

# CINETIQUES ET MODELISATION MATHEMATIQUE DU SECHAGE SOLAIRE CONVECTIF DE FEUILLES D'OLIVIER D'ORIGINE TUNISIENNE

N. BAHLOUL\*<sup>(1)</sup>, N. BOUDHRIOUA<sup>(1)</sup>, M. KOUHILA<sup>(2)</sup>, N. KECHAOU<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Groupe de Recherche en Génie des Procédés Agro-alimentaires  
Unité de Recherche en Mécanique des Fluides Appliquée et Modélisation  
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, BP 1173, 3038, Sfax, Tunisie

<sup>(2)</sup> Laboratoire d'Energie Solaire et des Plantes Aromatiques et Médicinales  
Ecole Normale Supérieure, BP 2400, Marrakech, Maroc

Tél : 00216 74274084, Fax 00216 74275595

E-mails: [neilabahloul@yahoo.com](mailto:neilabahloul@yahoo.com)\*, [nourhene.Boudhrioua@fss.rnu.tn](mailto:nourhene.Boudhrioua@fss.rnu.tn), [nabil.kechaou@enis.rnu.tn](mailto:nabil.kechaou@enis.rnu.tn)

## RESUME

Ce présent travail présente une étude du séchage solaire convectif de quatre variétés de feuilles d'olivier, connues pour leurs effets thérapeutiques et médicinaux intéressants. Les feuilles d'olivier sont déshydratées sous différentes conditions d'air de séchage, à des températures de 40, 50 et 60°C et des débits d'air de séchage 0,027 et 0,055 m<sup>3</sup>/s. La température de l'air de séchage est le facteur essentiel influençant les cinétiques et le temps de séchage. De plus, la feuille d'olivier constitue un produit qui présente uniquement la période de séchage à vitesse décroissante (la phase II) comme c'est le cas de plusieurs produits agroalimentaires. Pour la modélisation des cinétiques de séchage des feuilles d'olivier, sept modèles mathématiques de séchage en couche mince ont été testés. Le modèle logarithmique a donné la meilleure description des données expérimentales.

## 1. INTRODUCTION

Les feuilles d'olivier (*Olea europaea* L.) sont utilisées depuis longtemps en phytothérapie humaine pour traiter l'hypertension [1] et l'hyperglycémie [2]. Les feuilles d'olivier sont souvent utilisées sous forme d'infusion, de décoction ou de gélules contenant la poudre des feuilles. Ces feuilles sont généralement déshydratées avant utilisation pour réduire leurs teneurs en eau. La teneur en eau d'une plante médicinale en général doit être diminuée rapidement pour la conserver. Si elle n'est pas séchée aussitôt après récolte, une plante fraîche s'altère rapidement.

Le séchage naturel à l'air libre des plantes médicinales fraîches est une technique de conservation traditionnelle très ancienne. La plante sèche obtenue est souvent infectée par contamination des insectes, des poussières et soumise aux intempéries pendant le séchage traditionnel [3]. Une alternative possible consiste à utiliser des séchoirs solaires indirects qui permettent de contrôler les conditions de l'air de séchage et assurent une meilleure qualité du produit séché, un gain de temps et une faible consommation d'énergie. Le séchage solaire paraît comme une technique incontournable surtout pour les pays en voie de développement, pauvres en ressources énergétiques conventionnelles [4].

De nombreux modèles mathématiques empiriques ont été élaborés pour décrire les cinétiques de séchage solaire en couche mince des produits végétaux tels que les dattes [5], l'*Eucalyptus globulus*, la menthe, la verveine, et la sauge [6].

Les objectifs de cette étude consistent à étudier les caractéristiques du séchage solaire convectif de quatre variétés de feuilles d'olivier et lisser les courbes de séchage de chaque variété étudiée à l'aide de sept modèles mathématiques pour choisir le meilleur modèle permettant de décrire les courbes expérimentales.

