

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)

INFLUENCE DES CONDITIONS EXTERIEURES SUR LE COMPORTEMENT AU SECHAGE D'UN MILIEU POREUX

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
m_{v,x} Flux massique d'évaporation, kg/m².s
h_{m,x} Coefficient de transfert massique local, m/s
h_{t,x} Coefficient de transfert thermique local, w/m².k
Δh_v Chaleur latente de vaporisation, kJ/kg
a Diffusivité thermique, m²/s
R Constante des gaz parfaits

Lettres grecques

ρ masse volumique, kg/m³
λ conductivité thermique, w/m.k
φ_{tx} Flux de chaleur, w/m².s
ν viscosité cinématique, m²/s
Ø humidité relative de l'air, %

Indices / Exposants

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

1. Introduction

L'opération de séchage est une étape souvent nécessaire dans de nombreux procédés industriels ou autres. Hélas, elle est aussi très dévoratrice d'énergie. D'autres problèmes doivent être surmontés lors de ces opérations tels que : les changements de couleur, d'arôme, de composition chimique, cinétiques du séchage et le changement de la forme finale du produit.

L'amélioration de la technique du séchage devient une nécessité et une préoccupation principale des chercheurs [3], [4], [5], [6], [7]. 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 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.

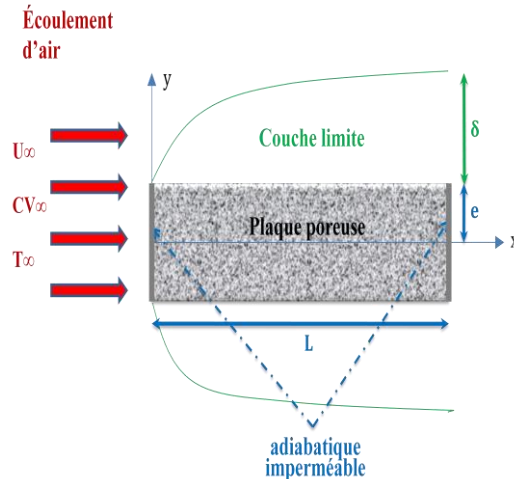


Figure 1 : Configuration géométrique du système

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:

$$x^+ = \frac{x}{L}, \quad y^+ = \frac{y}{L} \sqrt{Re}, \quad U^+ = \frac{U}{U_\infty}, \quad V^+ = \frac{V}{U_\infty} \sqrt{Re}, \quad T^+ = \frac{T - T_\infty}{T_{Surf} - T_\infty}, \quad C^+ = \frac{C}{C_\infty} \quad (1)$$

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

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

- 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:

$$\text{- Le nombre de Reynolds classique } (R_e = \frac{U_\infty L}{\nu}) \quad (6)$$

relatif à la vitesse de l'air libre et à la longueur L de la paroi.

$$\text{- Le nombre de Prandtl : } P_r = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \rho C_p}{\lambda_{fluide}} \quad (7)$$

$$\text{- Le nombre de Schmidt : } Sc = \frac{\nu}{D_v} \quad (8)$$

3.2 Dans le milieu poreux

- L'équation de diffusion

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

- L'équation de l'énergie

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

D est calculé à partir de l'expérience de Crausse [1], la corrélation suivante est retenue:

$$\log(D) = -8.14606 - 132.068S + 5097.55S^2 - 57519.6S^3 + 266822S^4 - 439586S^5 + 3944.53S^6 \quad (11)$$

Les travaux de Belhamri et al. [2] proposent pour ce béton renforcé, l'expression de la conductivité thermique suivante :

$$\lambda_{app} = -0.41222 \cdot S^2 + 0.77459 \cdot S + 0.20601 \quad (12)$$

4. Conditions initiales et aux limites

4.1 Dans la couche limite

On suppose que l'écoulement libre est uniforme et que la température et l'humidité du fluide sont également uniformes et constantes, soit :

Pour $x=0$ $\forall y$ on a : $T=T_\infty$, $C_v = C_v^\infty$

Pour $y=0$ $\forall x$ on a : $u = v = 0$

Pour $y \rightarrow \infty$ $\forall x$: $u = u_\infty$, $C_v = C_v^\infty$, $T=T_\infty$.

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_t , a pour expression :

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

Pour $0 \leq C_v(x, 0) < 1$

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.

