

## TRANSFERTS COUPLÉS DE CHALEUR ET DE MASSE DANS UN MILIEU POREUX : APPLICATION AU SÉCHAGE DES FIGES MISES EN COUCHES ÉPAISSES

R. KHAMA<sup>1</sup>, A. BELHAMRI<sup>2\*</sup>, L. BENNAMOUN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Département de Génie Civil

Centre Universitaire Larbi BenM'hidi, Oum EL Bouaghi - Algérie

E-mail : [redkhama@yahoo.fr](mailto:redkhama@yahoo.fr)

<sup>2</sup> Département de Génie Climatique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Université Mentouri Constantine - Algérie

E-mail : [belhamri\\_a@yahoo.fr](mailto:belhamri_a@yahoo.fr)

<sup>3</sup> Département de Physique, Institut des Sciences Exactes

Centre Universitaire Larbi BenM'hidi, Oum EL Bouaghi - Algérie

E-mail : [lyes\\_bennamoun@yahoo.ca](mailto:lyes_bennamoun@yahoo.ca)

### RÉSUMÉ

Le processus du séchage industriel est étroitement lié à la connaissance et à la maîtrise des phénomènes de transferts couplés de chaleur et de masse qui se produisent entre l'air asséchant et le produit humide à sécher.

Ce travail est une contribution à l'analyse de ces phénomènes complexes, il s'intéresse au séchage d'un fruit (les figes) déposé en couches épaisses et exposé à une convection forcée d'air. Le système étudié se comporte comme étant un milieu poreux et l'étude est développée à l'échelle macroscopique avec un empilement de sphères du fruit. Il est important d'indiquer que le phénomène du rétrécissement est pris en considération. Le modèle utilisé est basé sur l'application du bilan massique et énergétique (à l'air asséchant et le produit à sécher), avec utilisation de l'hypothèse du Non Équilibre Thermique Local (N.E.T.L), mais aussi du modèle de HENDERSON et PABIS pour exprimer la cinétique de séchage. L'analyse théorique du séchage du lit statique mène à un ensemble d'équations aux dérivées partielles qui sont discrétisées par la méthode des différences finies et résolues par la méthode itérative de Gauss-Seidel. Un code de calcul en Fortran est ensuite développé.

L'ensemble des résultats obtenus montre l'absence de la phase constante de séchage et permet de mettre en évidence l'effet du rétrécissement sur la cinétique de séchage dont l'importance est très claire et sa négligence conduit à des résultats incorrects. On montre aussi que le séchage est affecté considérablement par les conditions extérieures.

### Mots clés:

Milieu poreux - Echelle macroscopique - Couches épaisses - Effet du rétrécissement - Convection forcée- Les figes.

### NOMENCLATURE

<b>A1</b> :	Taux de surface de contact	(m <sup>2</sup> / m <sup>3</sup> )	<b>Indices</b>			
<b>a<sub>w</sub></b> :	Activité de l'eau	(/)	<b>a</b> :	Air	<b>e</b> :	Eau
<b>CP</b> :	Chaleur massique	(J / Kg. K)	<b>eq</b> :	Équilibre	<b>h</b> :	Humide
<b>d</b> :	Diamètre	(m)	<b>o</b> :	Initiale	<b>s</b> :	Solide
<b>Ea</b> :	Énergie d'activation	(KJ / mol)	<b>sat</b> :	Saturation	<b>sec</b> :	Sec
<b>H</b> :	Chaleur latente de vaporisation	(J / Kg)	<b>V</b> :	Vapeur		
<b>M</b> :	Teneur en humidité du produit	(Kg H <sub>2</sub> O/ Kg de m.s)				
<b>m</b> :	Masse	(Kg)				
<b>T</b> :	Température	(°C)				
<b>v</b> :	Vitesse de l'air	(m / s)				

## 1. INTRODUCTION

Un produit (les figues) en vrac est entassé dans un séchoir convectif qui se comporte comme un milieu poreux. L'étude est développée à l'échelle macroscopique avec un empilement de sphères. L'air est soufflé dans un amas de produit (figues) mis en couches épaisses de façon à remplir au maximum le séchoir. Beaucoup d'études ont été faites sur les transferts pendant le séchage, comme ceux de Amir et Al. (1987) [1], Masmoudi et Al. (1991), A. Mhimid et Al. (2000) [2], L. Bennamoun et A. Belhamri (2003) [3], de L. Bennamoun et A. Belhamri (2006) [4] et de L. Bennamoun et A. Belhamri (2008) [5]. Dans ce travail, on considère le phénomène de rétrécissement des figues qui est commun pour les produits alimentaires et observé pendant différents processus de déshydratation ; des changements devraient être pris en compte en prévoyant des profils d'humidité et de température du produit séché. Plusieurs modèles visés dans les travaux de [6] ont été comparés aux données expérimentales. Pour certains produits, les modèles qui négligent le changement de porosité tendent à montrer de plus grandes déviations ; L. Bennamoun et A. Belhamri (2008) [7] présentent l'effet du rétrécissement dans une description mathématique des transferts couplés pendant le séchage.

