milieu poreux non saturé et indéformable exposé à un écoulement convectif forcé laminaire d'air humide dans un canal horizontal. Le modèle utilisé tient compte d'une part des approximations des couches limites dynamique, thermique et massique et d'autre part de la variabilité des coefficients des transferts thermique et massique. Les résultats obtenus, nous ont permis d'évaluer l'influence de la hauteur du canal sur le processus de séchage et sur les comportements spatio-temporels de la température, de la saturation en eau et de la pression du mélange gazeux.

**Mots clés :** Coefficient de Transfert, Convection Forcée, Milieu Poreux, Séchage.

## 1. INTRODUCTION

L'étude de l'écoulement et des transferts de chaleur et de masse par convection forcée au sein des milieux poreux, a été motivée par de nombreuses applications dans des domaines variés comme le stockage des déchets nucléaires, l'extraction du pétrole, le séchage ou l'hydratation des produits, etc. L'obtention d'une bonne qualité du produit séché par voie thermique ainsi que l'optimisation des procédés employés sont, même si le coût énergétique reste une préoccupation, les deux principaux objectifs que les utilisateurs des procédés de séchage cherchent généralement à atteindre.

Parmi les études scientifiques approfondies menées sur les processus mis en oeuvre lors d'une opération de séchage et sur l'étude des principaux procédés de séchage, nous citons les travaux de Whitaker [1-3] qui traitent la formulation mathématique du problème, de Basilico et Martin [4] et de P. Perre et Degiovanni [5] 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. Nous citons aussi les travaux de N.Boukadida et al. [6,7] et A. Mobarki [8] pour le séchage des briques.

Dans ce travail, nous proposons d'amener une contribution supplémentaire aux travaux antérieurs déjà réalisés en cette thématique et qui concerne plus spécifiquement l'étude des transferts bidimensionnels de chaleur et de masse lors du séchage par convection forcée laminaire d'un milieu poreux soumis à des convections thermiques et massiques de type couche limite.

## 2. POSITION DU PROBLEME

Le système étudié est formé d'une plaque poreuse non saturée ayant les caractéristiques de la brique de longueur  $L=1\text{m}$  et d'épaisseur  $\ell=12\text{cm}$ , constituée d'une matrice solide (indéformable), d'une phase liquide (eau pure) et d'une phase gazeuse (mélange d'air sec et de vapeur d'eau). Les deux faces verticales de la plaque poreuse ainsi que la face basse sont assimilées à des faces adiabatiques et imperméables. La face haute de la plaque représente

l'interface perméable du canal plan horizontal dans le quel souffle un écoulement d'air chaud dont les variables d'entrée sont contrôlées (figure 1).

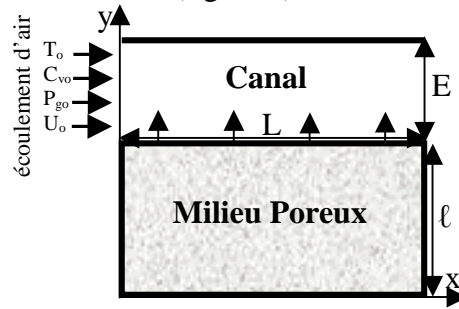


Figure 1 : Configuration géométrique du système

### 3. FORMULATION

#### 3.1. Equations de conservation

##### 3.1.1. Dans le canal

- Equation de conservation de la masse

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

- Equation de conservation de la quantité de mouvement

$$\rho_g u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho_g v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial P_g}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_g \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2)$$

- Equation de conservation de l'énergie

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

- Equation de conservation des espèces

$$\rho_g u \frac{\partial C_v}{\partial x} + \rho_g v \frac{\partial C_v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho_g D_v \frac{\partial C_v}{\partial y} \right) \quad (4)$$

##### 3.1.2. Dans le milieu poreux

- Equations de conservation de la masse

- Pour la phase liquide  $\frac{\partial \epsilon_l}{\partial t} + \nabla \langle \mathbf{V}_l \rangle = -\frac{\dot{m}_v}{\rho_l}$  (5)

- Pour la phase gazeuse  $\frac{\partial \langle \rho_g \rangle}{\partial t} + \nabla \langle \rho_g \rangle \langle \mathbf{V}_g \rangle = \dot{m}_v$  (6)

- Pour la phase vapeur  $\frac{\partial \langle \rho_v \rangle}{\partial t} + \nabla \langle \rho_v \rangle \langle \mathbf{V}_v \rangle = \dot{m}_v$  (7)

- Les vitesses moyennes  $\langle \mathbf{V}_l \rangle$  et  $\langle \mathbf{V}_g \rangle$  sont obtenues en utilisant la loi de Darcy généralisée.