## 2. MATERIEL ET METHODES

### 2.1 Matériel végétal

Les feuilles d'olivier utilisées pour le séchage solaire convectif sont cueillies d'oliviers cultivées dans une parcelle de l'Institut de l'Olivier de Sfax (Tunisie) pendant le mois de mars 2007. Quatre variétés sont sélectionnées pour cette étude : Chemlali (CL), Chemchali (CH), Chétoui (CT) et Zarrazi (ZR).

### 2.2 Détermination de la teneur en eau

La teneur en eau initiale de chaque échantillon (exprimée en kg / kg M.S.) est mesurée par déshydratation des feuilles d'oliviers fraîches (~5g) dans une étuve et à une température de  $105 \pm 1^\circ\text{C}$  pendant 24 heures. Les mesures sont effectuées en utilisant une balance de type (METTLER-TOLEDO) avec une précision de  $\pm 0,0001$  g.

### 2.3 Équipement de séchage solaire convectif

Le système de séchage utilisé est un séchoir convectif partiellement solaire fonctionnant en convection forcée. Ce séchoir est constitué d'un capteur solaire de surface  $2,5 \text{ m}^2$ , permettant le chauffage de l'air de séchage d'une conduite d'aspiration aéraulique, d'une chambre de séchage ayant pour dimensions 1,40 m de hauteur, 0,90 m de profondeur et 0,5 m de largeur et constituée de dix claies.

Un ventilateur centrifuge ( $0,083 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 80 mm CE, 220V), autorise une vitesse théorique de 1,7 m/s, avec en amont un étranglement qui permet de varier le débit d'air de 0,028 à  $0,083 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ce ventilateur a pour puissance 0,1 kW. Un système de chauffage constitué de résistances électriques de puissance 4 kW joue le rôle de source auxiliaire d'énergie.

### 2.4 Les expériences de séchage

Les expériences de séchage sont menées dans différentes conditions, pour trois températures (40, 50 et  $60^\circ\text{C}$ ) et deux débits d'air de séchage ( $0,027$  et  $0,055 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Les feuilles d'oliviers sont pesées et réparties en couche mince sur des claies en plastique de la chambre de séchage. Afin d'assurer une meilleure stabilité des conditions de séchage et une homogénéisation de la température à l'intérieur du séchoir, l'ensemble de l'appareillage doit fonctionner au moins une demi-heure avant l'introduction de la claie chargée dans la chambre de séchage. Les teneurs en eau des échantillons de feuilles frais sont déterminées avant d'être uniformément répartis sur la première claie de la chambre de séchage. La pesée des feuilles séchées est effectuée à l'extérieur du séchoir. L'intervalle de temps entre deux pesées successives est de 20 min au début de l'expérience et atteint 40 min à la fin. L'expérience de séchage est arrêtée lorsque la teneur en eau des feuilles atteint  $0,1 \text{ kg} / \text{kg M.S.}$

## 2.5 Lissage des courbes de séchage des feuilles d'olivier

Pour le lissage des cinétiques de séchage, sept équations empiriques de séchage et présentes dans la littérature sont testées pour sélectionner le meilleur modèle décrivant le séchage des feuilles d'olivier (Tableau 1).

Tableau 1: Les modèles mathématiques appliqués aux courbes expérimentales de séchage (a, b, c, k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub> et n sont les constantes des modèles).

Nom du modèle	Modèle
Page [7]	MR= exp(-kt <sup>n</sup> )
Henderson and Pabis [8]	MR= a exp(-kt)
Newton [9]	MR= exp(-kt)
Logarithmic [10]	MR= a exp(-kt) +c
Wang and Singh [11]	MR= 1+ at+bt <sup>2</sup>
Two-term [12]	MR= a exp(-k <sub>0</sub> t) + b exp(-k <sub>1</sub> t)
Two-term exponential [13]	MR= a exp(-kt) + (1-a) exp(-kat)

La teneur en eau réduite est calculée par l'Equation (1) :

$$XR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

où X<sub>t</sub>, X<sub>0</sub>, X<sub>e</sub>, XR sont respectivement les teneurs en eau à chaque instant de séchage, la teneur en eau initiale, la teneur en eau à l'équilibre (en kg/kg M.S.) et la teneur en eau réduite. Les teneurs en eau à l'équilibre (X<sub>e</sub>) sont déterminées à partir des isothermes de désorption des feuilles d'olivier [14], [15].