## 1. MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

### 1.1 Modèle de séchage

Le transfert de chaleur et de masse dans le séchoir est décrit par les équations de transferts dans un milieu poreux traversé par un courant d'air chauffé. Le modèle utilisé est dit modèle de séchage (E.D.P) (Équations aux Dérivées Partielles). On a d'après [8], les équations suivantes:

- Le bilan massique pour le gaz de séchage (air humide):

$$\rho_a \left( \varepsilon \frac{\partial W}{\partial t} + v \frac{\partial W}{\partial x} \right) + (1-\varepsilon) \rho_s \frac{\partial M}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

- Le bilan enthalpique pour le gaz de séchage (air humide):

$$\rho_a (C_{Pa} + W \cdot C_{Pv}) \left( \varepsilon \frac{\partial T_a}{\partial t} + v \frac{\partial T_a}{\partial x} \right) = A1 \cdot \alpha (T_s - T_a) - (1-\varepsilon) \rho_s \cdot C_{Pv} (T_s - T_a) \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2)$$

- Le bilan enthalpique pour le solide (figues):

$$(1-\varepsilon) \cdot \rho_s (C_{Ps} + M \cdot C_{Pe}) \frac{\partial T_s}{\partial t} = A1 \cdot \alpha (T_a - T_s) + H \cdot \rho_s (1-\varepsilon) \frac{\partial M}{\partial t} \quad (3)$$

Le système EDP à quatre inconnues (les fonctions  $T_a$ ,  $T_s$ ,  $W$  et  $M$ ) et deux variables (l'espace  $x$  et le temps  $t$ ) est complété par l'équation de la cinétique de séchage, d'après, [9] :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -K(M - M_{eq}) \quad (4)$$

#### 1.1.1 Hypothèses sur le modèle

Le modèle mathématique de séchage est basé sur les équations des bilans massique et énergétique et sur l'utilisation des corrélations proposées pour la constante de séchage  $K$ , avec: Négligence du tassement des couches du produit, du gradient de température, de la concentration entre la surface et le centre de la figue et des échanges par conduction et par rayonnement devant ceux par convection et tout en considérant une étude unidimensionnelle. [2,8]

### 1.1.2 Hypothèse (N.L.T.E)

L'hypothèse du Non Équilibre Thermique Local (N.L.T.E) est prise en considération, exprimée par les deux équations d'énergie (2) et (3) : c'est une hypothèse qui considère  $T_s \neq T_a$ .

## 1.2 Calcul des constantes de séchage

Le modèle de HENDERSON et PABIS est choisi pour l'étude de la cinétique et est exprimé par:

$$\frac{M(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = A \cdot \exp(-K \cdot t) \quad (5)$$

Les valeurs du coefficient K sont approximées par l'équation simple de type Arrhenius [10]:

$$K = K_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{8.3143 \cdot (T_a + 273)}\right) \quad (6)$$

Le coefficient  $K_0$  et l'énergie d'activation  $E_a$  sont donnés, en fonction de la vitesse de l'air par:

$$K_0 = 1341.2 \exp(2.8404 \cdot v) \quad (7)$$

$$E_a = \frac{(34.037663 \times 14407.625) + (48.47102 \times v^{15.96189})}{14407.625 + v^{15.96189}} \quad (8)$$

En fin, la constante A dans l'équation (5) est donnée, en fonction de  $v$  et  $T_a$ , par:

$$A = \begin{pmatrix} 0.000104 \cdot T_a^2 \\ -0.012291 \cdot T_a \\ +0.256909 \end{pmatrix} \cdot v^2 + \begin{pmatrix} -0.000203 \cdot T_a^2 \\ +0.021976 \cdot T_a \\ -0.302885 \end{pmatrix} \cdot v + \begin{pmatrix} 0.000059 \cdot T_a^2 \\ -0.002967 \cdot T_a \\ +0.765417 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$M_{eq}$  est calculé à partir de l'équation de HENDERSON donnée pour les fibres, d'après [10], par :

$$1 - \phi = \exp\left(-2.0108 \times 10^{-2} T_s - M_{eq}^{1.1714}\right) \quad (10)$$

