

OBTENTION DE L'EVOLUTION DES COEFFICIENTS DE TRANSFERT DE SURFACE LORS DU SECHAGE D'UN MILIEU POREUX HUMIDEE

KAHLERRAS LOUBNA ^a, BELHAMRI AZEDINE ^b

^a Département de Génie Climatique, Université Mentouri

Constantine, Algérie

kaloubna@hotmail.fr

^b Département de Génie Climatique, Université Mentouri

Constantine, Algérie

belhamri_a@yahoo.fr

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 copeaux de bois. Pendant l'opération de séchage, beaucoup de problèmes sont produits comme consommation d'énergie élevée, cinétiques du séchage et le changement de la forme finale du produit. En fait l'amélioration de la technique du séchage devient une nécessité. Parmi les auteurs qui ont approché ce problème, nous pouvons citer les travaux de [1], [2], [3], [4], [5].

Le but est donc analysé le comportement hydrique du milieu poreux, montrer l'effets de la variabilité du coefficient d'échange massique sur le transfert de masse à l'intérieur du milieu poreux et aussi l'effet de certains paramètres pertinents du matériau comme l'humidité initiale, sur le processus du séchage.

1. 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 copeaux 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 Cv_∞) 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.

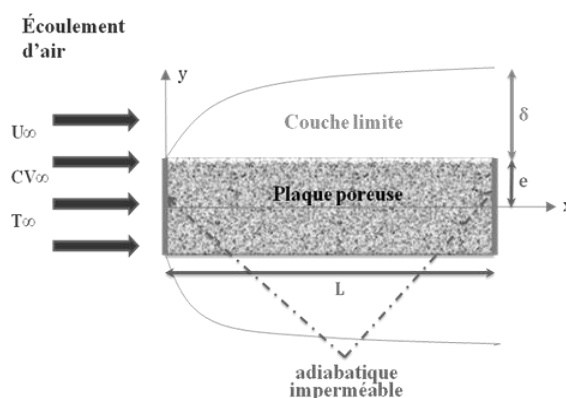


Figure 1 : Courbe caractéristique de séchage de la menthe pouliot.

2. Formulation mathématiques et hypothèses

2.1 Formulation dans l'air

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

Les variables sans dimensions suivantes, sont utilisées:

$$x^+ = \frac{x}{L}, y^+ = \frac{y}{L} \sqrt{R_e}, U^+ = \frac{U}{U_\infty},$$

$$v^+ = \frac{v}{U_\infty} \sqrt{R_e}, T^+ = \frac{T - T_\infty}{T_{surf} - T_\infty}, C_v^+ = \frac{C_v}{C_\infty} \quad (1)$$

Et 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.

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

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 :

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

2.2 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 :

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

3. Conditions initiales et aux limites

3.1 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 de Φ_e , 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 :

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

$(T_\infty - T_{ix})$ 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:

$$p_{vs} = 9,81.10^4 \cdot 10^{\left(5,978 - \frac{2225}{T}\right)} \quad (19)$$

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

3. 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) :

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

4. Discussion des résultats

La méthode des volumes finis, décrite par Patankar [9] a été utilisé 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} %.

4.1 Evolution des coefficient de transfert de chaleur et de masse

Sur la figure 2 les coefficients de transfert thermique et massique sont décroissants le long de la paroi. Leurs valeurs sont importantes au bord d'attaque, où la vitesse de décroissance étant plus élevée.

Cette décroissance devient de plus en plus lente vers l'aval pour tendre finalement vers une valeur fixe.

4.2 Comparaison de l'évolution de la saturation du milieu poreux avec et sans couche limite

La figure 3 montre l'évolution spatio-temporelle de la saturation du milieu poreux $S(x,y)$ après 12 h de séchage avec et sans couche limite.

Pour le cas sans couche limite, le coefficient de transferts de masse entre l'interface perméable et le milieu poreux est uniforme sur toute la longueur de la plaque (hm moyen = 0.0231 m/s), une analyse de la distribution de la saturation en eau dans la paroi, prouve que cette dernière est uniforme le long de cette paroi, (figures 3.b).

Dans le cas où on prend en considération l'effet de la couche limite (hm_x locale) ; la saturation en eau dépendra de x . pendant le processus de séchage, le coin gauche a la plus basse teneur en eau. C'est la partie de la paroi qui rentre en premier lieu dans le domaine hygroscopique, (figures 3.a).