## 2.6 Analyse statistique

Trois critères statistiques sont utilisés pour la sélection du meilleur modèle mathématique permettant de décrire les cinétiques de séchage solaire des feuilles d'olivier : le coefficient de corrélation (r), l'erreur standard (ES) et le pourcentage d'erreur relatif (P).

La méthode d'optimisation non linéaire Marquardt-Levenberg, par le logiciel Curve Expert 3.1, est utilisée pour choisir la meilleure équation décrivant les courbes de séchage des feuilles d'olivier ainsi que pour déterminer les constantes de chaque modèle.

## 3. RESULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 Influence des conditions de l'air de séchage

Les feuilles d'olivier ont été séchées par un séchoir solaire convectif dans différentes conditions de températures (40, 50 et 60°C) et de débits d'air de séchage (0,027 et 0,055 m<sup>3</sup>/s). Les

teneurs en eau initiales des variétés de feuilles d'olivier Chemlali (CL), Chemchali (CH), Chétoui (CT) et Zarrazi (ZR) sont respectivement 0,941, 0,912, 0,918 et 0,837 kg/kg M.S. Ces teneurs sont réduites à une teneur en eau finale de 0,10 kg/kg M.S.

La variation des teneurs en eau réduite en fonction du temps de séchage des quatre variétés de feuilles d'olivier à différentes conditions de séchage est présentée sur la Figure 1.

Les résultats expérimentaux prouvent que la température de l'air de séchage est un facteur important qui influence les cinétiques de séchage des feuilles. En effet, une augmentation de ce paramètre entraîne une accélération du processus de séchage qui se traduit par la diminution du temps de séchage à un débit d'air constant. Pour la variété Chemlali par exemple, le temps de séchage nécessaire pour réduire la teneur en eau à 0,10 kg/kg M.S. est de 460, 370, et 160 min à 40, 50, 60°C, respectivement pour le cas où le débit d'air est de 0,027 m<sup>3</sup>/s. Pour le débit 0,055 m<sup>3</sup>/s, il est de 400, 300 et 100 min à 40, 50, 60°C, respectivement. Le temps nécessaire pour réduire la teneur en eau réduite à un certain niveau dépend généralement des conditions de l'air de séchage. Le temps de séchage le plus élevé est obtenu pour la condition 40°C et 0,027 m<sup>3</sup>/s.