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:

$$P_{VS} = 9.81 \cdot 10^4 \cdot 10^{\left(5.978 - \frac{2225}{T}\right)} \quad (19)$$

$$PV = P_{VS} \cdot \emptyset \quad (20)$$

4.2 Dans la paroi

Une distribution linéaire de la température et de la saturation a été proposée

$$\text{Au temps } = 0 \begin{cases} T = A\hat{y} + B \\ S = E\hat{y} + F \end{cases} \quad (21)$$

A, B, E, F des constants qui dépendent des conditions à l'intérieure de la paroi et les conditions extérieures auxquelles elle est soumise.

Aux limites, à $\hat{y} = \mp e$, un flux massique et un flux thermique ont été imposés (conditions de Newman)

$$\rho \varepsilon D \frac{\partial S}{\partial \hat{y}} = h_{mx} (\rho_{vsurf} - \rho_{air}) \quad (22)$$

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial \hat{y}} = h_{tx} (T_{air} - T_{surf}) + h_{mx} (\rho_{vsurf} - \rho_{air}) \Delta h_v \quad (23)$$

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) :

$$-D \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right)_{\hat{y}=0} = 0, \quad -\lambda_{eff} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{\hat{y}=0} = 0 \quad (24)$$

Les équations de transferts dans les deux milieux sont discrétisées en utilisant la méthode des volumes finis développée par Patankar [8]. Les équations obtenues ont été résolues, en utilisant un programme informatique.

5. Discussion des résultats

5.1 Evolution de la température et de la saturation de la paroi avec X au cours de séchage

L'accroissement de l'humidité (figure 3), s'accompagne d'une diminution de la température avec X (figure 2). Après douze heures de séchage, au bord d'attaque ($x=0$) la plaque atteint la valeur d'équilibre hygroscopique et devient complètement sèche, tandis que le reste de la plaque continue à subir le processus. Ceci s'explique par un séchage progressif de la paroi dans le sens de l'écoulement.

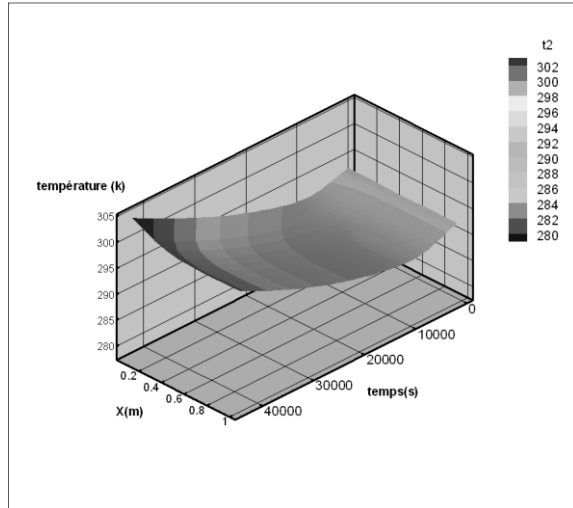


Figure 2 : Évolution de la température de la paroi avec X au cours de séchage $T(x, t)$

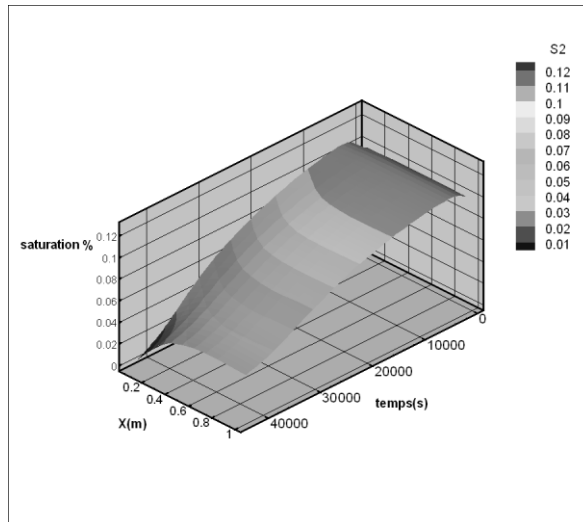


Figure 3 : Évolution de la saturation de la paroi avec X au cours de séchage $S(x, t)$

