

Loubna KAHLERRAS¹
Azedine BELHAMRI²

¹ Département de Génie
Climatique, Faculté des
Sciences de l'Ingénieur,
Université Mentouri Constantine,
Algérie

² Département de Génie
Climatique, Faculté des
Sciences de l'Ingénieur,
Université Mentouri Constantine,
Algérie
(kaloubna@hotmail.fr)
(belhamri_a@yahoo.fr)

ETUDE DE L'EVOLUTION DES COEFFICIENTS DE TRANSFERT DE SURFACE LORS DU SECHAGE D'UN MILIEU POREUX HUMIDE

Résumé : Ce travail se propose d'analyser les phénomènes du séchage convectif d'un milieu poreux non saturé. Le modèle de calcul considère le couplage des équations de la couche limite et celles qui décrivent le transfert de chaleur et de masse dans un milieu poreux, ayant les caractéristiques du béton renforcé avec des coupeaux de bois. La simulation effectuée montre l'effet de certains paramètres pertinents du matériau comme la température initiale et l'humidité initiale, sur le processus du séchage.

Mots clés : Transfert couplé de chaleur et de masse, Milieu poreux, Couche limite, Convection laminaire, Temps de séchage, Volumes finis

Nomenclature

U, u, v Vitesse, m/s
T température, °C ou K
C_v Concentration en vapeur d'eau, kg/m³
S saturation
D Coefficient de diffusion, m²/s
C_p Chaleur spécifique massique, kJ/kg.K
M masses molaires, kg/mole
P pression, Pa
D_v Coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air, m²/s
h_{m,x} Coefficient de transfert massique local, m/s
h_{t,x} Coefficient de transfert thermique local, w/m².k

Lettres grecques

Δh Chaleur latente d'évaporation, Jkg-1
ε Porosité
λ Conductivité thermique, Wm-1K-1
ρ Densité, kgm-3

Indices / Exposants

a air sec
v vapeur pure
g gaz
S_{urf} Surface
+ Adimensionnel.
∞ concerne l'écoulement hors de la couche limite

1. Introduction

Au cours du séchage de milieux poreux, des mécanismes complexes de transferts de chaleur et de masse à l'intérieur du milieu poreux et dans le fluide asséchant doivent être pris en compte.

Généralement, l'influence de l'écoulement externe au cours du séchage convectif, est prise en considération seulement au moyen de coefficients de transfert de chaleur et de masse par convection qui sont déterminés de façon plus ou moins empirique.

De nombreux chercheurs [1], [2], [3], [4], [5] se sont intéressés à l'étude des problèmes de surface et à l'obtention de ces coefficients par différentes méthodes. Le but est donc d'améliorer la qualité du produit sec et d'optimiser le temps de séchage, sans oublier bien sur l'économie d'énergie.

En fait, le processus de séchage est un compromis entre l'évaporation de l'eau à la surface et la diffusion de cette eau à l'intérieur du milieu poreux.

2. Position du problème

Ce travail calcule et analyse le comportement d'une plaque en béton renforcé, suivant des conditions simplifiées. Le système étudié, représenté sur la figure (1), est composé d'une plaque poreuse humide non saturé ayant les caractéristiques du béton renforcé avec des coupeaux de bois, d'une longueur (L) de 1m et d'une épaisseur (2e) = 10 cm formée de trois phases ; solide (indéformable), liquide (eau pure) et gazeuse (mélange d'air et de vapeur d'eau).

Les deux faces haute et basse de la plaque poreuse représentent l'interface perméable, exposé à un flux d'air chaud parallèle à la surface libre du milieu poreux.

Les conditions de séchage (vitesse U[∞], température T[∞] et fraction massique C_v[∞]) de l'air chaud sont supposées constantes à l'entrée de la plaque. Les cotés verticaux de la plaque poreuse sont considérés adiabatiques et imperméables à la matière.

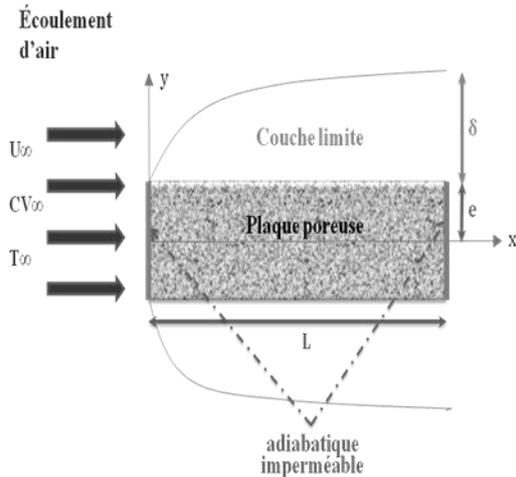


Figure 1 : Configuration géométrique du système

3. Formulation mathématique et hypothèses

Nous posons les hypothèses suivantes :

