

ETUDE EXPERIMENTALE ET MODELISATION EMPIRIQUE DU SECHAGE CONVECTIF D'UN PRODUIT AGROALIMENTAIRE

M.TOUJANI*, L.HASSINI, S.AZZOUZ, A.BELGHITH

Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique,

Département de Physique, Faculté des Sciences de Tunis,

Manar II 2092, TUNISIE

E-mail : touj_mohsen@yahoo.fr

Résumé : Ce travail concerne le séchage convectif d'une mono-couche de morceaux de pomme de type 'Golden'. En effet, les cinétiques de séchage à différentes conditions opératoires (température, vitesse de l'air et épaisseur des échantillons) ont été soigneusement déterminées. La courbe caractéristique de séchage a été établie et lissée par une équation polynomiale de degré 3, valable sur toute la gamme des conditions de séchage utilisées. En se référant, aux modèles semi-empiriques de la littérature, celui décrivant au mieux les cinétiques de séchage a été sélectionné. Les critères de choix étaient le coefficient de corrélation et la moyenne des carrés des écarts entre les données expérimentales et calculées.

Mots clés : séchage convectif, pomme, courbe caractéristique de séchage, modélisation empirique,

Nomenclature

| | | |
|------------------|---|---------------------------|
| a, b, c, k, n, L | coefficients des modèles | (-) |
| f | vitesse de séchage réduite | (-) |
| M | masse du produit | (kg) |
| N | nombre d'observations | (-) |
| R^2 | coefficient de détermination | (-) |
| T | température | (°C ou K) |
| t | temps | (s) |
| V | vitesse | (m/s) |
| X | teneur en eau | (kg eau/kg matière sèche) |
| XR | teneur en eau réduite | (-) |
| z | nombre des constantes | (-) |
| χ^2 | moyenne des carrés des écarts entre les données expérimentales et calculées (-) | |

1. INTRODUCTION

Tout procédé de séchage doit tenir compte de la nature et des caractéristiques spécifiques des produits à sécher, et obéir à certains critères et contraintes tels que la qualité du produit, le coût énergétique et la cadence de la production. Ainsi, des études scientifiques ont été menées afin d'optimiser les conditions opératoires, de concevoir de nouvelles techniques de séchage et d'améliorer les méthodes déjà existantes [1], [2].

L'objectif de ce travail, est l'étude du séchage de la pomme, sous forme de morceaux, par convection forcée, dans une soufflerie climatique. Cette étude s'articule autour de deux approches: La première est d'ordre expérimental, basée sur la détermination des cinétiques de séchage d'une mono-couche de morceaux de pomme, sous différentes conditions opératoires ainsi que l'établissement de la courbe caractéristique de séchage qui en résulte.

La seconde approche, est d'ordre semi-théorique, consiste à modéliser l'opération de séchage, en sélectionnant, parmi les différents modèles semi-théoriques de la littérature, le modèle permettant de décrire le comportement hydrique d'une mono-couche de morceaux de pomme lors du procédé.

2. MATERIEL ET METHODE

L'unité de séchage utilisée, est une soufflerie climatique disponible dans le laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique de la Faculté des sciences de Tunis (figure.1). Les principaux éléments de cette soufflerie sont : un ventilateur centrifuge aspirant l'air ambiant, des batteries de chauffage assurant l'élévation de la température de l'air et une veine d'essai dans lequel on réalise l'opération de séchage. Une balance de haute précision située au dessous du séchoir, permettant de suivre la perte de masse du produit. La température et la vitesse de l'air à l'intérieur de la veine sont ajustées et contrôlées à l'aide d'un système de régulation automatique. L'humidité n'est pas contrôlée, mais elle est déterminée par la mesure de la température sèche et de la température humide de l'air. Lorsque les conditions de consigne sont atteintes, l'ensemble produit plateau support est placé dans la veine pour subir l'opération de séchage.

Le produit ayant fait l'objet de cette étude, est la pomme type 'Golden'. Avant de démarrer l'opération de séchage, le produit est lavé à l'eau du robinet, découpé en morceaux parallélépipédiques (dimensions initiales en mm : 35x12x12 et 35x12x7). Ensuite, les échantillons sont blanchis dans l'eau chaude, afin de réduire les réactions d'oxydation et d'éviter le brunissement du produit à sécher. Enfin, les échantillons sont disposés sur une grille perforée sous forme d'une couche mince.

