

ANALYSE DES TRANSFERTS COUPLÉS DE CHALEUR ET DE MASSE PENDANT LE SÉCHAGE DES FIGES

Khama R.¹, Belhamri A.², Bennamoun L.³

¹ Département de Génie Civil, Centre Universitaire Larbi BenM'hidi, Oum EL Bouaghi

Tel: 06 66 44 18 95, Fax: 032 47 61 55, E-mail: redkhama@yahoo.fr

² Département de Génie Climatique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Mentouri Constantine

Tel: 07 75 08 40 20, E-mail: belhamri_a@yahoo.fr

³ Département de Physique, Institut des Sciences Exactes, Centre Universitaire Larbi BenM'hidi,

Oum EL Bouaghi, Tel: 05 50 68 40 86, E-mail: lyes_bennamoun@yahoo.ca

ملخص

إن عملية التجفيف الصناعي مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بمعرفة ظاهري الانتقال المزدوج للحرارة و الكتلة اللتين تحدثان بين الهواء المجفف و المادة المبللة المزمع تجفيفها كما هي مرتبطة بالتحكم فيهما في عملية معقدة تستلزم دائماً هاتين الظاهرتين المتزامنتين و المزدوجتين. إن هذا العمل إسهام متواضع في تحليل هاتين الظاهرتين المعقدتين فهي تتناول تجفيف فاكهة (التين) موضوعة في طبقة سميكة و معرضة لحمل حراري قسري من قبل الهويجسرف الوسط كوسط مسامي و لقد أنجزت الدراسة وفق سلم عياني و باعتبار تكديس لكرات الفاكهة. إن النموذج المستعمل هو نموذج يرتكز أساساً على معادلات الموازنات الكتلية و الطاقوية (للهاواء المجفف و المادة المراد تجفيفها) باستعمال نموذج هندرسن - بابيس قصد التعبير عن حركية التجفيف في التحليل النظري للتجفيف إلى مجموعة من المعادلات ذات المشتقات الجزئية و التي تحلل بطريقة الفوارق المنتهية ثم تحل بطريقة غور-سيدال و بعدها تم إنجاز برنامج حساب بالفرترن. مجموعة النتائج المتحصل عليها تبين غياب الطور الثابت للتجفيف كما توضح التأثير الواضح للظروف الخارجية على عملية التجفيف (درجة حرارة الهواء المجفف و كذا سرعته).

كلمات مفتاحية: انتقال الحرارة و الكتلة - الوسط المسامي - التجفيف - الطبقة السميكة - التين - الحمل الحراري القسري.

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, en effet sécher des matériaux humides est un processus compliqué impliquant toujours ces phénomènes simultanés et couplés.

Ce travail est une contribution modeste 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. Le modèle utilisé est basé sur l'application du bilan massique et énergétique (à l'air asséchant et le produit à sécher), avec utilisation 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 montre également que le séchage est affecté considérablement par les conditions extérieures (température de l'air asséchant ainsi que sa vitesse).

Mots clés: Transfert de chaleur et de masse - Milieu poreux - Séchage - Couche épaisse - Figes - Convection forcée.

ABSTRACT

The process of industrial drying is closely related on the knowledge and the control of the phenomena of coupled transfers of heat and mass occurring between the draining air and the wet product to dry. To dry of wet materials is a complicated process always implying these simultaneous and coupled phenomena.

This work is a modest contribution to the analysis of these complex phenomena, it is interested in drying of a fruit (figs) deposited in thick layer and exposed to a forced convection of air. The medium behaves as being porous and the study is developed on a macroscopic scale with a stacking of spheres. The model used is based on the application of the mass and energy balance (with the draining air and the product to be dried), with use of the model of HENDERSON and PABIS to express the kinetics of drying. The theoretical analysis of the drying of the static bed leads to a whole of partial derivative equations which are discretized by the method of the finite differences and solved by the iterative method of Gauss - Seidel; a computer code in FORTRAN is then developed. The whole of the results obtained shows the absence of the constant phase of drying and also shows that drying is affected considerably by the external conditions (temperature of the air draining like its speed).