- Le problème est entièrement symétrique par rapport à un plan médian.
- Le fluide est incompressible et Newtonien
- Le régime d'écoulement est laminaire et stationnaire
- Les paramètres thermodynamiques de l'air constantes
- Les effets Dufour et Soret sont négligeables
- L'évaporation est superficielle
- La matrice solide est indéformable

3.1 Formulation dans l'air

Les variables sans dimensions suivantes, sont utilisées:

$$x^+ = \frac{x}{L} \quad y^+ = \frac{y}{L} \sqrt{R_e} \quad U^+ = \frac{U}{U_\infty} \quad (1)$$

$$v^+ = \frac{v}{U_\infty} \sqrt{R_e} \quad T^+ = \frac{T - T_\infty}{T_{surf} - T_\infty} \quad C_v^+ = \frac{C_v}{C_\infty}$$

Compte tenu des hypothèses simplificatrices formulées ci-dessus, les équations adimensionnelles de convection forcée dans la couche limite s'écrivent comme suit :

- Equation de conservation de la masse

$$\frac{\partial u^+}{\partial x^+} + \frac{\partial v^+}{\partial y^+} = 0 \quad (2)$$

- Equation de conservation de la quantité de Mouvement

$$u^+ \frac{\partial u^+}{\partial x^+} + v^+ \frac{\partial u^+}{\partial y^+} = \frac{\partial^2 u^+}{\partial y^{+2}} \quad (3)$$

- Equation de conservation de l'énergie

$$u^+ \frac{\partial T^+}{\partial x^+} + v^+ \frac{\partial T^+}{\partial y^+} = \frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 T^+}{\partial y^{+2}} \quad (4)$$

- Equation de conservation des espèces.

$$u^+ \frac{\partial C_v^+}{\partial x^+} + v^+ \frac{\partial C_v^+}{\partial y^+} = \frac{1}{Sc} \frac{\partial^2 C_v^+}{\partial y^{+2}} \quad (5)$$

Les nombres adimensionnels utilisés et obtenus sont:

- Le nombre de Reynolds classique relatif à la vitesse de l'air libre et à la longueur L de la paroi ;

$$R_e = \frac{U_\infty L}{\nu} \quad (6)$$

- Le nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda_{fluide}} \quad (7)$$

- Le nombre de Schmidt :

$$Sc = \frac{\nu}{D_v} \quad (8)$$

3.2 Dans le milieu poreux

Le transfert couplé de chaleur et de masse dans les milieux poreux non saturés a été le sujet de beaucoup d'études. On peut nommer Crausse [6] et Bories [7]

L'opération de modélisation des phénomènes de transfert dans les milieux poreux est faite à l'échelle macroscopique, en adoptant le modèle de diffusion qui est représenté par un système de deux équations à dérivées partielles couplées :

- L'équation de transfert de masse

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial S}{\partial y} \right) \quad (9)$$

- L'équation de transfert de chaleur

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (10)$$

Chacun des paramètres thermophysiques est une fonction souvent complexe de la saturation. Le coefficient global de diffusion massique isotherme D est tiré de la courbe de Crausse, nous nous servons de cette courbe pour représenter sous forme empirique la variation du paramètre D avec la saturation

$$\log(D) = -8,14606 - 132,068.S + 5097,55.S^2 - 57519,6S^3 + 266822.S^4 - 439586.S^5 + 3944,53.S^6 \quad (11)$$

Les travaux de Belhamri et al. [8] proposent pour ce béton renforcé, l'expression de la conductivité thermique suivante :

$$\lambda_{app} = -0,41222.S^2 + 0,77459.S + 0,20601 \quad (12)$$

4. Conditions initiales et aux limites

4.1 Dans la couche limite

La densité du flux de chaleur reçue par la surface, par conduction est exprimée comme suit :

$$\varphi_{tx} = - \left[\lambda_g \frac{\partial T}{\partial y} \right]_{y=0} \quad (13)$$

La densité de flux de masse évaporée sous l'effet du flux de chaleur, a pour expression :

$$\dot{m}_{vx} = - \left[\frac{\rho_g D_v}{1 - C_v} \frac{\partial C_v}{\partial y} \right]_{y=0} \quad (14)$$

Le coefficient local de transfert thermique il s'écrit :

$$h_{tx} = \frac{- \lambda_g \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}}{(T_\infty - T_{ix})} \quad (15)$$

$(T_\infty - T_{ix})$ Représente l'écart de température entre la paroi et celle de l'air libre, mis en jeu lors du déroulement de processus de transfert.

