

Influence de l'Evolution de l'Etat de Surface sur la Modélisation du Séchage de Milieux Poreux

Azeddine Belhamri ⁽¹⁾ et Jean Paul Fohr ⁽²⁾

⁽¹⁾ Institut de Génie Civil, Université de Constantine, Algérie

⁽²⁾ Laboratoire d'Etudes thermiques, URA C.N.R.S. N° 1403, Poitiers, France

(Accepté le 20.06.98)

Résumé — Il s'agit d'étudier le séchage de milieux poreux, particulièrement le comportement de la surface. Une analyse détaillée, de résultats d'expériences et leurs influences sur la modélisation, est présentée. Les moyens de mesures sont, principalement, une balance électronique, un pyromètre à infrarouge et un analyseur optique d'humidité de surface. Les évolutions de la température et de l'humidité de surface sont obtenues en fonction de la cinétique de séchage. Les résultats permettent, surtout, de caractériser le passage entre la première et la deuxième phase de séchage. Ils permettent, aussi, de mieux poser les conditions aux limites pour la modélisation du phénomène de séchage.

Abstract — This study deals with the drying of porous mediums, particularly on the surface behavior. A detailed analysis, of experimental results and their influences on the modelling, is presented. The means of measurements are, principally, an electronic balance, an infrared pyrometer and an optic sensor of surface humidity. The evolutions of the temperature and of the surface humidity is obtained as function of the drying kinetic. The results allow, especially, to characterizing the transition between the first and the second phase of drying. They allow, also, to rightly put the boundary conditions for modelling the phenomenon of drying.

Mots-clés: Séchage, Milieux poreux, Etat de surface, Température, Humidité, Expérience, Modélisation

1. INTRODUCTION

Les opérations de séchage représentent une consommation énergétique très importante. Elle est évaluée à 20 % environ de la consommation énergétique industrielle totale [1]. L'optimisation du processus de séchage implique une connaissance plus approfondie du phénomène. Les modèles de séchage débouchent sur des équations différentielles, dont les conditions aux limites et initiales s'adaptent mal avec les réalités expérimentales.

Ces difficultés peuvent être liées aux conditions de transfert à la surface. Les coefficients d'échange de surface sont difficiles à déterminer car ils dépendent, aussi, de l'état de surface, qui est variable au cours du processus de séchage. Il est, donc, nécessaire de recourir à l'expérience pour caractériser cette évolution au cours du séchage. Ce domaine a été très peu abordé, vu les nombreuses difficultés expérimentales rencontrées, surtout pour la mesure de l'humidité de surface [2].

Dans cette étude, on décrit un dispositif expérimental, qui a été développé au laboratoire [3]. Il permet de faire des mesures directes de l'état de surface (température et humidité) parallèlement à la cinétique de séchage. Les résultats obtenus sont appliqués à un modèle mathématique.

2. ETUDE EXPERIMENTALE

2.1. Dispositif expérimental

Les mesures de l'état de surface sont réalisées, parallèlement avec la cinétique dans une boucle de séchage fermée dotée de divers prises de mesures, qui permettent d'obtenir en

continu les différentes grandeurs: le poids de l'échantillon, la température et l'humidité de la surface poreuse, la température, l'humidité et la vitesse de l'air. [4]

Notons que, pour les mesures des paramètres de surface nous avons utilisé un pyromètre à infrarouge et un analyseur optique d'humidité de surface. Ce choix est justifié par les perturbations de l'écoulement ou la non continuité des mesures que peuvent causer les méthodes classiques (mesures de température avec thermocouples et de l'humidité par méthodes destructives, par exemple). Ceci constitue, donc, une originalité dans le domaine du séchage. Les données sont transmises, instantanément, à un micro-ordinateur, où elles sont gérées grâce à un programme informatique d'acquisition et de traitement des données, que nous avons développé.

