

Modélisation de la cinétique du séchage convectif du grignon d'olive

Smail Meziane

Laboratoire de Chimie Appliquée et Génie Chimique, Faculté des Sciences
Université Mouloud Mammeri, B.P. N°17 RP, Tizi-Ouzou, Algérie

(reçu le 25 Mai 2012 – accepté le 30 Juin 2013)

Résumé - *Le grignon d'olive, résidu solide de l'industrie de l'extraction de l'huile d'olive, est disponible en quantités importantes dans tout le bassin méditerranéen. Son rejet dans la nature constitue une importante source de pollution environnementale. Sa valorisation contribuerait à limiter l'impact de l'industrie oléicole sur l'environnement. Ce travail présente une étude de modélisation du séchage convectif en régime continu du grignon d'olive. L'étude a été conduite dans un séchoir du type tunnel pour cinq températures comprises entre 50 et 90 °C. Les résultats obtenus montrent que la teneur en eau du grignon diminue avec le temps et la température. Le processus de séchage se déroule essentiellement durant la phase de séchage à allure décroissante. Neuf modèles mathématiques ont été utilisés pour décrire la cinétique de séchage en couche mince du grignon d'olive. Les critères d'évaluation de la qualité de lissage des courbes sont le coefficient de détermination (R^2) et, les paramètres statistiques ki-carré réduit (χ^2) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Parmi les modèles examinés, le modèle 'Diffusion Approach' apparaît comme celui qui décrit le mieux le comportement du séchage en régime continu du grignon d'olive dans les conditions expérimentales étudiées.*

Abstract - *The olive pomace, solid waste of olive oil extraction process, is available in large amounts throughout the Mediterranean basin. Released into nature is a major source of environmental pollution. Its valorization would contribute to limit the environment impact of the olive oil industry. This work presents a modeling study of continuous convective drying of olive pomace. The study was conducted in a tunnel type dryer for five temperatures between 50 and 90 °C. The results obtained show that the water content of the pomace decreases with time and temperature. The drying process takes place mainly in the falling rate period. Nine mathematical models were used to describe thin layer drying kinetics of olive pomace. The criteria for assessing the quality of curve fitting are the coefficient of determination (R^2) and, the statistical parameters ki-square reduced (χ^2) and the root mean square error (RMSE). Among the models examined, the model Diffusion Approach appears as that which best describes the continuous drying behavior of olive pomace under the experimental conditions studied.*

Mots clés: Grignon d'olive - Séchage convectif – Modélisation.

1. INTRODUCTION

L'industrie d'extraction de l'huile d'olive a une grande importance économique et sociale pour tous les pays méditerranéens où l'oléiculture est fortement développée. Cependant, cette industrie génère de nombreux problèmes environnementaux inquiétants (pollutions des cours d'eau, nappes phréatiques, sols, etc.) dus à la pollution engendrée par ses deux résidus: l'un liquide (les margines) et l'autre solide (les

grignons) [1, 2]. La valorisation de ces sous-produits contribuerait à limiter l'impact de cette industrie sur l'environnement.

Le grignon d'olive représente environ 25 % des olives traitées. Il est composé de la coque du noyau, réduit en morceaux, de la peau et de la pulpe broyée de l'olive; il contient encore une certaine quantité de matières grasses et une importante quantité d'eau, variable selon la variété des olives et surtout du procédé d'extraction utilisé. Le système discontinu d'extraction par presse donne un grignon avec une humidité d'environ 30 %. Les systèmes continus d'extraction par centrifugation à 3 et 2 phases, par contre, laissent un grignon beaucoup plus humide dont le taux d'humidité se situe entre 45 et 65 % [3].

Les principales possibilités de valorisation du grignon d'olive, telles que l'extraction par solvant de l'huile résiduelle, son utilisation comme combustible ou comme additif pour aliments du bétail, nécessitent au préalable l'abaissement de sa teneur en eau à des valeurs comprises entre 5 et 10%. Le processus de séchage est par conséquent une étape incontournable dans sa valorisation.