Le coefficient local de transfert massique, il s'écrit :

$$h_{mx} = \frac{\dot{m}_{vx}}{(\rho_{vx} - \rho_{v\infty})} \quad (16)$$

$\rho_{v\infty}$: Masse volumique de la vapeur d'eau, prise aux conditions de l'air humide.

ρ_{vx} : Masse volumique de la vapeur d'eau, calculée en considérant la température de la paroi.

$$\rho_{vx} = \frac{1}{461,5} \left(\frac{p_{vs}}{T_p} \right) \quad (17)$$

$$\rho_{v\infty} = \frac{1}{461,5} \left(\frac{p_v}{T_{air}} \right) \quad (18)$$

p_{vs} Pression de la vapeur saturante à la température de la paroi.

Dans la littérature, plusieurs expressions sont proposées. Pour ce calcul, nous avons retenu la forme suivante:

$$p_{vs} = 9,81.10^4.10^{\left(\frac{5,978 - \frac{2225}{T}}{T} \right)} \quad (19)$$

$$p_v = p_{vs} \cdot \varphi \quad (20)$$

4.2 Dans la paroi

Au temps initial une distribution linéaire de la température et de la saturation a été proposée

Aux limites, à $y' = \pm e$, un flux massique et un flux thermique ont été imposés (conditions de Newman)

$$\rho \varepsilon D \frac{\partial S}{\partial y'} = h_{mx} (\rho_{v,surf} - \rho_{air}) \quad (21)$$

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y'} = h_{tx} (T_{air} - T_{surf}) + h_{mx} (\rho_{v,surf} - \rho_{air}) \Delta h_v \quad (22)$$

Où h_{tx} et h_{mx} sont respectivement les coefficients de transfert thermique et massique locaux, déterminés après résolution des équations des couches limites.

Δh_v : La chaleur latente de vaporisation

Conditions sur l'axe du matériau (par symétrie) :

$$\left. -D \frac{\partial S}{\partial y'} \right|_{y'=0} = 0 \quad \left. -\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y'} \right|_{y'=0} = 0 \quad (23)$$

5. Discussion des résultats

La méthode des volumes finis, décrite par Patankar [9] a été utilisée pour résoudre le système des équations différentielles obtenus, ce système d'équation est discrétisé et mis sous forme matricielle

Les matrices obtenues sont tridiagonaux. Leur résolution se fait donc en utilisant l'algorithme TDMA

Nous avons considéré un maillage régulier et nous avons utilisé pour la couche limite ; 11 nœuds dans la direction x et 10 nœuds dans la direction y. pour le milieu poreux ; 11 nœuds dans la direction x, 22 nœuds dans la direction y'. Le calcul a été exécuté sur des étapes de temps de 900 s. Le code de simulation a été développé et écrit en Fortran-90 et les

résultats calculés avec une erreur relative de 10-4 %.

Les calculs sont effectués pour une température de l'air asséchant $T_{\infty}=303\text{K}$, une concentration en humidité de l'air ; $C_{v\infty}=0,5\text{g/kg}$ d'air sec, une vitesse de l'air $U_{\infty}=5\text{m/s}$

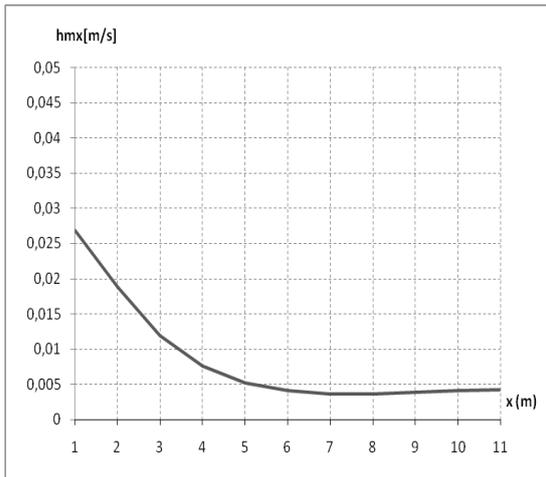
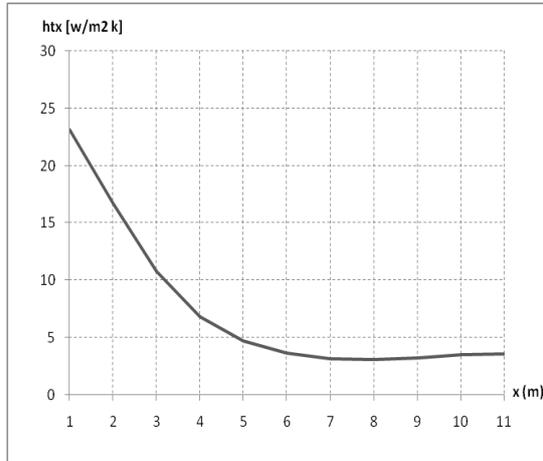


