

EFFET DE LA CONVECTION MIXTE SUR LE PROCESSUS DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE DANS UNE PAROI POREUSE VERTICALE

Dalel Helel , Nouredine Boukadida

U. R. Energie et Environnement, ISSATS, Sousse, Tunisie

Heleldalel@yahoo.fr, nourbou54@gmail.com

Resumé

L'étude des mécanismes des transferts couplés de chaleur et de masse dans un milieu poreux fait intervenir des phénomènes complexes. L'objectif de ce travail est d'analyser le comportement global et les transferts bidimensionnels de chaleur et de masse lors du séchage en convection laminaire mixte ou forcée d'une paroi poreuse placée dans un canal verticale. On présente de même l'évolution des différentes variables d'état dans le fluide asséchant et dans le milieu poreux sous l'effet de la variabilité de la température extérieure.

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

β coefficient d'expansion thermique, K^{-1}
 β^* coefficient d'expansion massique
 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
v vapeur d'eau

1. INTRODUCTION

Les phénomènes des transferts couplés de chaleur et de masse en convection mixte dans un canal vertical ont été bien étudiés durant les trois dernières décennies par beaucoup de chercheurs. Parmi eux, Habchi et al. [1] ont été étudié numériquement la convection mixte laminaire de l'air dans un canal vertical qui contient une obstruction rectangulaire au niveau de l'un des murs du canal. Orfi J. et al. [2] ont analysé numériquement les effets des nombres moyens de Grashof thermique et Grashof massique sur la température et sur la concentration en vapeur de l'écoulement présentés dans les tubes avec flux de chaleur et concentration à l'interface fluide-solide uniformes. Les résultats montrent un développement complexe du champ d'écoulement influencé fortement par les nombres de Grashof et par l'inclinaison du tube. Debbissi et al. [3] ont présenté une analyse numérique d'évaporation d'eau par

l'air humide chaud et par de la vapeur surchauffée dans le cas d'une convection mixte ou naturelle induite par les forces de flottabilité thermique et massique dans un canal extérieurement isolé. Les résultats ont illustré l'effet important des conditions ambiantes sur le taux d'évaporation. Dans le même esprit des choses, Hammou et al. [4] ont étudié numériquement les effets de transfert de chaleur et de masse simultanés par un écoulement laminaire descendant d'air humide dans un canal vertical avec murs mouillés isothermes.

Plusieurs investigations ont été rapportées sur les processus du transport impliqués dans les milieux poreux [5-7]. Helel et Boukadida [7] ont étudié le transfert de chaleur et de masse par convection forcée lors du séchage d'un milieu poreux par un écoulement 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.

Dans le présent travail on s'intéresse principalement au séchage par convection mixte ou forcée à basse température dans le cas où la paroi poreuse est soumise à une température météorologique variable sur 24 heures.

2. FORMULATION MATHÉMATIQUE

2.1 Configuration géométrique

La configuration étudiée est schématisée sur la figure 1. Il s'agit d'une plaque poreuse humide verticale. La plaque est de hauteur $H=90\text{cm}$ et d'épaisseur $\ell=1.2\text{cm}$, exposée à un écoulement d'air en convection mixte laminaire favorable dans un canal vertical dont les variables d'état à l'entrée (T_o , C_{vo} , U_o et P_{go}) sont contrôlées. La plaque poreuse est composée d'une matrice solide inerte et indéformable, d'une phase liquide (eau pure) et d'une phase gazeuse contenant de l'air et de la vapeur d'eau. Les trois faces de la plaque poreuse sont adiabatiques et imperméables, seule la face qui représente l'interface canal- plaque poreuse est perméable à la matière et à la chaleur. La deuxième paroi verticale constituant le canal est supposée adiabatique et imperméable.