## 2. CALCUL DE LA VITESSE DE L'AIR ASSÉCHANT [3,4]

La vitesse  $v$  est calculée en fonction de la porosité qui est, à son tour, fonction du rétrécissement :

$$v = \frac{v_0}{\varepsilon} = \frac{v_0}{1 - OC} \quad (11)$$

$OC$  est le taux d'occupation défini, pour le volume  $L \times \ell \times d_s$  du parallélépipède d'une couche, par :

$$OC = \frac{N_s \cdot \pi d_s^3}{6 \cdot L \cdot \ell \cdot d_s} \quad (12)$$

$$d_s = \left(\frac{6 \cdot V_s}{N_s \cdot \pi}\right)^{1/3} \quad (13)$$

Le nombre constant de sphères dans une couche,  $N_s$ , et le volume du produit,  $V_s$ , sont donnés par:

$$N_s = \frac{L}{d_{s0}} \times \frac{\ell}{d_{s0}} \quad (14)$$

$$V_s = \frac{m_{sh}}{\rho_s} \quad (15)$$

La masse  $m_{sh}$  est fonction de la masse constante  $m_{ssec}$  :

$$m_{sh} = (M+1) \cdot m_{ssec} = (M+1) \cdot \frac{N_s \times 1073 \cdot 979 \times \pi \times d_{s0}^3}{6(M_0+1)} \quad (16)$$

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1 Cinétique de séchage

Les courbes des figures (1-2-3) ne permettent de distinguer qu'une seule phase de séchage: la phase à vitesse décroissante caractérisée, sur la figure 1, par une inclinaison décroissante où la tangente n'est pas constante et encore mieux sur la figure 2 où le taux de séchage est nettement décroissant.

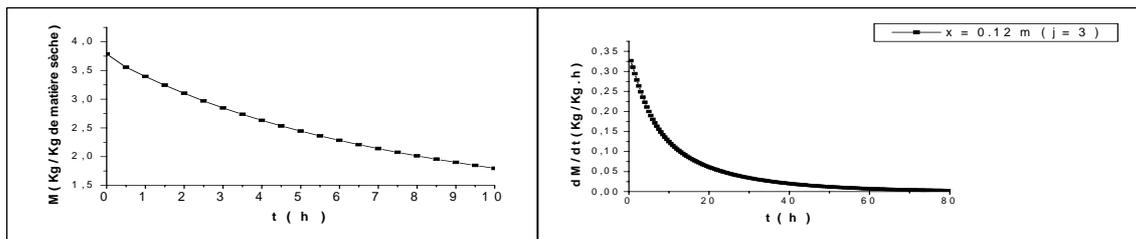


Figure 1. Variation temporelle de la teneur en eau des figes au milieu de la couche épaisse.

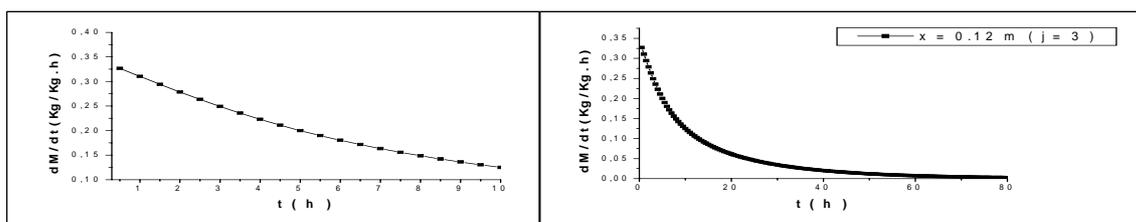


Figure 2. Variation temporelle du taux de séchage des figes au milieu de la couche épaisse.

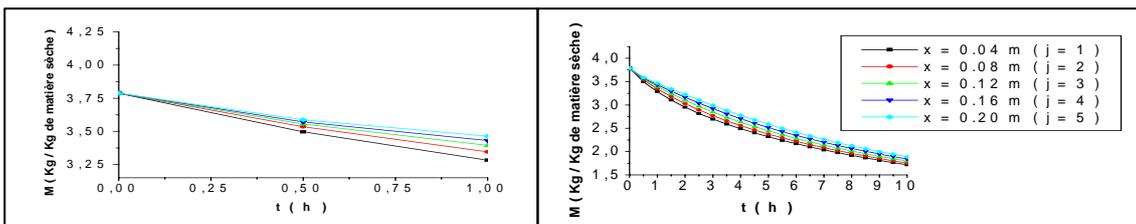


Figure 3. Variation temporelle de la teneur en eau des figes mises en couche épaisse.