2.2. Résultats et interprétations

De nombreux matériaux ont été étudiés, sous différentes conditions de séchage. L'analyse du comportement de deux matériaux académiques telles que: les billes de bronze frittées (Fig.1) ou la brique poreuse (Fig. 2), montre les différentes phases de séchage observées habituellement: [5]

- Une courte phase transitoire, où la température de surface du produit se met à sa valeur d'équilibre, qui est pratiquement la température humide de l'air de séchage et l'humidité de surface chute vers une valeur quasi stable pour le cas de la brique poreuse et vers une valeur voisine de 45 % pour le cas des billes de bronze.

- La première phase caractérisée par une chute régulière de la saturation globale, soit par un flux d'évaporation constant, est observée, pour les deux cas. La température de surface garde sa valeur constante. Quant à l'humidité de surface, elle est presque constante pour la brique poreuse. Mais une chute est observée pour le cas des billes de bronze; notons qu'elle change de pente par rapport à la phase transitoire et qu'elle garde une décroissance régulière durant cette phase.

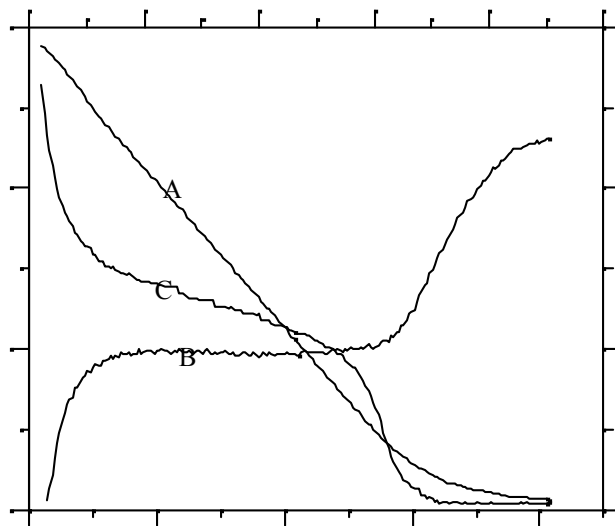


Fig. 1: Courbe expérimentale du séchage d'un lit de billes de bronze frittées

A: Saturation globale en fonction du temps

B: Température de surface en fonction du temps

C: Humidité de surface en fonction du temps

- Pour le cas de la brique poreuse, une phase "transitoire" est observée lors du passage, à la vitesse décroissante, la saturation de surface n'est pas, encore, égale à sa valeur irréductible. Les mesures de surface montrent que durant cette période, l'humidité de surface tend vers sa

valeur irréductible, la température de surface croît légèrement et se stabilise autour d'une nouvelle valeur d'équilibre. On assiste à la transition première-deuxième phase.

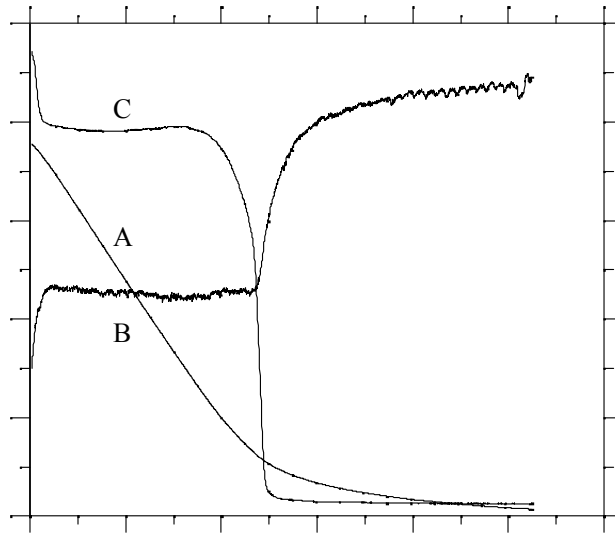


Fig. 2: Courbe expérimentale du séchage d'une brique poreuse
 A: Saturation globale en fonction du temps
 B: Température de surface en fonction du temps
 C: Humidité de surface en fonction du temps

Dès que l'humidité de surface atteint sa valeur d'équilibre, on distingue une montée de la température de surface. On en conclue que la surface ayant atteint sa valeur irréductible, devenue donc, quasiment sèche, s'échauffe en contact avec l'air asséchant car toute son énergie, absorbée par l'échantillon, est transformée en chaleur sensible. L'évolution de la saturation globale n'est plus linéaire, elle tend exponentiellement vers sa valeur d'équilibre, le matériau a perdu sa plus grande partie d'humidité, c'est la deuxième phase de séchage.