Afin de déterminer la masse sèche (m_s), le produit séché est placé dans une étuve réglée à 90°C durant 12 heures jusqu'à ce qu'il atteigne sa déshydratation maximale [3]. Au cours du séchage, la teneur en eau base sèche est calculée à l'aide de la relation :

$$X(t) = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \quad (1)$$

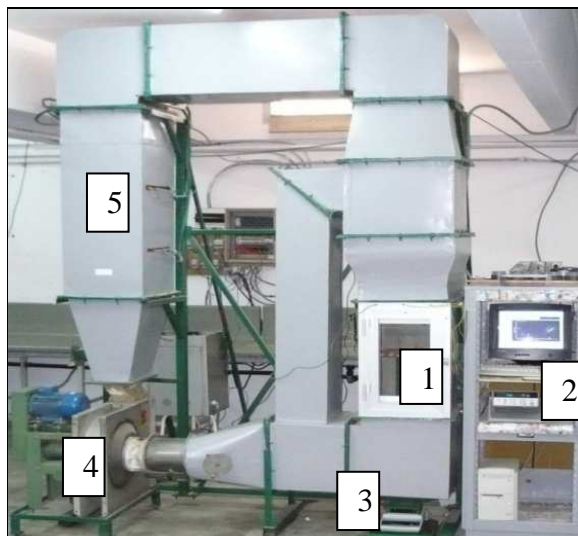


Figure.1 : Soufflerie de séchage du LETTM : 1-veine d'essai ; 2-système d'acquisition ; 3-balance ; 4-ventilateur ; 5-batteries de chauffage

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Courbes de cinétiques de séchage

La figure 2 présente l'évolution temporelle de la teneur en eau moyenne du produit, pour différentes températures de séchage. On remarque que, l'accroissement de la température entraîne toujours une diminution de la durée de séchage. Ceci résulte d'une part, de l'augmentation du flux de chaleur apporté par l'air au produit, et d'autre part, de l'accélération de la migration interne de l'eau. Ce résultat est analogue à celui trouvé par Ozdemir et al. (1999) pour la noisette [4], Akpinar et al. (2003) dans le cas du poivron rouge [5] et Lahsasni et al. (2004) pour la peau de figue de Barbarie [6].

D'après la figure 3, on constate que la vitesse de l'air a une influence significative sur la cinétique de séchage. Toutefois, cette influence devient de plus en plus faible quand le temps de séchage augmente. En effet, il s'agit de la phase à allure décroissante où la diffusion interne de l'eau dans le produit est limitant.

D'après la figure 4, l'épaisseur initiale de l'échantillon a une forte influence sur le temps total de séchage. Ainsi, le temps de séchage d'une mono-couche de morceaux de pomme d'épaisseur initiale 12 mm est pratiquement égal au double du temps relatif à une mono-couche plus mince d'épaisseur 7 mm.

3.2. Courbe caractéristique de séchage

La courbe caractéristique de séchage (CCS), valable sur une gamme de température et de vitesse de l'air donnée, est utilisée pour le dimensionnement des unités de séchage à l'échelle industrielle, sans aborder la physique complexe du phénomène [1], [2]. Le principe d'établissement de cette courbe, consiste à normaliser la teneur en eau et la vitesse de séchage de l'ensemble des données expérimentales, en utilisant la transformation suivante [7] :

$$X \rightarrow XR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (2)$$

$$-\left(\frac{dX}{dt}\right) \rightarrow f = \frac{-\left(\frac{dX}{dt}\right)}{-\left(\frac{dX}{dt}\right)_0} \quad (3)$$

avec X_{eq} est la teneur en eau d'équilibre déterminée à partir de l'isotherme de désorption [2].

D'après nos résultats, la courbe caractéristique de séchage d'une mono-couche de morceaux de pomme de type 'Golden' a été présentée sur la figure 5. Le meilleur lissage de cette courbe, est effectué par une équation polynomiale de degré 3 :

$$f = 0,05296 + 0,67226 XR + 0,02245 XR^2 + 0,25345 XR^3 \quad (4)$$

Cette équation est valable sur une gamme de température de l'air allant de 50 à 80°C et une vitesse de l'air comprise entre 0,5 et 2,0 m/s.