Figure 2 : Évolution des coefficients de transfert thermique et massique

Les résultats obtenus sont tout à fait classiques. En effet, Le coefficient de transfert thermique htx est décroissant le long de la paroi. Ses valeurs sont importantes en amont au bord d'attaque de cette paroi où la vitesse de décroissance étant la plus élevée dans cette zone. Cette décroissance devient de plus en plus lente au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers l'aval pour tendre finalement vers une valeur fixe.

De même pour le coefficient de transfert massique hmx , il présente une allure décroissante, il est plus important au niveau de la zone proche du bord d'attaque (Figure 2).

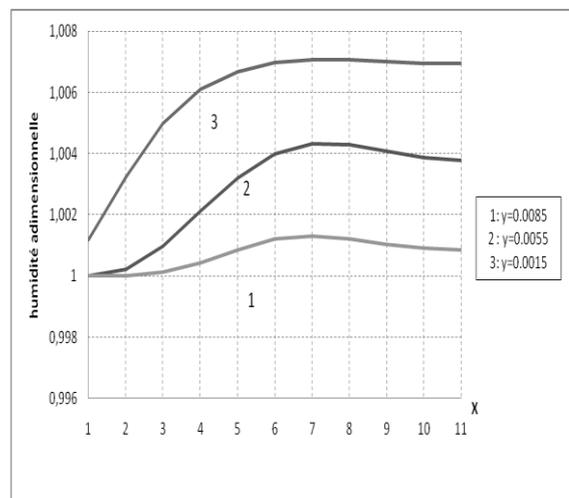
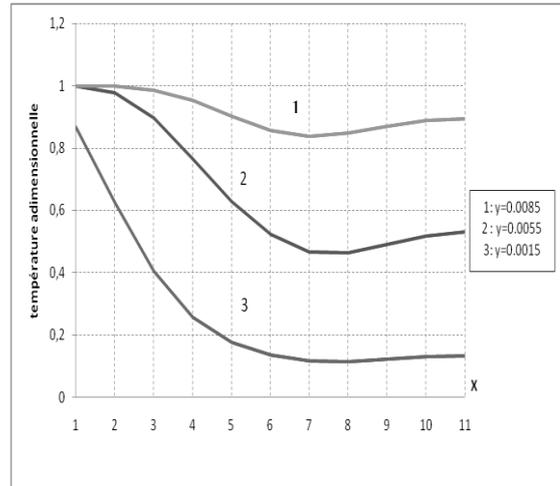


Figure 3 : Distribution de la température (a) et de l'humidité (b) dans la couche limite le long de la plaque (en fonction de x) pour différentes valeurs de Y

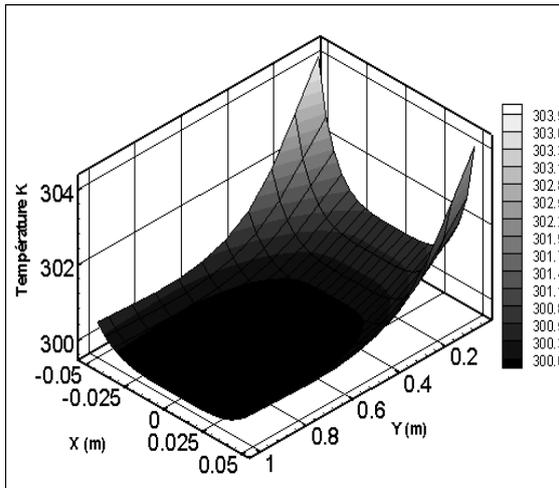
La Figure 3 représente les distributions de la température et de l'humidité adimensionnelles dans la couche limite en fonction de l'abscisse x, pour plusieurs valeurs de Y.

Près de la paroi ($y=0.0015$) les composantes u et v de la vitesse sont négligeables et par conséquent, la diffusion l'emporte sur la convection. Il s'ensuit que le profil d'humidité est fortement influencé par les conditions de saturation sur la surface, ce qui explique le fort gradient de l'humidité et de la température.