3. MODELISATION

Parmi les quelques modèles mathématiques, qui décrivent le séchage de milieux poreux, nous avons retenu le modèle de Whitaker. Le formalisme de Whitaker est basée sur une "macroscopisation" des équations physiques relatives à l'état microscopique de chaque phase présente dans le milieu poreux [6]. Il applique les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie aux trois phases, liquide, solide et gazeuse dans un volume élémentaire représentatif. Il effectue, ensuite, une opération de macroscopisation de ces équations en utilisant la technique de prise de moyenne, au cours de laquelle des termes supplémentaires apparaissent.

Le système d'équations obtenues est complété par les relations thermodynamiques appliquées à la phase gazeuse. En émettant des hypothèses et en procédant à des simplifications justifiées, le modèle de Whitaker peut être transformé en un modèle de diffusion avec un coefficient variable.

$$\text{Erreur !} = \text{Erreur !} (D(S) \text{ Erreur !}) \quad (1)$$

$$D(S) = D_{\text{eff}} \text{ Erreur ! } P_{vs}(T) f(S) + \text{Erreur !} (- \text{Erreur !})$$

$$\text{où } f(S) = \left(-\frac{\partial P_c}{\partial S}\right) \exp(-\text{Erreur !})$$

Dans le cas de la brique poreuse, les résultats expérimentaux (Fig. 2) permettent de déduire les conditions initiales et aux limites suivantes:

- En première phase de séchage, la condition du flux évaporé sur la surface constant est appliquée.

- La réduction de surface humide, qui caractérise le passage entre la première et la deuxième phase peut aussi être traitée en appliquant les relations empiriques proposées par [7]:

$$h = h_0 (\eta_h + (1 - \eta_h) \exp(-\text{Erreur !})) \quad (2)$$

$$h_m = h_{m0} (\eta_m + (1 - \eta_m) \exp(-\text{Erreur !})) \quad (3)$$

$$(S_{irr} < S(e) < S_{cri})$$

η_h et η_m sont des constantes données pour chaque matériau.

- Durant la période à vitesse décroissante, la surface garde sa valeur irréductible, un front d'évaporation, qui se déplace à l'intérieur du produit, est observé. Ce phénomène peut être interprété par le modèle du front d'évaporation mobile[8]: Le milieu poreux est divisé en deux parties, une zone humide et une sèche où il n'y a plus d'écoulement liquide mais seulement une diffusion de vapeur. Dans la zone humide, le transfert d'humidité s'effectue sous forme liquide, de la même manière qu'en première phase. Sur la frontière entre les deux régions sèches et humides on pose que $S = S_{irr}$. L'évaporation a lieu seulement sur cette frontière.

Les principales conditions aux limites s'écrivent alors:

Sur la surface libre:

$$\left(D_{eff} \frac{\partial \rho_v}{\partial y}\right)_{y=e} = -h_m (\rho_{vsurf} - \rho_{air}) \quad (4)$$

Dans la zone sèche:

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \text{Erreur !} (D_{eff} \text{Erreur !}) \quad (5)$$

Sur la frontière mobile $y = \xi(t)$:

$$m = D_{eff} \frac{\partial \rho_v}{\partial y} = D_{eff} (\rho_1 + \rho_1 \exp(-\text{Erreur !})) S(\xi) \quad (6)$$