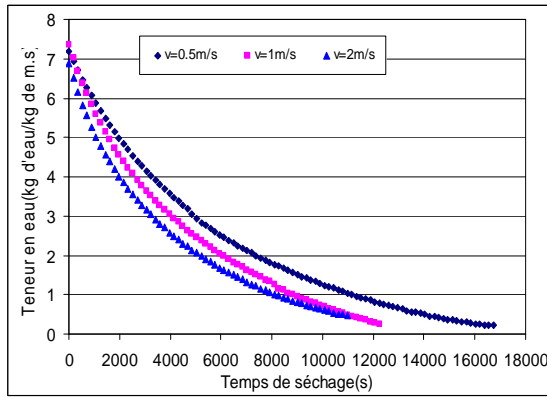


Figure.2: Evolution temporelle de la teneur en eau moyenne d'une mono-couche de morceaux de pomme (v=2 m/s).

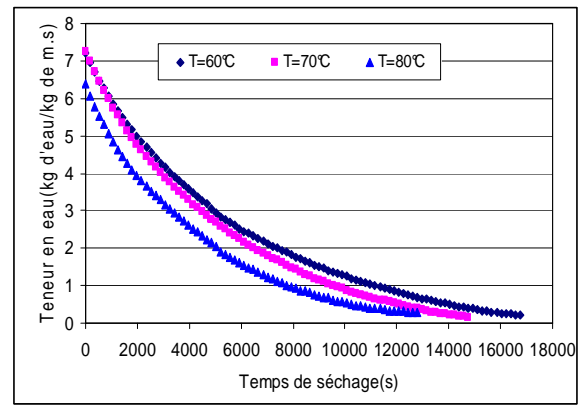


Figure.3: Evolution temporelle de la teneur en eau moyenne d'une mono-couche de morceaux de pomme (T=80°C).

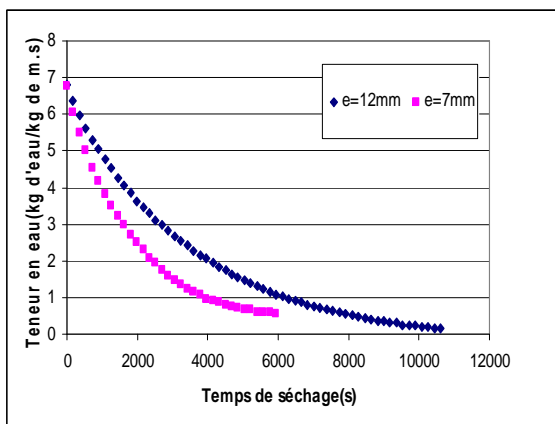


Figure.4 : Effet de l'épaisseur initiale de l'échantillon sur la cinétique de séchage (T=70°C, v=1,5m/s).

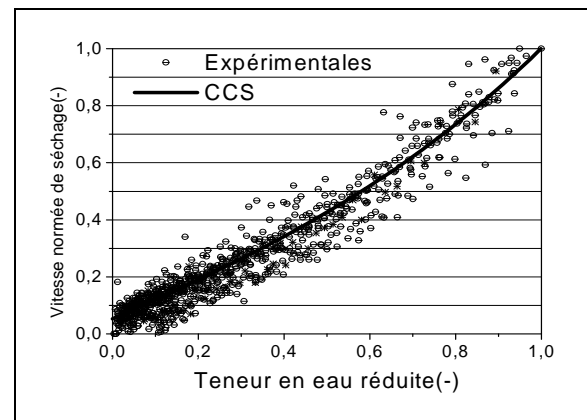


Figure.5 : Courbe caractéristique de séchage d'une mono-couche de morceaux de pomme.

3.3. Modélisation empirique

Afin de modéliser notre procédé de séchage, les modèles semi-empiriques de la littérature, décrits dans le tableau 1, ont été examinés pour choisir le meilleur modèle, décrivant au mieux les cinétiques de séchage expérimentales [5], [6], [8].

Le coefficient de corrélation (R^2) et la moyenne des carrés des écarts entre les données expérimentales et calculées (χ^2) sont les critères utilisés, pour choisir la meilleure équation qui lisse au mieux les cinétiques expérimentales [9]. Plus les valeurs de R^2 sont grandes et plus les valeurs de χ^2 sont petites, plus la qualité du lissage est meilleure [10], [11]. Les expressions mathématiques de ces deux paramètres sont les suivantes:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^n (XR_{i,exp} - XR_{i,pre})^2}{\sum_1^n (\bar{XR} - XR_{i,pre})^2} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_1^n (XR_{i,exp} - XR_{i,pre})^2}{N - z} \quad (6)$$

En considérant un nombre satisfaisant de cinétiques de séchage expérimentales, le modèle de Midilli et al. présente les valeurs de R^2 les plus élevées ($0,99943 \leq R^2 \leq 0,99996$) et les valeurs χ^2 les plus basses ($3,0739 \cdot 10^{-6} \leq \chi^2 \leq 4,0 \cdot 10^{-5}$). D'après ce qui précède, le modèle de Midilli et al. décrit d'une manière satisfaisante, le comportement au séchage convectif d'une mono-couche de morceaux de pomme de type 'Golden'.