Key words: Heat and mass transfer - Porous media - Drying - Thick layer - Figs - Forced convection

1. INTRODUCTION

Le séchage est l'une des principales techniques de préservation des produits agro-alimentaires, il s'agit du processus le plus commun employé afin d'abaisser la quantité d'eau présente dans ces produits, pour que les conditions de leur stockage soient les plus favorables. Grâce à ce processus, l'activité de l'eau diminue considérablement pendant le stockage ainsi que l'activité microbiologique, les changements physiques et chimiques étant réduits au minimum. Le séchage est aussi un procédé pratiqué depuis la nuit des temps en exposant, traditionnellement, les produits humides à sécher au vent et au soleil. Sécher des fruits ou des légumes est une opération très délicate ; par exemple : il faut penser à la destruction des vitamines sensibles aux rayons ultra-violet. La demande des produits agro-alimentaires est devenue, de nos jours, assez considérable en quantité et en qualité durant les douze mois de l'année. Les développements de la science et de la technologie doivent répondre aux besoins de l'Homme contemporain. Des tonnes et des tonnes de fruits et légumes sont séchées en si peu de temps et avec une qualité optimale du produit et cela par des méthodes diverses de séchage industriel.

NOMENCLATURE

Principales notations

A	Taux de surface de contact	[m ² / m ³]
C_p	Chaleur massique	[J / Kg.K]
H	Chaleur latente de vaporisation	[J / Kg]
M_{eq}	Contenu d'humidité d'équilibre/Kg de matière sèche	[Kg H ₂ O/ Kg]
R_g	Constante universelle des gaz	[J/mol K]
v	Vitesse de l'air	[m/s]
α	Coefficient d'échange de chaleur par convection	[W/m ² K]
ε	Porosité	[/]
ρ	Masse volumique	[Kg / m ³]

Indices

a : Air	e : Eau	eq : Équilibre
o : Initiale	s : Solide	v : Vapeur

2. POSITION DU PROBLÈME

2.1 Modèle mathématique

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 [1]. L'analyse théorique du séchage du lit statique mène à un ensemble d'équations aux dérivées partielles (EDP):

✓ 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):

$$\rho_a (C_{p_a} + W \cdot C_{p_v}) \left(\varepsilon \frac{\partial T_a}{\partial t} + v \frac{\partial T_a}{\partial x} \right) = A_1 \cdot \alpha (T_s - T_a) - (1-\varepsilon) \rho_s \cdot C_{p_v} (T_s - T_a) \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2)$$

✓ Le bilan enthalpique pour le solide (figues):

$$(1-\varepsilon) \cdot \rho_s (C_{p_s} + M \cdot C_{p_c}) \frac{\partial T_s}{\partial t} = A_1 \cdot \alpha (T_a - T_s) + H \cdot \rho_s (1-\varepsilon) \frac{\partial M}{\partial t} \quad (3)$$

Le résultat est un système EDP à quatre inconnues (les fonctions macroscopiques : La température de l'air T_a , celle du solide T_s , l'humidité absolue de l'air W et la teneur en eau M) et deux variables (l'espace x et le temps t) ; les équations au nombre de trois sont complétées par une quatrième : celle de la cinétique de séchage (K étant la constante de séchage) : [2]

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

2.2 Hypothèses sur le modèle

- On néglige, d'après [1,3, 4, 5,6], le tassement des couches du produit, la conduction entre les figues et les échanges par conduction et par rayonnement devant ceux par convection.
- Le problème étudié est unidimensionnel (ne fait intervenir que l'abscisse mesurée dans le sens de l'écoulement de l'air) et les parois du séchoir sont adiabatiques et imperméables.

2.3 Calculs des constantes de séchage

Le modèle de HENDERSON et PABIS est choisi pour l'étude de la cinétique [2, 7,8], il présente une très bonne concordance avec les résultats expérimentaux [2, 6,7].