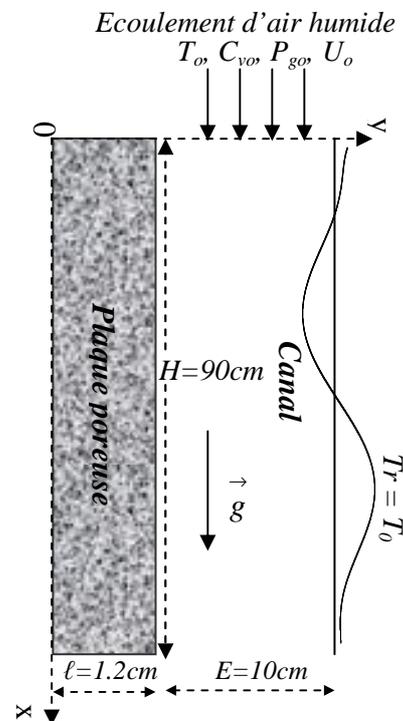


Figure 1: Configuration géométrique du système

2.2 Hypothèses de travail

- Les effets de dissipation visqueuse, les effets Dufour et Soret, le travail de compression et le transfert par rayonnement sont négligeables.
- Les phases solide, liquide et gazeuse sont en équilibre thermodynamique local.
- Les propriétés thermo-physiques sont variables.
- les approximations de la couche limite et de Boussinesq sont valables.
- La plaque poreuse est homogène et isotrope.
- L'écoulement est laminaire.

2.3 Mise en équations

2.3.1 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

$$\rho_g U \frac{\partial U}{\partial x} + \rho_g V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{\partial p_g}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_g \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \gamma \rho_g \left[\beta (T - T_o) + \beta^* (C_v - C_{v_o}) \right] g \quad (2)$$

Le facteur γ prend la valeur 0 dans le cas de la convection forcée et la valeur 1 dans le cas de la convection mixte.

- 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

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

2.3.2 Dans le milieu poreux

Les équations macroscopiques de conservation de la masse sont :

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

- Pour la phase gazeuse :
$$\frac{\partial \langle \rho_g \rangle}{\partial t} + \nabla \langle \rho_g \rangle^g \langle V_g \rangle = \dot{m}_v \quad (6)$$

- Pour la phase vapeur :
$$\frac{\partial \langle \rho_v \rangle}{\partial t} + \nabla \langle \rho_v \rangle^g \langle V_v \rangle = \dot{m}_v \quad (7)$$

Les vitesses moyennes de la phase liquide $\langle V_l \rangle$ et de la phase gazeuse $\langle V_g \rangle$ sont obtenues en utilisant la loi de Darcy [7].

- Equation de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\langle \rho c_p \rangle \langle T \rangle \right) + \nabla \left[\left(\langle \rho_l \rangle^l c_{pl} \langle V_l \rangle + \sum_{k=a,v} \langle \rho_k \rangle^g c_{pk} \langle V_k \rangle \right) \langle T \rangle \right] = \nabla (\lambda_{eff} \nabla \langle T \rangle) - \Delta H_{vap} \dot{m}_v \quad (8)$$

2.4 Conditions initiales

- A l'entrée du canal: $U_o=0.2ms^{-1}$, $P_{go}=1 atm$ et $C_{v_o}=0.001$.

- A l'intérieur du milieu poreux: $T_{ini}=5^\circ C$, $P_{gini}=1 atm$ et $S_{ini}=40\%$.

2.5 Conditions aux limites

- Les valeurs de la température de la paroi droite du canal T_r et de celle du fluide à l'entrée T_o sont prises égales à celle de la température météorologique ambiante de la région Tozeur du sud Tunisien prises pour le 15^{ème} jour du mois de Mai (figure 2) .

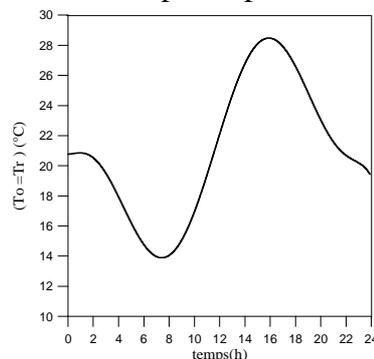


Figure 2 : Evolution de la température moyenne météorologique ambiante au mois de Mai à Tozeur .

- Sur la face gauche et les faces horizontales adiabatiques et imperméables du milieu poreux, les flux de masse et de chaleur sont nuls.

- Sur le côté perméable du milieu poreux, les flux de chaleur et de masse s'écrivent :

$$\left(\langle \rho_l \rangle^l \langle V_l \rangle + \langle \rho_v \rangle^g \langle V_v \rangle \right)_y = h_{mx} \left(\langle \rho_v \rangle^g - \rho_{v_o} \right) \quad \text{et} \quad \lambda_{eff} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial y} + \Delta H_{vap} \left(\langle \rho_l \rangle^l \langle V_l \rangle \right)_y = h_{tx} (T_o - \langle T \rangle)$$