4.3 Influence du gradient de la saturation initiale du matériau sur le temps de séchage.

La figure 4 montre la variation des profils de saturation, pour différents gradients de saturation initiaux

Dans le cas où $\Delta S = 5\%$ après une durée de huit heures de séchage. La saturation au coin gauche de la paroi à $x=0$ atteint une valeur $S < 6\%$, (figure 4. c), et finit par sécher en avance par rapport au reste du milieu, La dernière station ($x=1$), est à une valeur de 7.2%.

Sur la figure (4. d), cas où le gradient de saturation initiale $\Delta S = 15\%$, après huit heures de séchage la saturation atteint une valeur qui vari

entre (12% et 13,5%) la paroi nécessite un temps de séchage plus grand pour atteindre l'équilibre hygroscopique.

5. Résumé

Les résultats des simulations numériques ont permis de visualiser un champ d'humidité à l'intérieur du milieu poreux

- Une importante variation de l'humidité est observée le long de la plaque poreuse, qui peut provoquer des déformations.

- La réduction de l'écart de la saturation initiale entre la plaque poreuse et l'interface (plaque-fluide asséchant) conduit à une durée de séchage plus faible

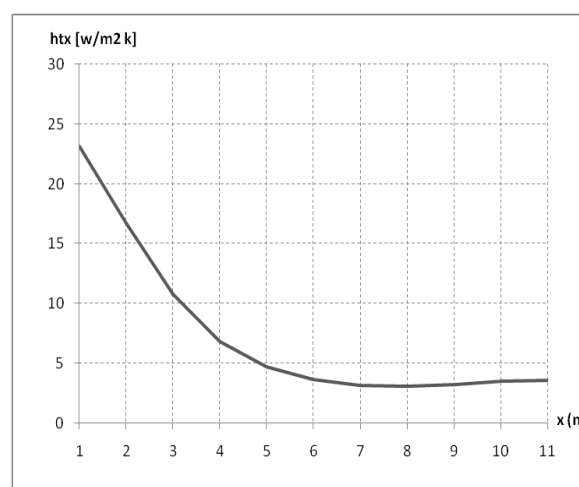
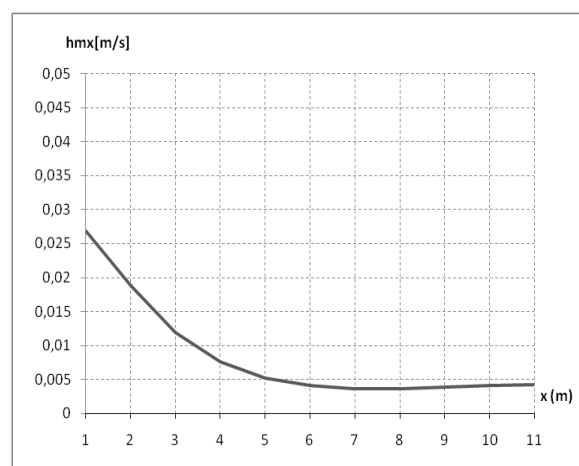
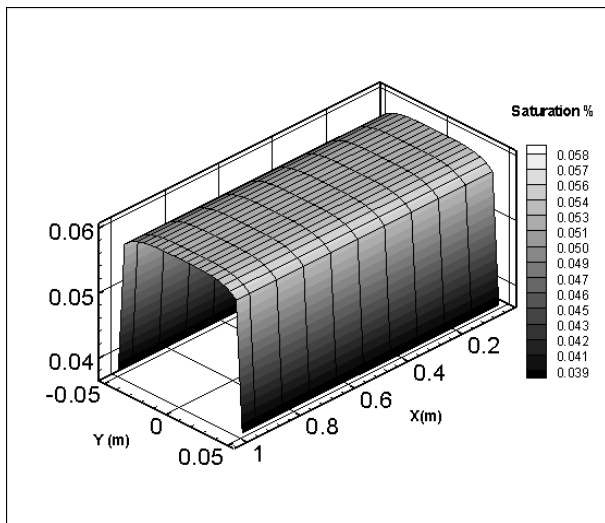
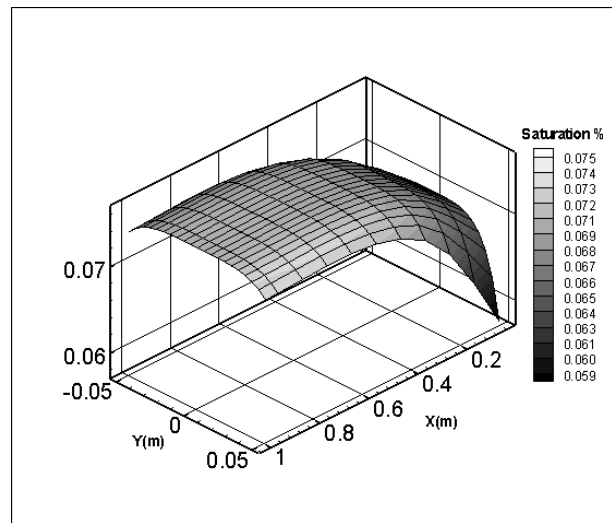