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

L'influence des conditions de séchage des figues sur les constantes de séchage a été étudiée en utilisant le modèle précédent [2]. Plusieurs essais de séchage ont été effectués dans un séchoir tunnel d'échelle de laboratoire, en effet les valeurs du coefficient **K** sont approximées par l'équation simple de type Arrhenius dont la forme est :

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

t est le temps exprimé en [h] et **KO** est un coefficient donné, en fonction de la vitesse de l'air par:

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

Et **E_a** l'énergie d'activation en [KJ / mol] donnée, toujours, en fonction de **v** par:

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

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

$$A = \left(0.000104 \cdot T_a^2 - 0.012291 \cdot T_a + 0.256909 \right) \cdot v^2 + \left(-0.000203 \cdot T_a^2 + 0.021976 \cdot T_a - 0.302885 \right) \cdot v + \left(0.000059 \cdot T_a^2 - 0.002967 \cdot T_a + 0.765417 \right) \quad (9)$$

M_{eq} est calculé à partir de l'équation de HENDERSON donnée, d'après [6], par :

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

3. COURBE DE SÉCHAGE (CINÉTIQUE)

La vraie traduction du séchage de nos figues, mises en couche épaisse, est la diminution de la teneur en eau dans le temps, qui est très claire sur la courbe de la figure 1.

Cette dernière ne permet de distinguer qu'une seule phase de séchage: la phase de séchage à vitesse décroissante caractérisée par une inclinaison décroissante où la tangente n'est pas constante.

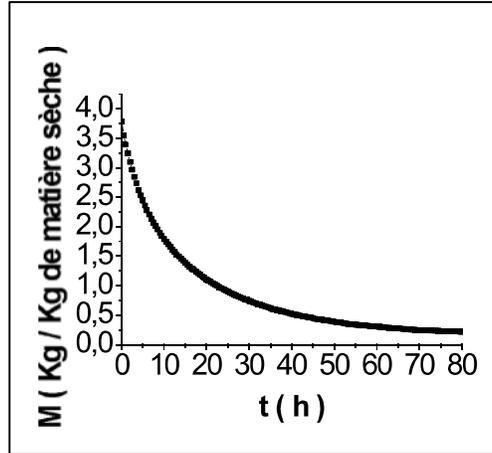


Figure 1: VARIATION DE LA TENEUR EN EAU DES FIGUES EN FONCTION DU TEMPS AU MILIEU DE LA COUCHE. (T_a = 343 K ; φ = 16 % ; v = 0.52 m/s)

4. EFFET DES CONDITIONS EXTÉRIEURES SUR LE SÉCHAGE

L'étude paramétrique consiste à faire varier des paramètres et de voir leur influence sur le modèle.

4.1. Effet de la température de l'air asséchant

La figure 2 montre que la température de l'air asséchant est un paramètre influent dans le séchage, comme c'est le cas d'ailleurs dans les travaux de [2, 6,8] où les résultats sont très similaires.

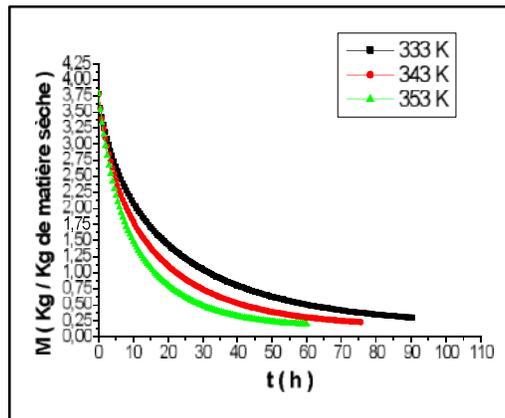


Figure 2: EFFET DE LA TEMPERATURE DE L'AIR ASSECHANT SUR LA TENEUR EN EAU DES FIGUE (v = 0.52 m/s ; Phi = 0.16 ; x = 0.12 m)

En effet, l'augmentation de ce paramètre 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 ; le temps de séchage pour $T_a = 333 \text{ K}$ est **90 h** alors qu'il est de **60 h** pour $T_a = 353 \text{ K}$.