3. RESOLUTION NUMERIQUE

Pour le milieu poreux, le système d'équations est résolu numériquement par la méthode des volumes finis développée par Patankar [8]. Le maillage régulier retenu comprend N_x nœuds suivant x et N_y nœuds suivant y avec $N_x=180$ et $N_y=24$. 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 comprenant M_x nœuds suivant x et M_y nœuds suivant y avec $M_x= M_y=180$.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 Evolution des variables (T, C_v et U) pour le fluide dans le canal dans les cas d'une convection mixte et forcée

Sur la figure 3-a, nous avons porté l'évolution transversale de la température du fluide et ce au niveau de la section centrale du canal ($x=L/2$) pour différents instants. Comme nous le constatons, la figure fait apparaître le comportement de type couche limite thermique. Le profil de la température est fortement lié à la température météorologique qui varie en fonction du temps entre 13.9°C et 28.4°C . En $y=0$, on remarque que la température de l'interface fluide-milieu poreux est celle du thermomètre humide, elle est aussi affectée par la température météorologique. Tantôt elle augmente et tantôt elle décroît. Nous avons illustré aussi sur la figure 3-c le profil de la vitesse longitudinale dans le canal. Comme s'est illustrée, la composante due à la convection naturelle créée au voisinage de la paroi poreuse initialement plus froide que le fluide asséchant vient s'ajouter à la composante longitudinale de la vitesse. Loin de la paroi le terme $(T-T_o)$ décroît et l'effet de la convection naturelle s'atténue. Compte tenu du fait que la température de la paroi droite est égale à celle d'entrée dans le canal ($T_r=T_o$), on n'observe pas de composante naturelle près de la paroi droite du canal.

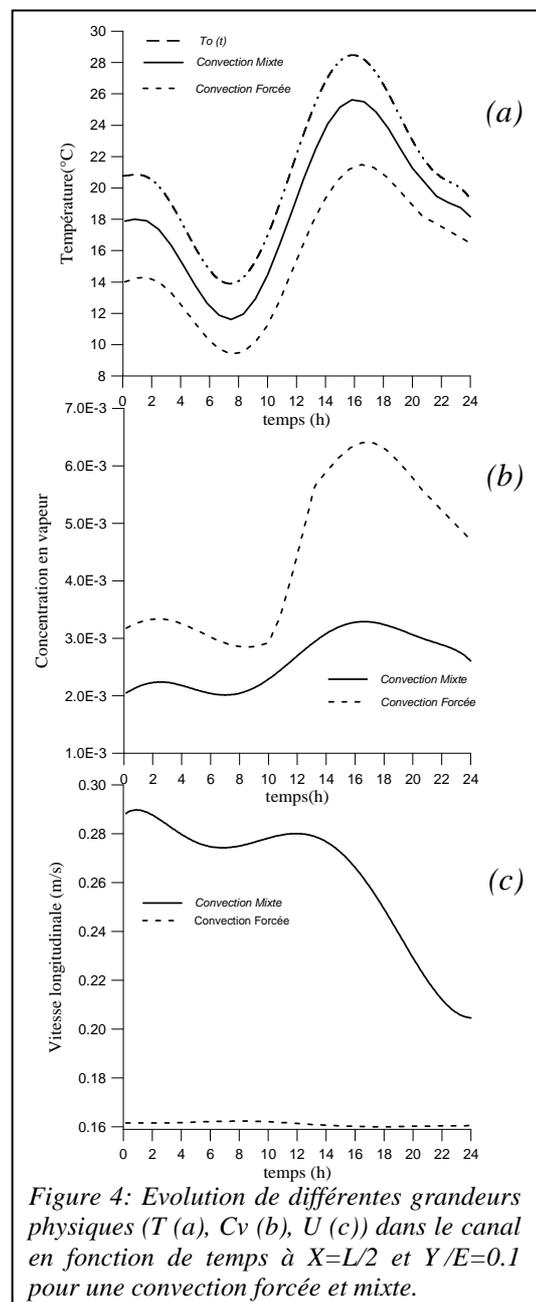
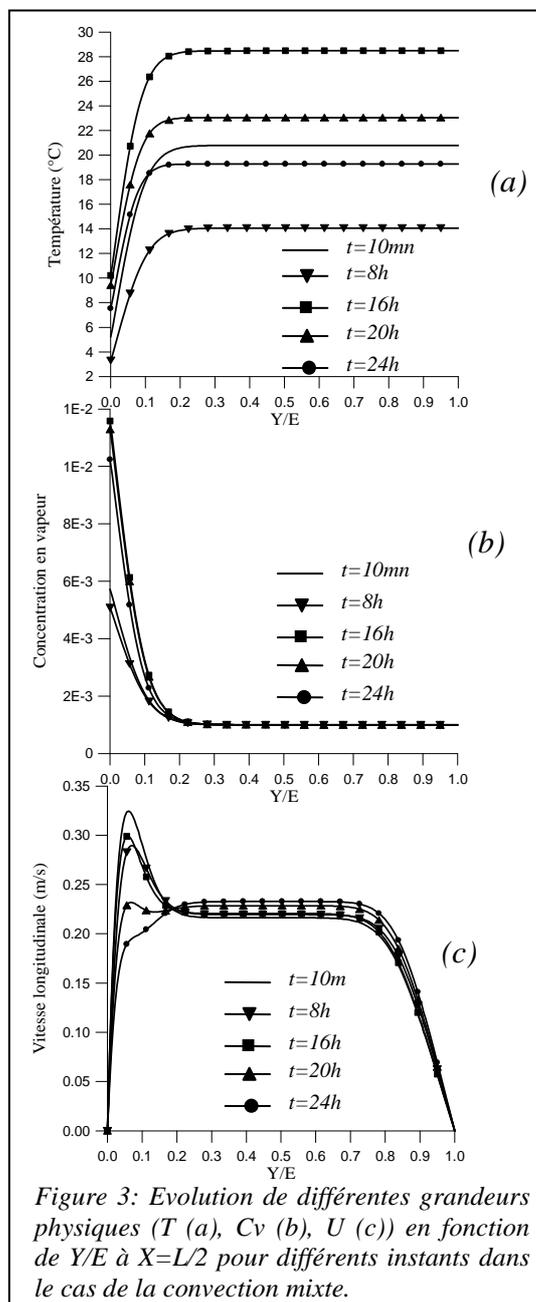
Afin de voir l'évolution temporelle de quelques grandeurs physiques dans le fluide et dans le milieu poreux, nous avons porté sur les figures 4 et 5 les évolutions temporelles de T, C_v et U dans le canal et de T et S dans le milieu poreux. A la première vue des courbes en température, on constate la présence d'un couplage des grandeurs entre le fluide asséchant et le milieu poreux subissant la convection mixte ou forcée.