5.2 Influence du gradient de la saturation initiale sur le temps de séchage

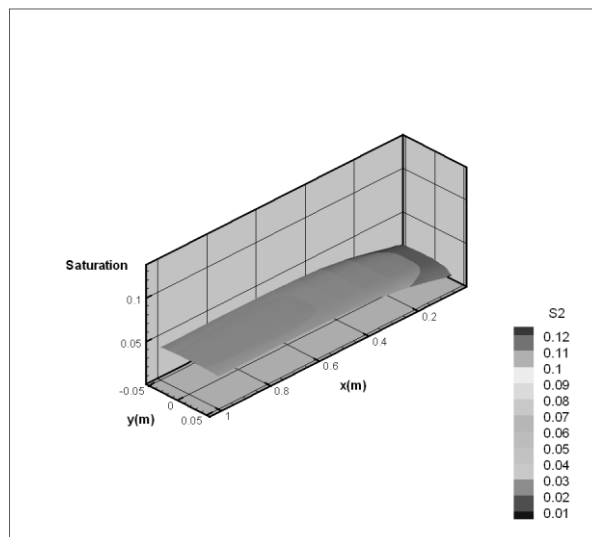


Figure 4: Distribution de la saturation de la paroi en fonction de x et y pour un $\Delta S = 5\%$ à l'instant $t = 12h$, $S(x, y, 43200)$

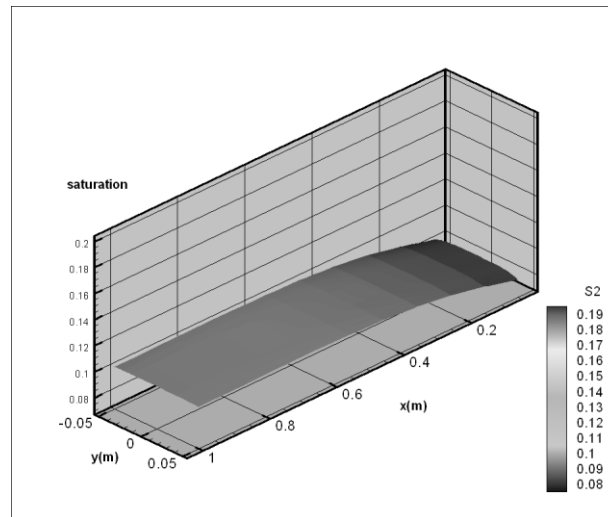


Figure 5: Distribution de la Saturation de la paroi en fonction de X et Y Pour un $\Delta S = 15\%$ à l'instant $t = 12h$
 $S(x, y, 43200)$

Sur la figure 5 (ΔS initial = 15%), près une durée de douze heures de séchage La saturation au coin gauche de la paroi à $x=0$ atteint une valeur $S= 8\%$, et finit par sécher en avance par rapport au reste du milieu, La dernière station ($x=1$), est à $S \approx 10\%$.

Si on compare ces résultats avec ceux obtenus pour le cas où le gradient de saturation initiale $\Delta S = 5\%$, (figure 4) après douze heures de séchage la saturation atteint une valeur qui vari entre (2.5% et 4.5%), on constate que pour un gradient de saturation plus grand la paroi nécessite un temps de séchage plus long pour atteindre l'équilibre hygroscopique.

6. Conclusion

Les résultats des simulations numériques ont permis de visualiser des champs de température et d'humidité à l'intérieur du milieu poreux

- Une importante variation de l'humidité et de la température 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.

Références

- [1] P.CRAUSSE, G.BACON ET S.BORIS, Etude fondamentale des transferts couples chaleur-masse en milieu poreux, Int.J.Heat and mass transfer, Vol.27,N°.5, pp.657-668. 1984
- [2]: 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 May 21-23, Amman, Jordan, pp. 632-634, 2007.
- [3]: PRAT M, Heat and mass transfers predetermination between a drying material and external flow, Proceeding of the fifth International Drying Symposium, pp 105-112, 1986.
- [4]: 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, Vol. 34, N°. 8, pp. 1975-1989, 1991
- [5]: 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.
- [6]: 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, 20(1), pp.67-91, 2002.
- [7] : Patrick Perré and Roger B.Keey : drying of wood, principles and practices, Vol.3, Part III.36, Edited by A.S.Mujumdar
- [8]: PATANKAR, S.V, Numerical heat Transfer and fluid flow, 1980.