Saturation

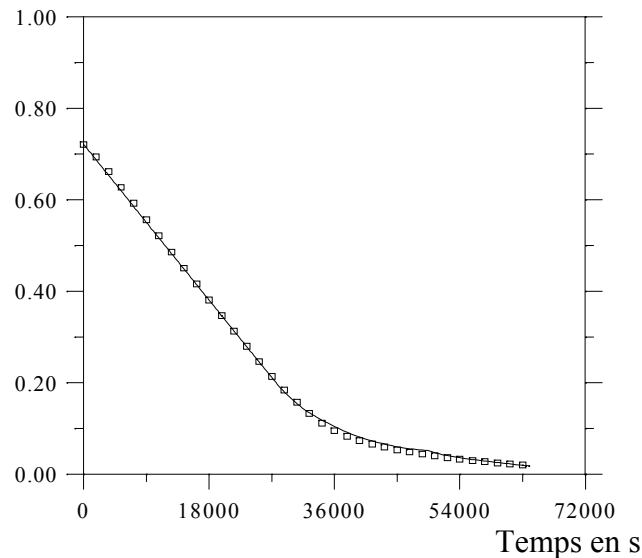


Fig. 3: Cinétique de séchage ($m = 2.4 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s.m}^2$)
Comparaison modèle - expérience

L'équation (1), couplée avec les différentes conditions citées précédemment (2 à 6), est résolue numériquement en utilisant la méthode des volumes finis [9]. Les principales paramètres de simulation sont [3]:

$$\varepsilon = 0.65, S_{\text{irr}} = 0.05, K = 2.5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2, \rho_s = 1250 \text{ kg/m}^3, \lambda = 1.44 \text{ W/m.K}$$

Les figures 3 et 4 représentent respectivement, une confrontation de ces solutions avec l'expérience et l'évolution du profil d'humidité interne au cours du temps.

Avec un choix judicieux des différents paramètres physiques (saturation de surface irréductible, saturation critique, expression de la perméabilité, porosité, etc.), un accord entre les valeurs calculées et la courbe expérimentale tout à fait satisfaisant, peut être obtenu.

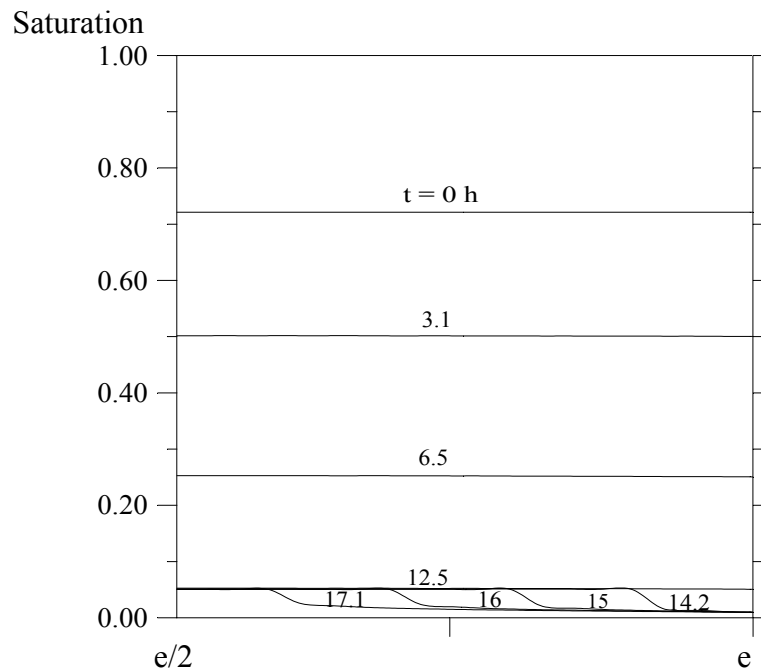


Fig. 4: Profil d'humidité calculé

Le profil d'humidité interne est très légèrement parabolique, on observe la pénétration du front de séchage vers l'intérieur de la brique. Pour valider, ce calcul des mesures électriques ont été réalisées [3]. Qualitativement, les mêmes allures sont observées, mais il reste difficile de conclure sur les résultats numériques.