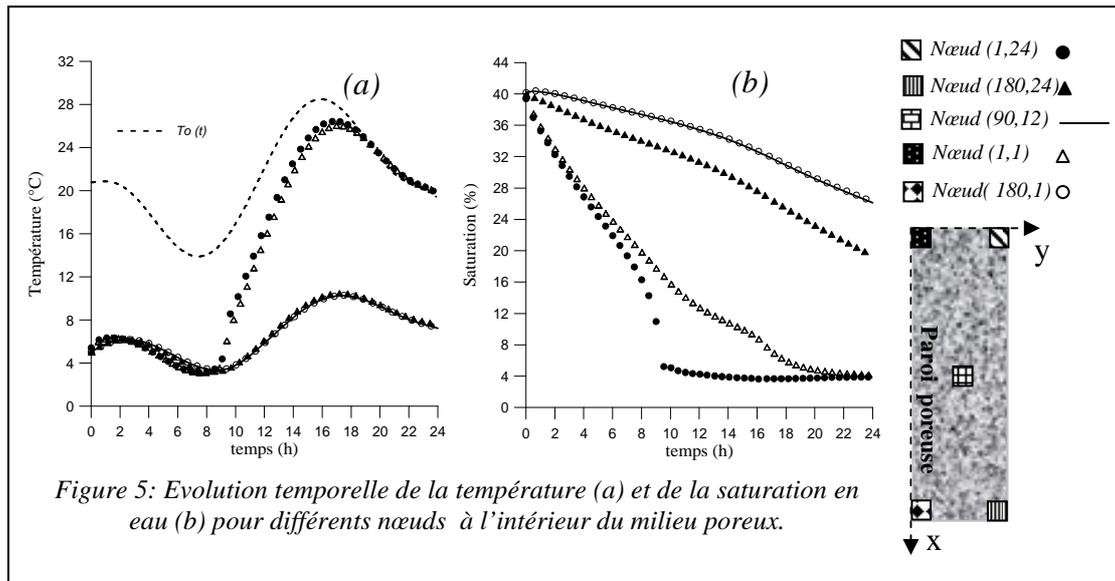
La figure 4-a montre que la température du fluide représentée par celle d'un nœud représentatif ($x=L/2$, $y=E/10$) suit pratiquement le même style d'évolution que celui de la température météorologique T_o en présentant tout de même un petit écart. L'inclusion dans le modèle de la composante induisant la convection naturelle à celle de la convection forcée vient engendrer une augmentation de la température du fluide. Pour le même nœud nous avons porté l'évolution de la concentration en vapeur d'eau (figure 4-b) dans les deux cas de la convection mixte ou forcée. Nous constatons l'existence d'un pseudo analogie d'évolution inversée par rapport à celle de la température. L'accentuation de l'écart entre la concentration de la vapeur dans les deux cas (convection mixte et convection forcée) dépend fortement de celui des évolutions des températures correspondantes. Le maximum de cet écart est lié au maximum de la température météorologique qui se situe au voisinage de 16h.