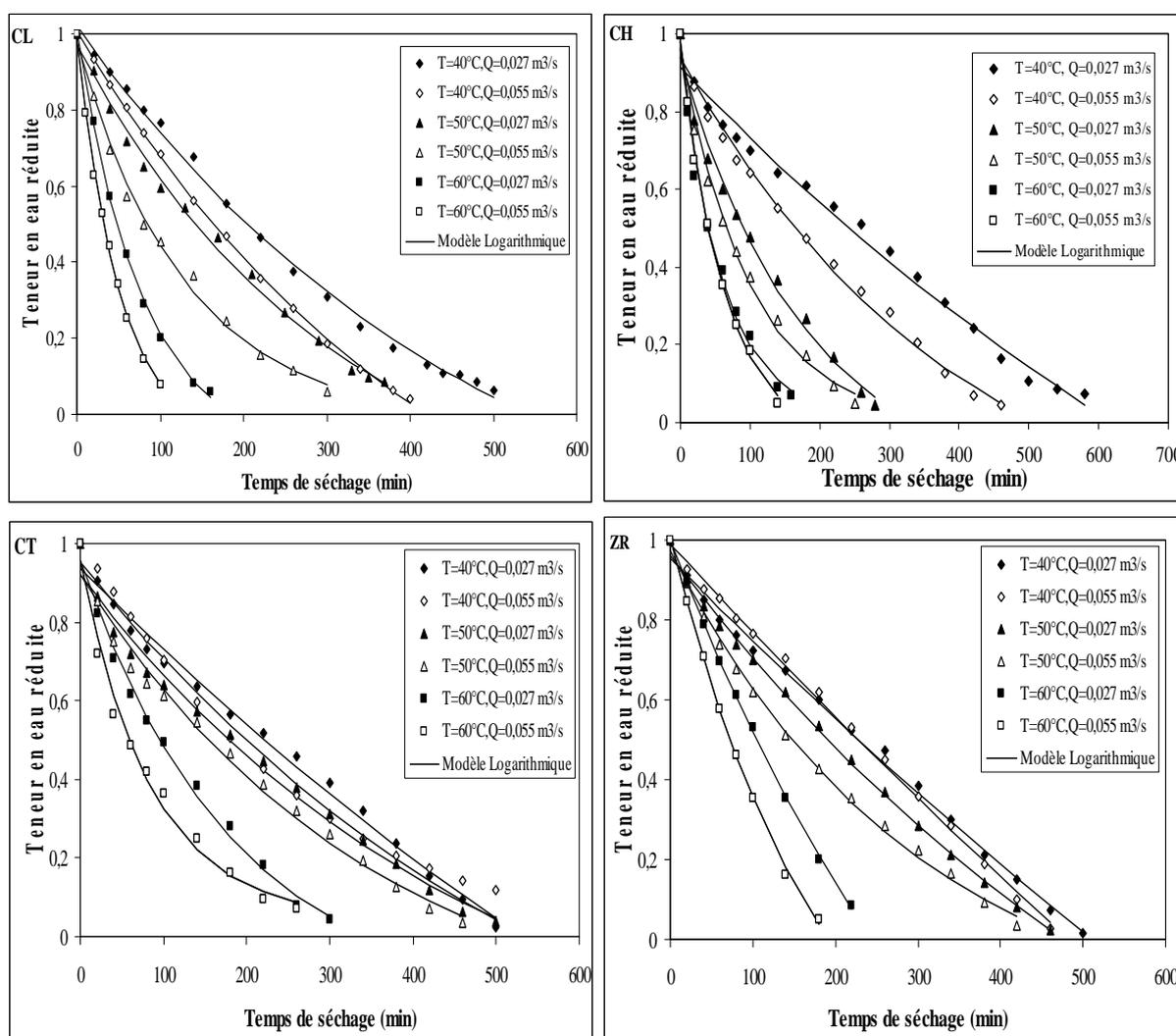


Figure 1. Comparaison entre les données expérimentales et calculées (en utilisant le modèle Logarithmique) des courbes de séchage solaire des feuilles d'olivier pour les températures 40, 50 et 60°C et les débits d'air de séchage 0,027 et 0,055 m<sup>3</sup>/s.

Les courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau réduite (données non présentées) indiquent que la feuille d'olivier est un produit qui ne présente pas de période de séchage à vitesse constante (absence de la phase 0 et I) mais présente uniquement la période de séchage à vitesse décroissante (la phase II) [16]. Bimbenet et al. (1984) [17] ont rapporté également que la période de séchage à vitesse constante n'est pas observée pour plusieurs produits biologiques.

### 3.2 Lissage des courbes de séchage des feuilles d'olivier

Parmi les sept modèles mathématiques de séchage en couche mince, c'est le modèle logarithmique qui présente le meilleur lissage des courbes expérimentales de séchage des quatre variétés de feuilles, en donnant les plus grandes valeurs de  $r$  et les plus petites valeurs de  $ES$  et de  $P$  pour toutes les conditions expérimentales de séchage. Les valeurs de  $r$ ,  $ES$  et  $P$  de ce modèle varient respectivement de 0,9934 à 0,9997, de 0,0073 à 0,0373 et de 1,9723 à 10,383. Le modèle logarithmique est également appliqué pour exprimer les cinétiques de séchage d'autres produits agricoles comme le grignon d'olives [18] et les feuilles de menthe [19].