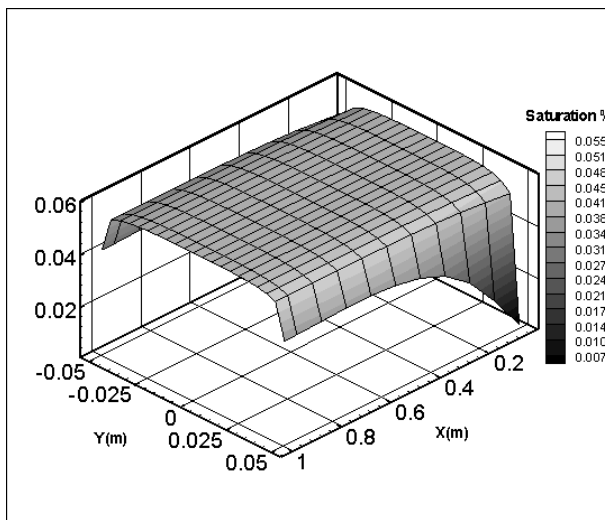
Figure 2: Variation du coefficient d'échange thermique local ht_x , et massique local hm_x , en fonction de x



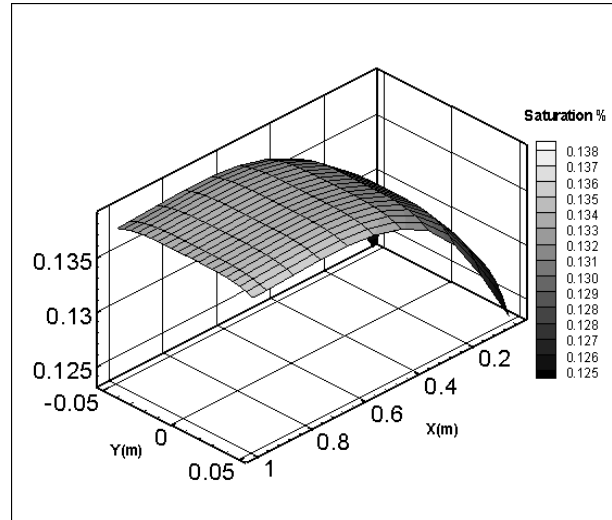
(a)



(c)



(b)



(d)

Figure 3 : Evolution de la saturation $S(x, y)$ après 12 h de séchage avec couche limite, (cas a) et sans couche limite, (cas b).

Figure 4 : Evolution de la saturation après 8h de séchage $S(x, y, 28800)$ pour un $\Delta S = 5\%$ (c) et pour un $\Delta S = 15\%$ (d)

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

References

1. PRAT M., *Heat and mass transfers predetermination between a drying material and external flow, Proceeding of the fifth International Drying Symposium, 1986*, pp 105-112.

2. MASMOUDI W., PRAT M., *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*, **1991**, Vol. 34, N°. 8, pp. 1975-1989.
3. HAMIR, 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*, **1987**, Vol.30, N°.6, pp.1149-1158.
4. N. BOUKADIDA AND S. BEN NASRALLAH, *Effect of the variability of Heat and mass transfer Coefficients on convective and convective-radiative, Drying of porous media, Drying Technology*, **2002**, 20(1), pp.67-91.
5. PATRICK PERRE and ROGER B.KEEY, *Drying of wood, principles and practices*, Vol.3, Part III.36, Edited by A.S.Mujumdar
7. S.BORIES, *Recent advance in modelisation of coupled heat and mass transfer in capillary- porous bodies. Proceedings of the sixth international drying symposium*, **1988**, pp. K1.47-KL.61
6. P.CRAUSSE, G.BACON ET S.BORIS, *Etude fondamentale des transferts couplés chaleur-masse en milieu poreux, Int.J.Heat and mass transfer*, **1984**, Vol.27,N°.5.pp.657-668.
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*, **2007**, Amman, Jordan, pp. 632-634.
9. PATANKAR, S.V., *Numerical heat Transfer and fluid flow*, **1980**