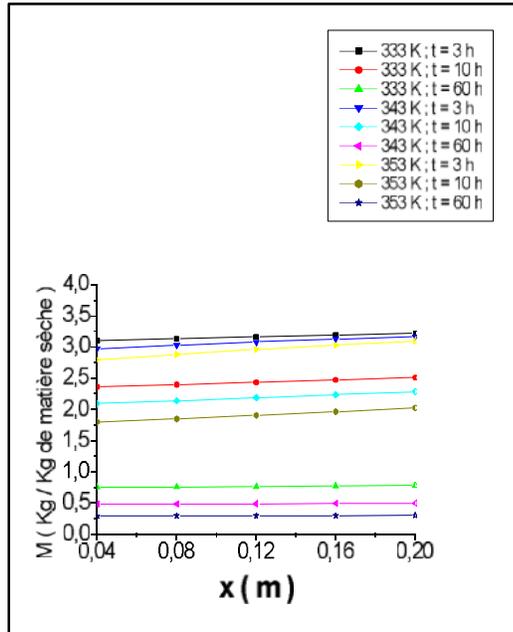


Figure 3: EFFET DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR ASSÉCHANT SUR LA TENEUR EN EAU DES FIGUES (à travers la couche épaisse)

Sur la figure 3, la variation de la teneur en eau du produit en montant à travers la couche épaisse pour les trois températures différentes de l'air asséchant (le temps étant fixé), permet de voir l'effet de ce paramètre sur la teneur en eau du produit. L'allure des courbes (pentes étant positives) montrent d'une part, la proportionnalité de la teneur en eau du produit avec la hauteur et l'inverse, bien sur, pour la quantité d'eau évaporée; et d'autre part, l'inverse proportionnalité de M avec la température de l'air asséchant (pour le même temps t et la même hauteur x) mais l'inverse pour la quantité d'eau évaporée. La chose qui éclaircie l'effet de la température sur la cinétique de séchage est que, pour un T_a plus élevé, l'air prend plus d'humidité d'une hauteur à une autre (en mouvement ascendant); 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 (voir les courbes à $t = 3 \text{ h}$), ensuite l'effet de la température est visible pour les dernières couches (par exemple à $t = 10 \text{ h}$) car les premières couches commencent à prendre moins d'énergie et par conséquent plus

d'énergie est cédée cette fois ci aux dernières couches.

4.2. Effet de la vitesse de l'air asséchant

La figure 4, 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.

La figure 5, représente la variation de la teneur en eau du produit en montant à travers la couche épaisse pour trois vitesses différentes de l'air asséchant (le temps étant fixé), ce qui permet de voir encore mieux l'effet de ce paramètre sur la teneur en eau du produit.

Contrairement à la température, sur la figure 5, l'effet de la vitesse de l'air asséchant apparaît au début du séchage même pour les dernières couches. Ceci est très visible sur les dernières courbes de la figure 5 pour $t = 60 \text{ h}$ qui sont très rapprochées surtout celles de 0.52 m/s et 0.62 m/s : On peut dire que la vitesse de l'air asséchant n'est pas un paramètre aussi influent que sa température. Ce résultat est en très bonne concordance avec les résultats des travaux de [2, 7,9].

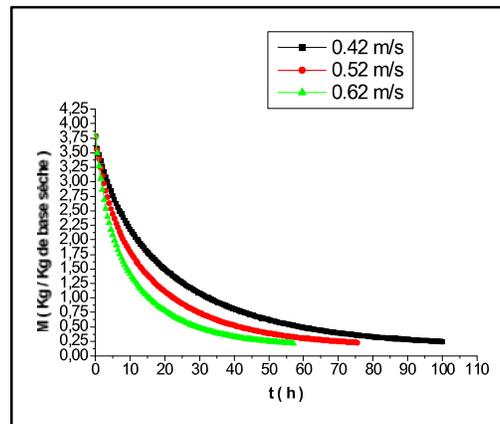


Figure 4: EFFET DE LA VITESSE DE L'AIR ASSÉCHANT SUR LA TENEUR EN EAU DES FIGUES. ($T_a = 343 \text{ K}$; $\phi = 16 \%$; $x = 0.12 \text{ m}$)