L'évolution temporelle de la vitesse longitudinale du fluide (figure 4-c) dans les deux cas de convection au nœud cité ci-dessus, montre que la prise en compte de la convection naturelle augmente sensiblement la vitesse près de la paroi. Cette augmentation s'atténue et ceci est liée principalement aux termes $T-T_o$ et $C_v-C_{v_o}$.

4.2 Effet de la variabilité de la température sur les évolutions temporelles de la température et de la saturation dans la plaque poreuse

Sur la figure 5, nous avons représenté l'évolution temporelle de la température et de la saturation en eau de quelques nœuds représentatifs à l'intérieur du milieu poreux. A la vue des différentes courbes, on remarque que la paroi commence à sécher du côté de l'entrée. Ceci s'explique par le fait que les coefficients locaux des transferts thermique et massique sont à leur maximum. L'évolution des températures des nœuds est affectée directement par l'évolution de la température météorologique T_r (figure 5-a). Tant que le séchage se fait à la surface, la température d'un nœud se trouvant à l'intérieur reste faible, en suivant une évolution ressemblant à celle de T_r . Une fois que le nœud rentre dans le domaine hygroscopique, sa température monte pour atteindre à la fin de son séchage T_r . Comme le montre la figure 5-b, la saturation du nœud central et ceux du bas reste importante durant le premier cycle (24h). Ils ne sèchent qu'au cours des cycles suivants, ceci revient au fait que le flux de chaleur reçue par la plaque est insuffisant.





CONCLUSION

Au cours de cette étude, nous mentionnons les principaux points suivants:

- L'ajout de la composante traduisant la convection naturelle lors d'un processus de séchage d'une paroi poreuse non saturée verticale placée dans un canal vertical a un effet sur les différents profils dans le fluide asséchant et dans la paroi poreuse.
- La variabilité temporelle de la température du fluide entrant et celle de la paroi de droite du canal affecte sensiblement le comportement du processus de séchage.
- La paroi poreuse n'arrive pas à sécher durant un cycle de 24h sous les conditions utilisées.
- L'intégration d'un flux solaire par exemple (en supposant que la paroi droite est transparente) réduira le temps de séchage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. S. Habchi and S. Acharya, 1986, Laminar mixed convection in a partially blocked, vertical channel, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 29, n°:11, pp. 1711-1722.
2. J. Orfi and N. Galanis, 2002, Developing laminar mixed convection with heat and mass transfer in horizontal and vertical tubes, *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 41, pp. 319-331.
3. C. Debbissi, J. Orfi and S. Ben Nasrallah, 2003, Evaporation of water by free or mixed convection into humid air and superheated steam, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 46, pp. 4703-4715.
4. Z. A. Hammou, B. Benhamou, N. Galanis and J. Orfi, 2004, Laminar mixed convection of humid air in a vertical channel with evaporation or condensation at the wall, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 43, pp. 531-539.
5. P. Perré and A. Degiovani, 1991, Simulation par volume finis des transferts couplés dans des milieux poreux anisotropes : séchage du bois a haute et basse température, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 33, pp. 2463-2478.
6. G. Cáceres, 2006, Modélisation du séchage d'un milieu poreux saturé déformable : Prise en compte de la pression du liquide, *Thèse de Doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Bordeaux France*.
7. D. Helel and N. Boukadida, 2008, Heat and mass transfer during drying process, *Int. Journal of Heat and Technology*, vol. 26, n°:2.
8. S.V. Patankar, 1980, *Numerical heat and fluid flow*, Hemisphere, New York.