Les valeurs expérimentales et calculées de la teneur en eau réduite se sont regroupées autour d'une ligne droite (figure.6). Ceci fait clairement que ce modèle pourrait être employé avec succès pour décrire le comportement hydrique d'une mono-couche de morceaux de pomme au cours du séchage.

| Nom du modèle | Modèle | Références |
|-----------------------------|--|------------|
| Lewis | $XR = \exp(-k.t)$ | [12] |
| Page | $XR = \exp(-k.t^n)$ | [13] |
| Modified Page | $XR = \exp(-k.t^n)$ | [14] |
| Henderson and Pabis | $XR = a.\exp(-k.t)$ | [15] |
| Logarithmic | $XR = a.\exp(-k.t) + c$ | [16] |
| Tow-term model | $XR = a.\exp(-k_0.t) + b.\exp(-k_1.t)$ | [17] |
| Approximation of diffusion | $XR = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-k.a.t)$ | [18] |
| Wang and Singh | $XR = 1 - a.t - b.t^2$ | [19] |
| Simplified Fick's diffusion | $XR = a.\exp(-c.(t/L^2))$ | [20] |
| Modified Page equation-II | $XR = a.\exp(-c.(t/L^2)^n)$ | [21] |
| Midilli et al. | $XR = a.\exp(-k.t^n) + b.t$ | [22] |

Tableau 1: Les modèles semi-empiriques de la littérature.