- Equation de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \langle \rho C_p \rangle \langle T \rangle \right) + \nabla \left[ \left( \langle \rho_l \rangle^l C_{pl} \langle \mathbf{V}_l \rangle + \sum_{k=a,v} \langle \rho_k \rangle^g C_{pk} \langle \mathbf{V}_k \rangle \right) \langle T \rangle \right] = \nabla (\lambda_{\text{eff}} \nabla \langle T \rangle) - \Delta H_{\text{vap}} \dot{m}_v \quad (8)$$

#### 3.2. Conditions initiales et aux limites

##### 3.2.1. Conditions initiales

- A l'entrée du canal :  $U = U_o$ ,  $V = V_o$ ,  $T = T_o$ ,  $P_g = P_o$ ,  $C_v = C_{vo}$

- A l'intérieur du milieu poreux :  $\langle T \rangle = T_{ini}$ ,  $\langle P_g \rangle^g = P_{go}$ ,  $\epsilon_1 = \epsilon_{ini}$

### 3.2.2. Conditions aux limites

- Pour le fluide dans le canal

- A la face supérieure du canal on a:  $T = T_o$ ,  $U = 0$  et  $V = 0$ .

- La composante longitudinale de la vitesse du mélange interfaciale est nulle.

- Pour le milieu poreux

- Sur le côté perméable ( $y=\ell$ ) on a:  $\langle P_g \rangle^g = P_{go}$  (9)

$$\left( \langle \rho_l \rangle^l \langle V_l \rangle + \langle \rho_v \rangle^g \langle V_v \rangle \right)_y = h_{mx} \left( \langle \rho_v \rangle^g - \rho_{vo} \right) \quad (10)$$

$$\lambda_{eff} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial y} + \Delta H_{vap} \left( \langle \rho_l \rangle^l \langle V_l \rangle \right)_y = -h_{tx} (\langle T \rangle - T_o) \quad (11)$$

- Sur les faces adiabatiques et imperméables, les flux de chaleur et de masse sont nuls.

Notons que le système d'équations obtenu reste ouvert. Pour sa fermeture, nous utilisons l'équation de conservation du débit massique dans une section droite du canal.

## 4. METHODE NUMERIQUE

Pour le fluide dans le canal, le système d'équations est résolu numériquement par la méthode des différences finies, le maillage retenu est un maillage régulier et rectangulaire. Les profils de la vitesse, de la pression, de la température et de la concentration en vapeur d'eau à l'abscisse  $x=(1+i)\Delta x$  sont calculés en fonction des champs connus à l'abscisse  $x=i \Delta x$  et les termes convectifs sont approximés par un schéma Upwind. Pour le milieu poreux, le système d'équations est résolu par la méthode des volumes finis développée par Patankar.

## 5. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### 5.1. Influence de la hauteur du canal sur l'évolution temporelle de T, S et P

Sur les figures 2.a, 2.b et 2.c nous avons tracé l'évolution temporelle des différents grandeurs physiques pour un nœud surfacique et un nœud central dans le cas où  $T_o=70^\circ C$ ,  $C_{vo}=10^{-3}$ ,  $U_o=0.2ms^{-1}$ ,  $P_{go}=1atm$ ,  $T_{ini}=15^\circ C$  et  $S=40\%$  pour deux écartements différents entre les plaques du canal (1cm et 15cm).

A la vue générale de ces courbes, nous avons constaté que le processus de séchage présente quatre principales périodes :

- Une première période courte et transitoire de mise en température durant la quelle la température évolue rapidement (figure 2.a). On observe lors de cette phase une légère dépression gazeuse (figure 2.c) accompagné par un phénomène de condensation (figure 2.b).

- Une deuxième période durant la quelle la température est presque uniforme et tend a évoluer vers la température de thermomètre humide. L'évaporation commence à l'interface, la saturation en eau décroît de façon linéaire et la dépression se réduit sans annuler. Cette période est non observable lorsque le nœud est surfacique dans le cas où  $E=1cm$ .

- Une troisième période ou première phase de ralentissement où l'écoulement de liquide s'affaiblit. En fait, les forces capillaires ne sont plus capables d'acheminer l'eau vers l'extérieur. Le front de séchage est caractérisé par d'importants gradients de température et de saturation surtout pour  $E=1cm$  (figures 2.a et 2.b). On observe aussi une surpression (figure 2.c) due essentiellement à l'accroissement de la pression de vapeur et à la résistance du milieu poreux à l'écoulement gazeux.