L'objectif de ce travail consiste à développer un modèle mathématique pour décrire la cinétique de séchage par convection en couche mince du grignon d'olive dans un séchoir de type tunnel.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1 Matériel végétal

L'échantillon de grignon provient d'une huilerie fonctionnant avec le système continu à 3 phases. Ses principales caractéristiques sont: l'humidité initiale moyenne égale à 45.73 '% base humide', le diamètre moyen des particules égal à 2.03 mm et la teneur moyenne en huile est de 6.50 '% base sèche'.

2.2 Protocole expérimental

Le schéma du dispositif de séchage par convection en couche mince du grignon d'olive conçu au laboratoire est donné par la figure 1. Il est composé d'un tube en polychlorure de vinyle (PVC) calorifugé, d'un mètre de long formant la chambre de séchage couplé à un séchoir à lit fluidisé (marque Reish, Germany). Ce dernier permet de fournir l'air asséchant dans des conditions aérothermiques contrôlées.

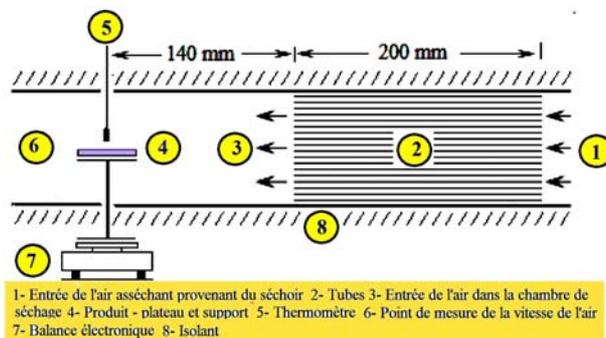


Fig. 1: Schéma du dispositif expérimental de séchage en couche mince du grignon d'olive

La cinétique de séchage est étudiée pour cinq températures (50, 60, 70, 80 et 90 °C). La vitesse de l'air, mesurée avec une précision de ± 0.2 m/s à l'aide d'un anémomètre digital (Extech's Model 45158 Anemometer, USA), et l'épaisseur de l'échantillon sont fixées respectivement à 1 m/s et 0.6 cm. Pour toutes les expériences, l'humidité relative de l'air ambiant a varié de 50 à 58%.

La mesure en continue de la perte de masse du produit au cours du temps est effectuée sur l'ensemble (produit, plateau et support) à l'aide d'une balance électronique de précision (± 0.01 g). L'expérience de séchage est arrêtée, lorsque la teneur en eau finale souhaitée est atteinte (environ 5 %). Le produit séché est ensuite placé dans une étuve portée à une température de 105 °C jusqu'à obtention d'un poids constant afin de déterminer sa masse sèche.

2.3 Modélisation mathématique

Neuf modèles mathématiques semi-empiriques et empiriques donnés dans la littérature [4, 5] ont été utilisés pour décrire la cinétique de séchage en régime continu du grignon d'olive (Tableau 1).

Tableau 1: Modèle mathématique

| Nom du modèle | Modèle |
|---------------------------|---|
| Newton | $X^* = \exp(kt)$ |
| Henderson & Pabis | $X^* = a \times \exp(kt)$ |
| Page modifié | $X^* = \exp(-(kt)^n)$ |
| Wang & Singh | $X^* = 1 + a \times t + b \times t^2$ |
| Exponential of Two terms | $X^* = a \times \exp(-kt) + (1 - a) \times \exp(-k'at)$ |
| Approach of the diffusion | $X^* = a \times \exp(-kt) + (1 - a) \times \exp(-k'bt)$ |
| Verna <i>et al.</i> | $X^* = a \times \exp(-kt) + (1 - a) \times \exp(-k't)$ |
| Two terms | $X^* = a \times \exp(-kt) + b \times \exp(-k't)$ |
| Henderson & Pabis modifié | $X^* = a \times \exp(-kt) + b \times \exp(-k't) + c \times \exp(-k''t)$ |