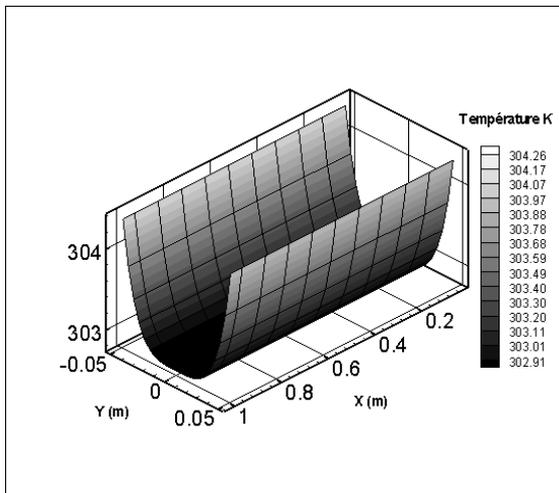
Si l'on s'éloigne de la surface, l'influence de la vitesse de l'air devient prépondérante ; ainsi, pour $y=0.0055$, l'effet de la convection est plus important.

Enfin pour ($y=0.0085$) les profils montrent que l'air est pratiquement saturé puisque les gradients de température et d'humidité tendent

vers 0. Ceci découle du fait que l'évaporation est superficielle.



(a)



(b)

Figure 4 : Evolution de la température $T(x, y)$ après 12 h de séchage avec couche limite, (cas a) et sans couche limite (cas b)

Sur la figure 4 nous avons tracé l'évolution spatio-temporelle de la température du milieu poreux $T(x, y)$ à l'instant $t = 12$ h de séchage avec et sans couche limite.

Pour le cas sans couche limite, le coefficient de transferts de chaleur entre l'interface perméable et le milieu poreux est uniforme sur toute la longueur de la plaque (h_t moyen = 7.486 w/mK). La température donc reste constante et ne dépend pas de x (figure 4.b).

Dans le cas où les coefficients de transferts sont variables (avec couche limite), on constate une augmentation de la température du milieu poreux en fonction du temps et en fonction de x et cela est plus important au niveau du coin haut gauche du milieu poreux

(figure 4.a) ce qui est dû aux hautes valeurs des coefficients locaux de transferts thermique et massique au bord d'attaque, c'est la partie qui rentre donc en premier lieu dans le domaine hygroscopique.

Conclusion

Cette étude tient compte du couplage des équations de l'air dans la couche d'interface avec celles qui décrivent le transfert de chaleur et de masse dans un milieu poreux lors du séchage convectif.

La formulation du problème de séchage nécessite l'obtention et la connaissance de beaucoup de paramètres et des conditions physiques du processus.

La connaissance des couches limites autour des pièces à sécher permet d'en déduire les coefficients de transfert de chaleur et de masse. Une importante variation de l'humidité et de la température est observée le long de la plaque poreuse, qui peut provoquer des déformations.

Références

- [1] M. PRAT, Heat and mass transfers predetermination between a drying material and external flow, *Proceeding of the fifth International Drying Symposium*, pp.105-112,1986.
- [2] W. MASMOUDI, M.PRAT, Heat and mass transfers between a porous medium and a parallel external flow. Application to drying of capillary porous material, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, N°. 8, pp.1975-1989, 1991.
- [3] H.AMIR, G. LE PALEC ET M. DAGUENET, Séchage superficiel d'un matériau poreux humide par convection forcé d'air chaud : couplage entre les équations de transfert dans le matériau et celles de la couche limite, *Int.J. Heat and mass transfer*, Vol.30, N°.6, pp.1149-1158, 1987.
- [4] N. BOUKADIDA, S. BEN NASRALLAH, Effect of the variability of Heat and mass transfer Coefficients on convective and convective-radiative, *Drying of porous media, Drying Technology*, Vol.20, N°.1, pp.67-91, 2002.
- [5] PATRICK PERRE, ROGER B.KEEY, Drying of wood, principles and practices, Vol.3, Part III.36, Edited by A.S.Mujumdar

- [6] P.CRAUSSE, G.BACON ET S.BORIS, Etude fondamentale des transferts couplés chaleur-masse en milieu poreux, *Int.J.Heat and mass transfer*, Vol.27, N°.5.pp.657-668, 1984.
- [7] S.BORIES, Recent advance in modelisation of coupled heat and mass transfer in capillary- porous bodies. *Proceedings of the sixth international drying symposium*, pp. K1.47-KL.61, 1988
- [8] A. BELHAMRI, K. REBAHI, A. CHIKHI, L. BENNAMOUN, Influence of the saturation rate on the heat transfer in building materials, *Proceedings of the Third International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications*, Amman, Jordan, pp. 632-634, 2007.
- [9] PATANKAR, S.V., Numerical heat Transfer and fluid flow, 1980.