Les courbes de la figure 3-a commencent à se séparer dès les 7.5 premières minutes ; on peut voir, qu'à la fin de la première demi heure que la première courbe est entrain de se séparer des quatre autres courbes d'une manière plus importante que celle prise par ces mêmes dernières entre elles: ceci est dû à la diminution de la teneur en eau dans le temps et à son augmentation dans l'espace

### 3.2 Effet du rétrécissement sur la cinétique de séchage

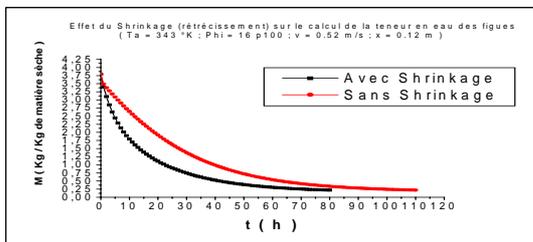


Figure 4. Effet du rétrécissement sur les calculs de la teneur en eau des figes.

( $T_a = 343 \text{ K}$ ,  $v = 0.52 \text{ m / s}$ ,  $\phi = 16 \%$ ,  $x = 0.12 \text{ m}$ )

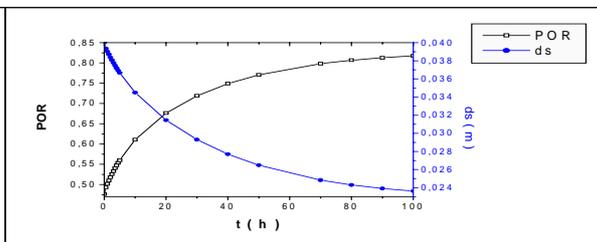


Figure 5. Effet du rétrécissement sur la porosité et le diamètre des figes.

La figure 4 est une comparaison entre deux calculs qui ont été faits : l'un avec la considération du rétrécissement, l'autre sans. L'importance de l'introduction de ce phénomène est très claire et sa négligence conduit à des résultats incorrects:  $M_{eq}$  est atteint dans 75.5 h (Avec) alors qu'il n'est atteint qu'après 110 h (Sans), soit alors 34.5 h de différence. La cause de cette erreur réside au niveau du calcul de la vitesse  $v$  de l'air ; la figure 5 confirme bien cela en montrant l'effet du rétrécissement sur la porosité et le diamètre du produit humide.

### 3.3 Étude paramétrique

#### 3.3.1 Effet de la température de l'air asséchant

La figure 6 montre que la température de l'air asséchant est un paramètre influent dans le séchage son augmentation donne à l'air plus de pouvoir évaporateur qui est reflété dans le temps de séchage en le rendant plus court , autrement dit , cette augmentation permet de donner plus de chaleur au produit et par conséquent plus d'évaporation d'eau du produit est observée. Sur la figure 6-b, le temps de séchage pour  $T_a = 333 \text{ K}$  est 90 h alors qu'il est de 60 h pour  $T_a = 353 \text{ K}$  et sur la figure 6-a, la quantité d'eau évaporée du produit à  $t = 2.5 \text{ h}$ , par exemple, pour  $T_a = 333 \text{ K}$  est de 0.69886 Kg / Kg de matière sèche alors qu'elle est de 0.96950 Kg / Kg de matière sèche pour  $T_a = 353 \text{ K}$ . Sur la même figure, l'effet de l'augmentation de la température de l'air asséchant apparaît au début du séchage pour les premières couches qui prennent presque toute l'énergie de l'air asséchant, ensuite l'effet de la température est visible pour les dernières couches car les premières couches commencent à prendre moins d'énergie et par conséquent plus d'énergie est cédée aux dernières.

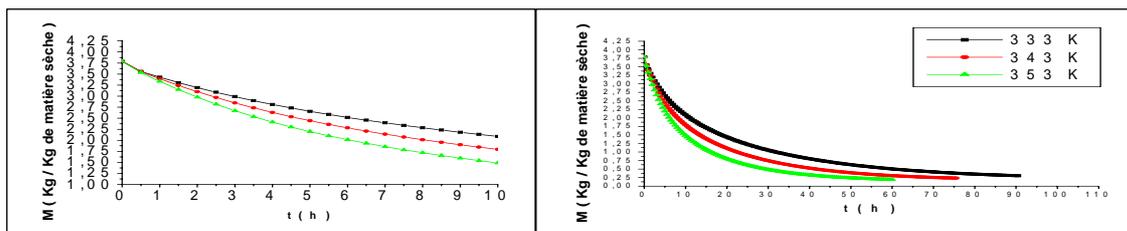


Figure 6. Effet de la température de l'air asséchant sur la teneur en eau des figes.  
( $v = 0.52 \text{ m / s}$ ,  $\phi = 16 \%$ ,  $x = 0.12 \text{ m}$ )