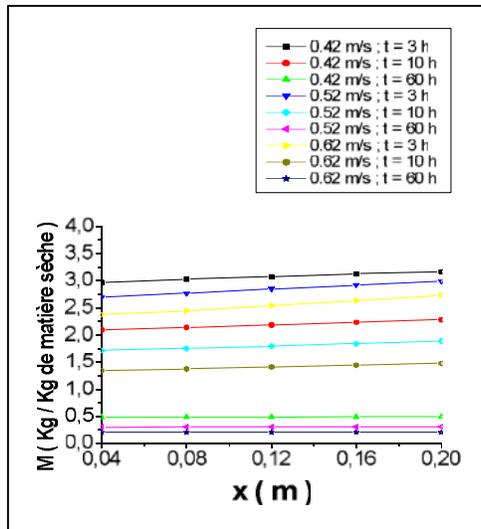


Figure 5: EFFET DE LA VITESSE DE L'AIR ASSÉCHANT SUR LA TENUEUR EN EAU 1 FIGUES (à travers la couche épaisse pour temps différents)

5 CONCLUSION

L'étude de la cinétique du produit choisi dans ce travail, a permis d'arriver à des résultats similaires à ceux trouvés par plusieurs travaux antérieurs sur les fruits et légumes en particulier les figues. Parmi ces résultats : L'absence de la phase constante de séchage, processus qui s'est déroulé dans la période de chute de taux d'une part et la mise en évidence de l'effet du changement des conditions extérieures d'autre part, en effet par l'augmentation de la température, augmentent les quantités d'eau à évaporer dans le produit humide surtout pour les premières couches, tandis que 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; mais il reste toujours à constater que la vitesse de l'air est un paramètre peu influent en le comparant à sa température.

6. REMERCIEMENTS

Nous remercions le comité d'organisation ainsi que le comité scientifique du CNPA'2008 d'avoir accepté notre participation à ce congrès.

7. RÉFÉRENCES

[1] ARNAUD G. and FOHR J. - P, Slow drying simulation in thick layers of granular product, Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 31, No. 12, pp. 2517 – 2526 (1988).

- [2] STAMATIOS J. BABALIS et VASSILIOS G. BELESSIOTIS. , Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of fig, Journal of Food Engineering 65 (2004) 449– 458.
- [3] RATTI C. and MUJUMDAR A S., Simulation of packed bed drying of foodstuffs with airflow reversal, Journal of Food Engineering 26 (1995) 259 – 271.
- [4] BENNAMOUN L. , Contribution à l'étude des transferts couplés avec changement de phase dans un milieu poreux. Influence des conditions d'air sur les cinétiques de séchage et le comportement global d'un séchoir solaire Thèse de Doctorat – Université de Mentouri (Constantine)-Faculté des Sciences de l'ingénieur – Département de Génie climatique (2006)
- [5] DAGUENET M. , Les séchoirs solaires: théorie et pratique, UNESCO (1985).
- [6] EL- SEBAII A. A., ABOUL-ENEIN S., RAMADAN M. R. I. and EL- GOHARY H. G. Empirical correlation for drying kinetics of some fruits and vegetables, Energy 27 pp. 845 – 859 (2002)
- [7] BABALIS S. J., PAPANICOLAOU E., KYRIAKIS N. and BELESSIOTIS V. G. "Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*), Journal of Food Engineering 75 (2006) 205 – 214.
- [8] AZZOZ S., GUIZANI A., JOMAA W. and BELGHITH A. ,Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes", Journal of Food Engineering 55 (2002) 323–330.
- [9] CHAUHAN P. M., CHOUDHURY C. and GARG H. P. ,Comparative performance of coriander dryer coupled to solar air heater and solar air – heater – cum – rockbed storage, Applied Thermal Engineering Vol. 16 , pp. 475 – 486 (1996).