## 4. CONCLUSIONS

Dans ce travail, les cinétiques de séchage solaire convectif indirect de quatre variétés de feuilles d'olivier sont étudiées. La température de l'air de séchage a présenté un effet considérable sur les cinétiques et le temps de séchage. La feuille d'olivier est un produit qui présente uniquement la période de séchage à vitesse décroissante (la phase II) comme c'est le cas pour plusieurs produits biologiques. Sept modèles mathématiques de séchage en couche mince ont été testés pour l'expression des cinétiques de séchage des feuilles d'olivier. Le modèle logarithmique a donné la meilleure description des données expérimentales.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. Zarzuelo, 1991, Vasodilator effect of olive leaf. *Planta Medica*, 57, 417-419.
- [2] M. Gonzalez, A. Zarzuelo, M.J. Ganez, M.P. Utrilla, J. Jimenez, I. Osuna, 1992, Hypoglycemic activity of olive leaf. *Planta Medica*, 58, 513-515.
- [3] I. Doymaz, 2006, Thin layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, 74, 370-375.
- [4] A. Mujumdar, 1995, Handbook of industrial drying. Second edition. Volume 1. Marcel Dekker. New York. pp 118-119.
- [5] N. Kechaou, M. Maâlej, 2000, A simplified model for determination of moisture diffusivity of date from experimental drying curves. *Drying Technology*, 18, 1109-1125.
- [6] M. Kouhila, 2001, Etude expérimentale et théorique de cinétiques de séchage convectif partiellement solaire des plantes médicinales et aromatiques (menthe, verveine, sauge et eucalyptus de la région de Marrakech. Thèse de doctorat à la faculté des sciences Semlalia Marrakech, Maroc.
- [7] G.E. Page, 1949, Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M.S. Thesis. Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue, USA.

- [8] S.M. Henderson, S. Pabis, 1961, Grain drying theory II. Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169–174.
- [9] J.R. O’Callaghan, D.J. Menzies, P.H. Bailey, 1971, Digital simulation of agricultural dryer performance. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 16, 223–244.
- [10] I.T. Togrul, D. Pehlivan, , 2002, Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55, 209-216.
- [11] C. Y. Wang, R. P. Singh, 1978, Use of variable equilibrium moisture content in modelling rice drying. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 11, 668–672.
- [12] S.M. Henderson, 1974, Progress in developing the thin layer drying equation. *Trans. Am. Soc. Agr. Eng.*, 17, 1167–1168.
- [13] Y.I. Sharaf-Elden, J.L. Blaisdell, M.Y. Hamdy, 1980, A model for ear corn drying. *Trans. Am. Soc. Agr. Eng.*, 5, 1261–1265.
- [14] N. Bahloul, N. Boudhrioua, N. Kechaou, 2008, Moisture desorption-adsorption isotherms and isosteric heats of sorption of Tunisian olive leaves (*Olea europaea* L.), *Journal of Industrial Crops and Products*, 28, 162–176.
- [15] N. Boudhrioua, N. Bahloul, M. Kouhila, N. Kechaou, 2008. Sorptions isotherms and isosteric heats of sorption of olive leaves (chemlali variety): experimental and mathematical investigations, *Food and Bioproduct Processing*, 86, 167–175.
- [16] N. Bahloul, N. Boudhrioua, M. Kouhila, N. Kechaou, 2008. Modelling of thin layer drying of tunisian olive leaves in a convective solar drying. 16<sup>th</sup> International Drying Symposium 2008, Hyderabad, India.
- [17] J.J. Bimbenet, J.D. Daudin, E. Wolf, 1984. Air drying kinetics of biological particles. In: *Proceedings of the Fourth International Drying Symposium 1984, Kyoto.*
- [18] N. A. Akgun, I. Doymaz, 2005. Modelling of olive cake thin layer drying process. *Journal of Food Engineering*, 68, 455–461.
- [19] I. Doymaz, 2006. Thin layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, 74, 370–375.