### 3.3.2 Effet de la vitesse de l'air asséchant

Les figures 7, représentant l'évolution temporelle de la teneur en eau du produit humide pour plusieurs vitesses de l'air asséchant, montrent bien l'effet de cette dernière sur le transfert de masse au cours du processus de séchage : ce transfert est plus rapide quand la vitesse de l'air asséchant est plus élevée; cela peut s'expliquer par l'augmentation du nombre de Reynolds et par conséquent l'importance des échanges convectifs qui provoquent l'augmentation de l'évaporation d'humidité.

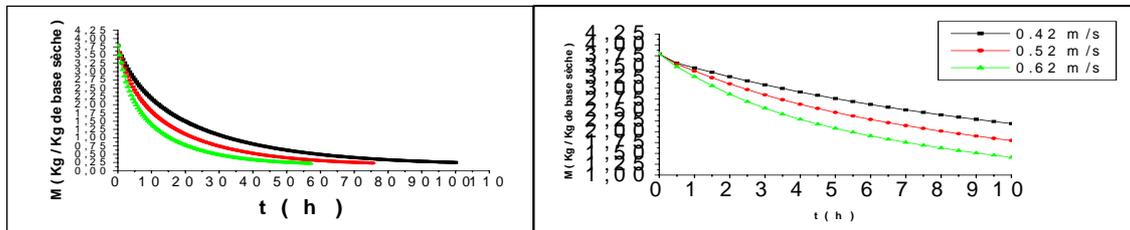


Figure 7. Effet de la vitesse de l'air asséchant sur la teneur en eau des figes.

## 4. CONCLUSION

L'étude de la cinétique a permis d'arriver à constater l'absence de la phase constante de séchage, processus qui s'est déroulé dans la période de chute de taux et l'importance de la prise en considération du phénomène de rétrécissement lors de l'étude du séchage. L'étude paramétrique a mis en évidence l'effet du changement des conditions extérieures à savoir : la température et la vitesse. En effet par l'augmentation du premier paramètre, augmentent les quantités d'eau à évaporer dans le produit humide surtout pour les premières couches, tan disque l'augmentation de la vitesse est apparemment bénéfique pour les dernières couches même au début du séchage ; il serait peut être préférable de jouer sur ce paramètre pour des couches plus épaisses. Ce qui a permis de constater que la vitesse de l'air est un paramètre peu influent en le comparant à la température.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. H.Amir et Al."Séchage superficiel d'un matériau poreux humide par convection forcée d'air chaud:couplage entre les équations de transfert dans le matériau et celles de la couche limite", Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 30, No. 6, pp. 1149 – 1158, (1987).
2. A.Mhimid "Heat and mass transfer during drying of granular products – simulation with convective and conductive boundary conditions", International Journal of Heat and Mass Transfer 43 (2000) 2779 – 2791.
3. L.Bennamoun and A.Belhamri "Design and simulation of a solar dryer for agriculture products", Journal of Food Engineering 59 (2003) 259 – 266.
4. L.Bennamoun and A.Belhamri "Numerical simulation of drying under variables external conditions: Application to solar drying of seedless grapes", Journal of Food Engineering 76 (2006).
5. L.Bennamoun and A.Belhamri "Study of Heat and Mass Transfer in Porous Media : Application to Packed – Bed Drying", FDMP, Vol.132, no.1, pp.1-10 (2008).
6. L. MAYOR, A.M. SERENO "Modelling shrinkage during convecting drying of food material: a review", Journal of Food Engineering 61 (2004) 373–386.
7. L.Bennamoun and A.Belhamri " Mathematical description of heat and mass transfer during deep bed drying: Effect of product shrinkage on bed porosity», Applied Thermal Engineering 28 (2008).
8. G. Arnaud and J. - P. Fohr "Slow drying simulation in thick layers of granular products", Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 31, No. 12, pp. 2517 – 2526 (1988).
9. STAMATIOS and Al. "Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs", Journal of Food Engineering 65 (2004) 449– 458.
10. A. A. EL- SEBAII and Al. "Empirical correlation for drying kinetics of some fruits and vegetables", Energy 27 pp. 845 – 859 (2002).