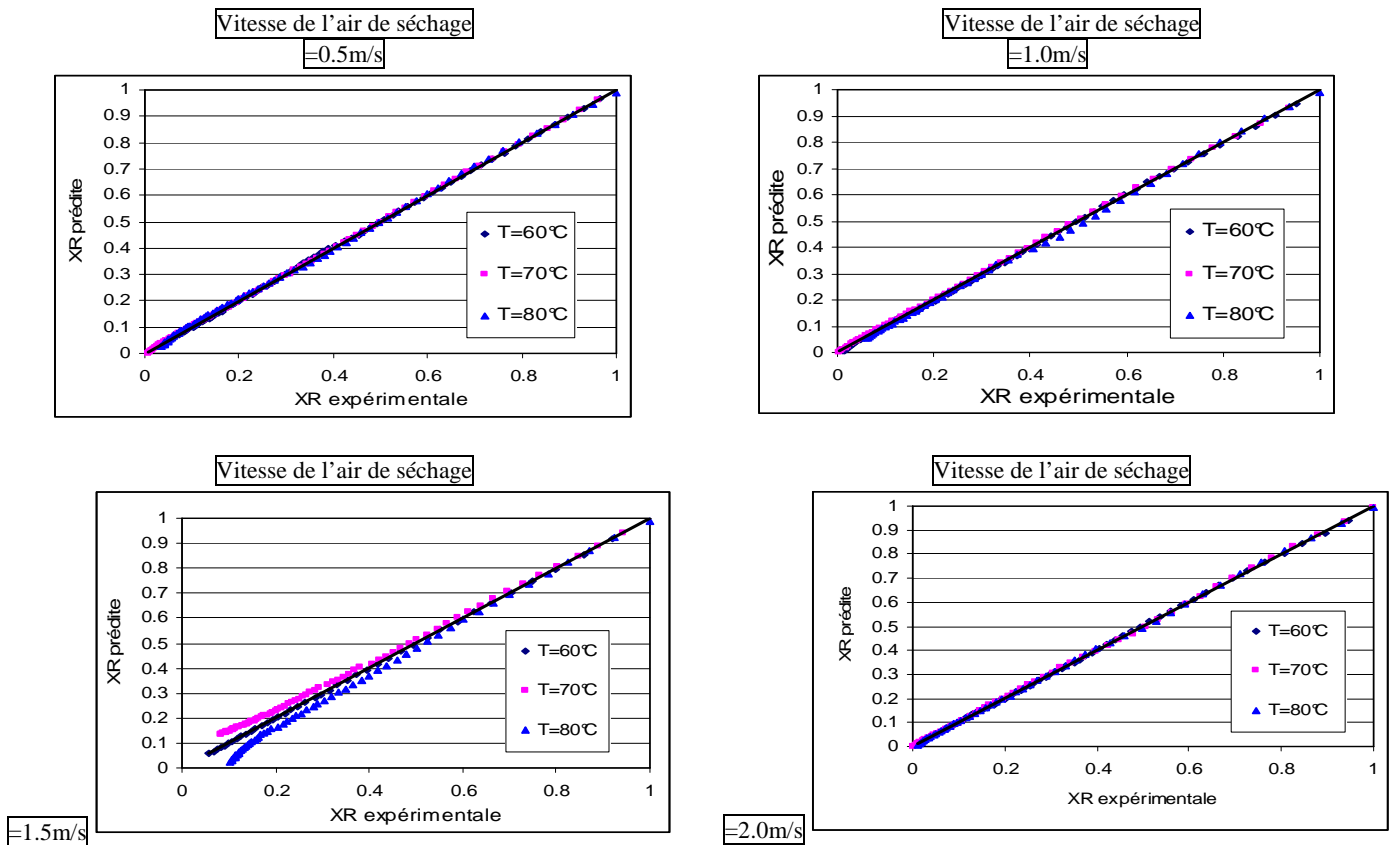


Figure.6 : Valeurs expérimentales et prédites de la teneur en eau réduite pour différentes conditions de séchage.

4. CONCLUSION

Au terme de cette étude, consacrée au séchage d'une monocouche de morceaux de pomme de type 'Golden', il a été trouvé que :

- La température, la vitesse de l'air ainsi que l'épaisseur des morceaux influent considérablement la cinétique de séchage.
- La courbe caractéristique de séchage, est bien représentée par une équation polynômiale de degré 3, valable sur toute la gamme des conditions opératoires utilisées.
- Le modèle de Midilli et al., est le modèle semi-empirique de la littérature, décrivant au mieux les cinétiques de séchage expérimentales.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Kechaou N., 2000, Etude théorique et expérimentale du processus de séchage de produits agroalimentaires, Thèse d'état ès-Science physique, FST de Tunis.
2. Hassini, L. (2007). Transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage convectif d'un produit agro-alimentaire déformable. thèse de doctorat en physique, FST de Tunis.
3. AOAC, (1990). Official methods of analysis. No.934-06. Washington. Association of official chemists.
4. Ozdemir, M., et Devres, Y. O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42, 225–233.
5. Akpinar, E. K., Bicer, Y., & Yeldiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59(1), 99–104.
6. Lahsani, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Idlimam, A., et Jamali, A. (2004). Thin layer convective solar drying of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). *Energy*, 29, 211–224.
7. Van Meel D. A. (1958). Adiabatic convection batch drying with recirculation of air, *Chemical Engineering Science*, Vol. 9, pp. 36-44.
8. Diamante, L. M., Munro, P. A. (1993). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, 51(4), 271–276.
9. Midilli, A., Kucuk, H., (2003). Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*, 44(7), 1111–1122.
10. Ertekin, O. Yaldiz, (2004): drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. : *Journal of food Engineering*.
11. Madamba, P. S., Driscoll, R. H., et Buckle, K. A. (1996). The thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29, 75–97.
12. D.M. Bruce, Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150 °C, *J. Agric. Eng. Res.* 32 (1985) 337–347.
13. G.E. Page, Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers, M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Purdue University, USA, 1949.
14. G.M. White, et al., Fully exposed drying of popcorn, *Trans. ASAE* 24 (1981) 466–468.
15. S.M. Henderson, S. Pabis, Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients, *J. A*
16. I.T. Togrul, D. Pehlivan, Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers, *J. Food Eng.* 55 (2002) 209–216.
17. S.M. Henderson, Progress in developing the thin layer drying equation, *Trans. ASAE* 17 (1974) 1167–1168.
18. Y.I. Sharaf-Elden, et al., A model for ear corn drying, *Trans. ASAE* 5 (1980) 1261–1265.
- 19.20. C.Y. Wang, R.P. Singh, Use of variable equilibrium moisture content in modelling rice drying, *Trans. ASAE* 11 (1978) 668–672. *gric.* 44 (1961) 1111–1122.
- 21.22. L.M. Diamante, P.A. Munro, Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices, *Int. J. Food Sci. Technol.* 26 (1991) 99.