4. CONCLUSION

Les mesures de l'état de surface permettent d'interpréter le passage entre les différentes phases de séchage. Dans certains cas, elles confirment les hypothèses de certains auteurs [10, 11] et elles montrent un comportement particulier à chaque matériau suivant sa nature (porosité particulière, état de surface, hygroscopicité, etc.).

Ces mesures peuvent être appliquées pour la résolution du modèle de Whitaker avec un front de séchage. La cinétique de séchage peut être, alors reproduite de façon satisfaisante, à condition de disposer d'expressions correctes des différents paramètres physiques.

NOMENCLATURE

D : Coefficient de diffusion [m^2/s]	h : Coefficient de transfert de chaleur [$\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$]
H_m : Coefficient de transfert de masse [m]	K : Perméabilité intrinsèque [m^2]
K_i : Perméabilité relative à la phase i	m : Taux d'évaporation [kg/m^2]
M : Masse molaire [kg/mole]	R : constante des gaz parfaits
S : Saturation liquide	t : Temps [s]
T : Température [K]	x, y : Coordonnées
ε : Porosité ($\varepsilon = \varepsilon_l + \varepsilon_g$)	λ : Conductivité thermique [$\text{W}/\text{m}.\text{K}$]
ρ : Masse volumique [kg/m^3]	ξ : Position du front de séchage [m]

Indices

0 : initial	air : concerne l'air en dehors de la couche limite
cri : critique	l : liquide
g : gaz	irr : irréductible
h : chaleur	m : massique
eff : effectif	v : vapeur
s : solide	$surf$: surface

REFERENCES

- [1] C. Moyne and M. Roques, "Réalités et Perspectives du Séchage", Rév. Gén. Them. Fr. N°292 (1986)
- [2] J. Van Brakel, "Mass Transfer in Convective Drying", Advances in Drying, Vol.1, Chapter Seven, Edited by A.S. Mujumdar, Hemisphere Publi., New York (1980)
- [3] A. Belhamri, "Etude des transferts de chaleur et de masse à l'interface d'un milieu poreux au cours du séchage", Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers (1992)
- [4] A. Belhamri, N. Labed and J.-P. Fohr, "Etude des Mécanismes de Séchage et du Comportement de la Surface de Milieux Poreux", Proceedings du 3^{ème} Séminaire International sur la Physique Energétique, pp. 361 - 366, Béchar, Algérie (1996)
- [5] A. Belhamri and J.P. Fohr, "The Wet Surface Reduction During the First Drying Period", Drying'92 Part A, Edited by A.S. Mujumdar, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam The Netherlands, pp. 353 - 363 (1992)

- [6] S. Whitaker, "*Heat and Mass Transfer in Granular Porous Media*", Advances in drying, Vol. 1, Chapter two, Edited by A.S. Mujumdar, Hemisphere Publi., New York (1980)
- [7] P. Chen D.C.T. Pei, "*A Mathematical Model of Drying Processes*", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, N°2, pp. 297-310 (1989)
- [8] R. Toei, "*Drying Mechanism of Capillary Porous Bodies*", Advances in Drying, vol.2, Chapter Eight, Edited by A.S. Mujumdar Hemisphere Publi., New York (1980)
- [9] S.V. Patankar, "*Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*", Hemisphere Publi. Mc. Graw Hill, New York (1980)
- [10] M. Suzuki, S. Maeda, "*On the mechanism of drying of granulars beds*", Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol 1 , N°1, pp. 26-31 (1968)
- [11] E.U. Schlünder, "*On the mechanism of the constant drying rate period and its relevance to diffusion controlled catalytic gaz phase reactions*", Chemical Engineering Science, Vol. 43, N°10, pp. 2685-2688 (1988)