- Une quatrième période ou deuxième phase de ralentissement. Cette phase apparaît plus rapidement pour un nœud surfacique dans le cas où  $E=1\text{cm}$ . La température tend vers celle de l'ambiance et la saturation en eau atteint progressivement la saturation irréductible. Il paraît clairement que le temps de séchage est plus court pour une faible hauteur du canal.

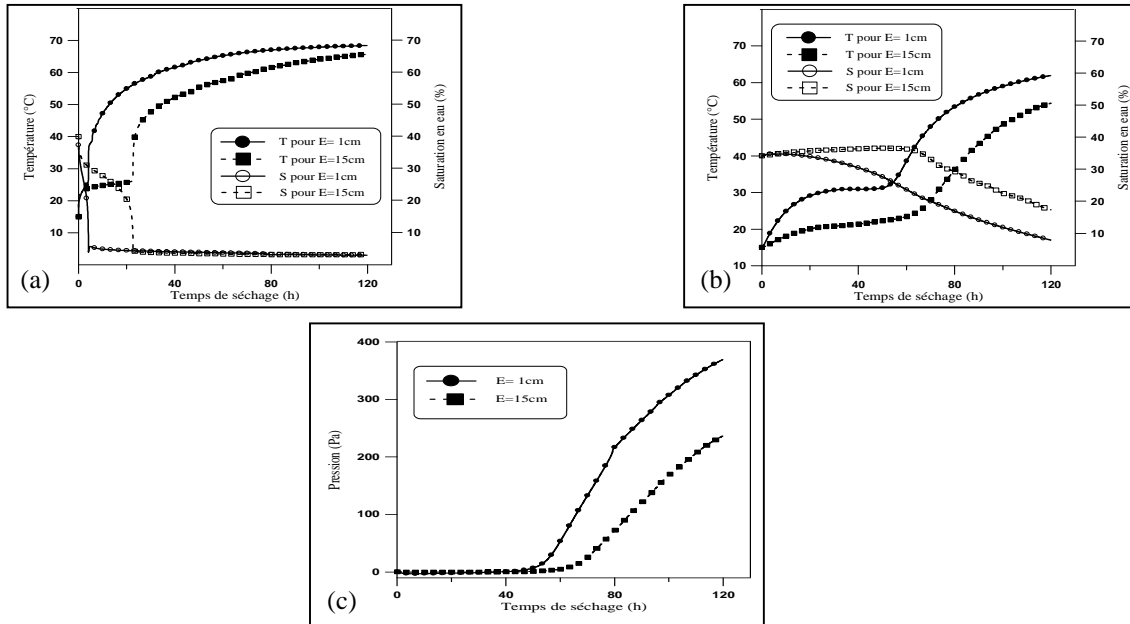


Figure 2: Evolution temporelle de T, S et P pour un nœud surfacique (a) et central (b, c)

### 5.2. Influence de la hauteur du canal sur l'évolution spatiale de T, S et P

Nous avons tracé sur la figure 3, l'évolution spatiale de la température, de la saturation en eau et de la pression gazeuse dans le milieu poreux à  $t=50\text{h}$  dans le cas où  $T_0=70^\circ\text{C}$ ,  $C_{v0}=10^{-3}$ ,  $U_0=0.2\text{ms}^{-1}$ ,  $P_{g0}=1\text{atm}$ ,  $T_{\text{ini}}=15^\circ\text{C}$  et  $S=40\%$  pour deux écartements différents entre les plaques du canal. Cette figure montre que le milieu se chauffe et sèche plutôt pour l'écartement  $E=1\text{cm}$  que pour  $E=15\text{cm}$ , le processus de séchage démarre et d'une manière intense au niveau du bord d'attaque. Ceci s'explique par les valeurs importantes des coefficients des transferts de chaleur et de masse au niveau de cette zone. C'est la partie du milieu poreux qui est la plus proche de l'entrée du canal qui sèche en premier.