Dans ces équations, X^* représente la teneur en eau réduite calculée suivant la relation:

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

où X , est la teneur en eau au temps t (kgeau/kgms), X_0 , la teneur initiale en eau (kgeau/kgms) et X_e , la teneur en eau à l'équilibre (kgeau/ kg ms). X_e est négligeable devant X_0 et X [6-9], l'équation (1) se réduit à:

$$X^* = \frac{X}{X_0} \quad (2)$$

Les critères d'évaluation de la qualité de lissage des résultats expérimentaux sont le coefficient de détermination (R^2), le ki-carré réduit (χ^2) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) 'Root Mean Square Error'. Ces paramètres sont calculés suivant les relations:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{ei}^* - X_{pi}^*)^2}{N - n} \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (X_{ei}^* - X_{pi}^*)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

où X_{ei}^* , est la $i^{\text{ème}}$ valeur expérimentale, X_{pi}^* , la $i^{\text{ème}}$ valeur prédite par le modèle, N , le nombre d'observations et n , le nombre de constantes du modèle.

Le coefficient de détermination R^2 est l'un des premiers critères d'évaluation de la qualité de lissage des résultats expérimentaux. Le modèle qui décrit le mieux la cinétique de séchage est celui pour lequel la valeur de R^2 est la plus grande et les valeurs de χ^2 et de RMSE les plus faibles [5, 7].

Les différents modèles mathématiques examinés sont ajustés aux données expérimentales en appliquant la méthode de régression non linéaire. Le logiciel utilisé est 'Statistica'.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Analyse des courbes de séchage

Les courbes cinétiques de séchage par convection du grignon d'olive pour différentes températures sont présentées par la figure 2. Ces courbes expriment l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps.

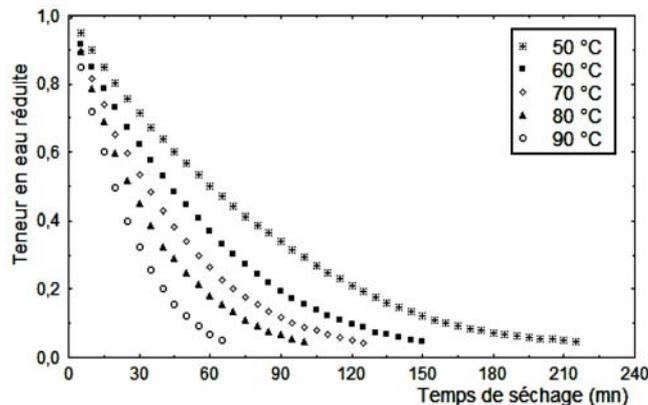


Fig. 2: Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes températures

Les résultats montrent que la température influe de manière significative sur la durée de séchage du grignon d'olive. Une augmentation de la température entraîne une diminution du temps de séchage du produit. En effet, quand la température de l'air asséchant augmente de 50 à 90 °C, la réduction du temps de séchage du grignon séché à 5 % est estimée à 70 % pour une épaisseur de la couche de 0.6 cm et pour une vitesse de l'air de 1 m/s.

La figure 3 décrit l'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau réduite pour des températures variant de 50 à 90°C.

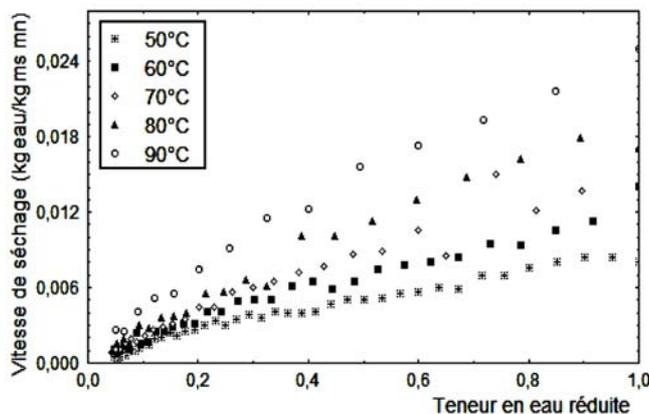


Fig. 3: Variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau pour différentes températures

On observe que la vitesse de séchage diminue continuellement avec la teneur en eau du produit, mais augmente avec la température de l'air asséchant. L'allure décroissante des courbes indique l'absence de la période de mise en température du produit et de la période de séchage à allure constante. Seule donc la période à allure décroissante ou période de ralentissement est observée.

Durant cette phase de séchage, le processus de transfert de l'eau du produit est régi surtout par la diffusion. Ces observations sont en accord avec ceux publiés dans la littérature pour le séchage du grignon d'olive [9-11] et pour les autres produits biologiques [5-7, 12-14].

3.2 Modélisation

Les valeurs calculées des paramètres statistiques utilisés sont reportées dans le **Tableau 2**. Les différents modèles sont comparés en s'appuyant sur les valeurs du coefficient de détermination (R^2), du ki-carré réduit (χ^2) et de la racine carré de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Dans les conditions expérimentales étudiées, ces valeurs varient respectivement de 0.98835 à 0.99979, 115.75×10^{-5} à 2.22×10^{-5} et 0.03218 à 0.00432. Les valeurs élevées de R^2 et les faibles valeurs de χ^2 et RMSE indiquent un bon ajustement de tous ces modèles aux résultats expérimentaux.

Parmi ces modèles, 'Diffusion Approach' et 'Verma *et al.*' donnent des valeurs du coefficient de détermination les plus élevées (supérieures à 0.99918) et des valeurs de χ^2 et RMSE les plus faibles (inférieures respectivement à 7.18×10^{-5} et 0.00805) pour

les différentes températures étudiées. Ils sont suivis par les modèles 'Modified Page' et 'Wang & Singh' qui donnent des valeurs élevées de R^2 pour des températures supérieures à 70 °C.

Tableau 2: Valeurs des paramètres statistiques

| Modèle | T | R^2 | χ^2 | RMSE |
|-------------------------------------|------|---------|-----------|---------|
| Lewis | 50°C | 0,99247 | 0,0006150 | 0,02452 |
| | 60 | 0,99381 | 0,0005070 | 0,02216 |
| | 70 | 0,99676 | 0,0002681 | 0,01606 |
| | 80 | 0,98874 | 0,0010570 | 0,03164 |
| | 90 | 0,99273 | 0,0006923 | 0,02535 |
| Henderson And Pabis | 50°C | 0,99479 | 0,0004359 | 0,02040 |
| | 60 | 0,99512 | 0,0004144 | 0,01969 |
| | 70 | 0,99748 | 0,0002175 | 0,01417 |
| | 80 | 0,99264 | 0,0007310 | 0,02557 |
| | 90 | 0,99448 | 0,0005697 | 0,02210 |
| Modified Page | 50°C | 0,99884 | 0,0000972 | 0,00963 |
| | 60 | 0,99866 | 0,0001134 | 0,01030 |
| | 70 | 0,99934 | 0,0000567 | 0,00723 |
| | 80 | 0,99968 | 0,0000316 | 0,00531 |
| | 90 | 0,99929 | 0,0000740 | 0,00796 |
| Wang And Singh | 50°C | 0,99850 | 0,0001080 | 0,01015 |
| | 60 | 0,99776 | 0,0001900 | 0,01333 |
| | 70 | 0,99532 | 0,0004032 | 0,01929 |
| | 80 | 0,99952 | 0,0000473 | 0,00651 |
| | 90 | 0,99901 | 0,0001021 | 0,00936 |
| Exponential Two Terms | 50°C | 0,99214 | 0,0006575 | 0,02505 |
| | 60 | 0,99350 | 0,0005518 | 0,02272 |
| | 70 | 0,99649 | 0,0003020 | 0,01670 |
| | 80 | 0,98835 | 0,0011575 | 0,03218 |
| | 90 | 0,99240 | 0,0007838 | 0,02592 |
| Approach Diffusion | 50°C | 0,99922 | 0,0000670 | 0,00790 |
| | 60 | 0,99919 | 0,0000715 | 0,00804 |
| | 70 | 0,99964 | 0,0000321 | 0,00533 |
| | 80 | 0,99979 | 0,0010222 | 0,00432 |
| | 90 | 0,99961 | 0,0000434 | 0,00584 |
| Verna et al. | 50°C | 0,99921 | 0,0000673 | 0,00792 |
| | 60 | 0,99918 | 0,0000718 | 0,00805 |
| | 70 | 0,99968 | 0,0000284 | 0,00502 |
| | 80 | 0,99979 | 0,0010224 | 0,00434 |
| | 90 | 0,99961 | 0,0000437 | 0,00586 |
| Two Terms | 50°C | 0,99479 | 0,0004462 | 0,02040 |
| | 60 | 0,99512 | 0,0004450 | 0,01969 |
| | 70 | 0,99747 | 0,0002373 | 0,01417 |
| | 80 | 0,99264 | 0,0007567 | 0,02475 |
| | 90 | 0,99428 | 0,0007110 | 0,02254 |
| Henderson And Pabis modified | 50°C | 0,99479 | 0,0004819 | 0,02040 |
| | 60 | 0,99512 | 0,0004807 | 0,01969 |
| | 70 | 0,99748 | 0,0002610 | 0,01417 |
| | 80 | 0,99264 | 0,0009558 | 0,02557 |
| | 90 | 0,99428 | 0,0008886 | 0,02253 |