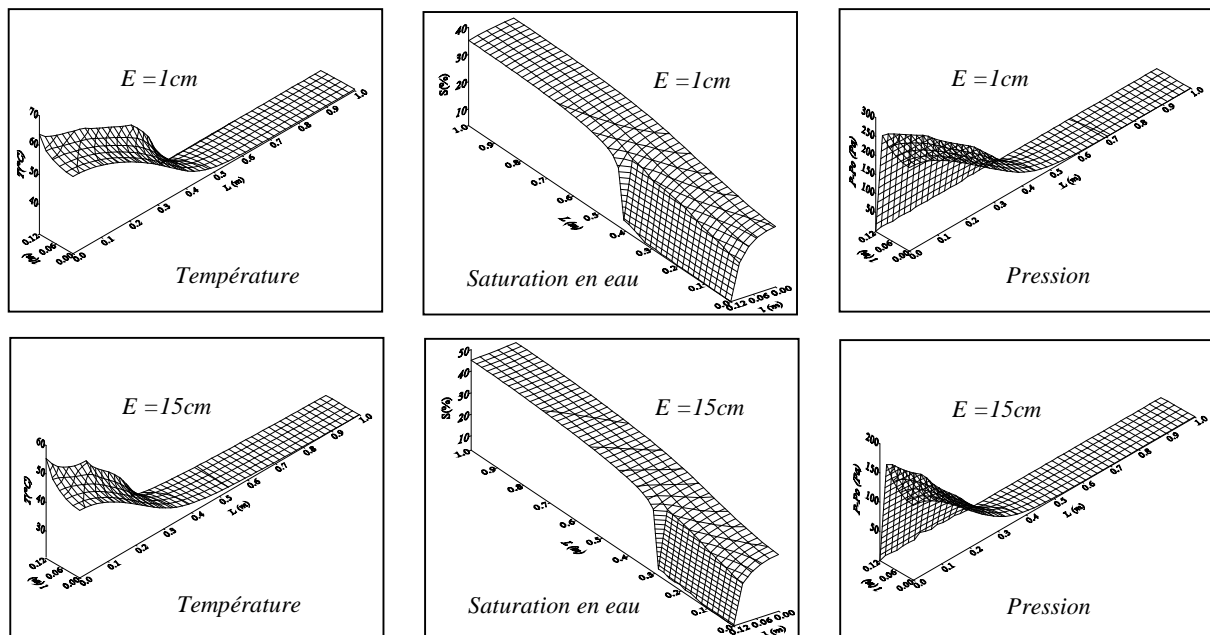


Figure 3: Evolution spatiale de T, S et P à l'intérieur du milieu poreux pour différents écartements du canal à  $t=50\text{h}$ .

## CONCLUSION

L'étude numérique bidimensionnel 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. Les résultats montrent l'effet de la variabilité des coefficients d'échange thermique et massique sur les profils spatio-temporels de la teneur en eau, de la température et de la pression dans le milieu, ainsi que l'influence de l'écartement des deux plaques du canal. L'augmentation de cet écartement conduit à une durée de séchage plus longue.

## Nomenclature

Symbole	Symboles grecs
$C_v$ concentration en vapeur	$\varepsilon_1$ fraction volumique du liquide
$C_p$ chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	$\lambda$ conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
$D_v$ coefficient de diffusion, $m^2.s^{-1}$	$\mu$ viscosité dynamique, $Kg.m^{-1}.s^{-1}$
$h_m$ coefficient massique, $m.s^{-1}$	$\rho$ masse volumique, $Kg.m^{-3}$
$h_t$ coefficient thermique, $W.m^{-2}.K^{-1}$	
$\dot{m}_v$ taux de masse évaporée, $Kg.m^{-2}.s^{-1}$	Exposant, Indices
P pression, Pa	a air sec
S saturation en eau	eff effectif
T température du fluide, K	g mélange gazeux
t temps, s	ini initial
u vitesse longitudinale, $m.s^{-1}$	l liquide
v vitesse transversale, $m.s^{-1}$	o ambiante
$\Delta H$ chaleur latente, $J.Kg^{-1}$	v vapeur d'eau
	vap vaporisation
	$\langle \rangle$ moyenne

## Références

- [1] S. Whitaker, Simultaneous heat mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying, *Advances in heat transfer*, Academic press, New York, Vol. 13, pp 119-203, 1977.
- [2] S. Whitaker, Toward a diffusion theory of drying, *Int. Engng Chen. Fund*, Vol.16, pp 408-414, 1977.
- [3] S. Whitaker, Heat and mass transfer in granular porous media, *Advances in Drying*, Vol. 1, pp 23-61, 1980.
- [4] C. Basilico et M. Martin, Approche expérimentale des mécanismes de transfert au cours du séchage convectif à haute température d'un bois résineux, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol.27, pp 657-668, 1984.
- [5] P. Perre et A. Degiovanni, Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes : séchage du bois à basse et à haute température, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol.33, pp 2463-2478, 1990.
- [6] N. Boukadida and S. Ben Nasrallah , Two dimensional heat and mass transfer during convective drying of porous media, *Drying Technology*, 13(3), pp 661-694, 1995.
- [7] N. Boukadida , S. Ben Nasrallah and P. Perré, Mechanism of heat and mass transfer during convective drying of porous media, *Drying Technology*, 18(7), pp 1367-1388, 2000.
- [8] A. Mobarki, Etude des transferts de masse et de chaleur lors du séchage, *Thèse de Doctorat à l'Université de Monastir*, Décembre 2005.