La valeur de R^2 la plus élevée (0.99979) et les valeurs de χ^2 et RMSE, les plus faibles (respectivement, 2.22×10^{-5} et 0.00432) sont obtenues avec le modèle 'Diffusion Approach' à la température de 80 °C. Par conséquent, ce modèle est celui qui rend le mieux compte du comportement du séchage convectif en couche mince du grignon d'olive dans un séchoir de type tunnel.

Il est suivi à cette température par le modèle de 'Verma *et al.*' qui donne la même valeur de R^2 , mais des valeurs de χ^2 et RMSE légèrement plus élevées (respectivement 2.24×10^{-5} et 0.00434).

Le modèle 'Two Terms' exponentiel apparaît comme celui qui donne de mauvais ajustements avec les résultats expérimentaux dans tous les cas étudiés.

La figure 4 présente les valeurs expérimentales de la teneur en eau réduite en fonction des valeurs prédites par le modèle 'Diffusion Approach'.

La valeur du coefficient de détermination est estimée à 0.9980. La valeur élevée de R^2 indique qu'il y a un bon accord entre la théorie et l'expérience.

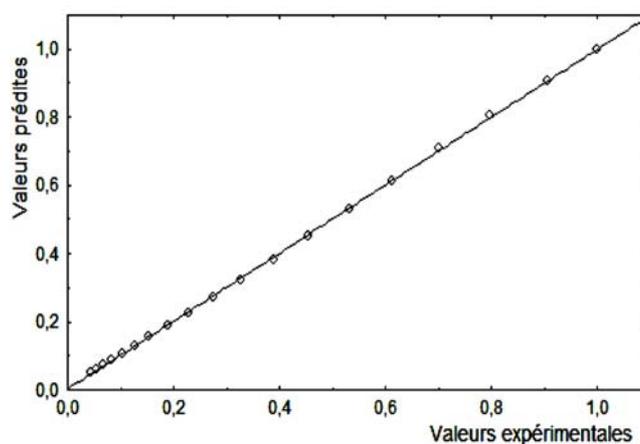


Fig. 4: Valeurs expérimentales de X^* en fonction des valeurs prédites par le modèle Diffusion Approach ($T = 80$ °C)

4. CONCLUSION

Dans ce travail, la cinétique de séchage en couche mince du grignon d'olive dans un séchoir convectif de type tunnel est étudiée pour différentes températures. Les résultats obtenus montrent que la durée de séchage diminue significativement avec la température.

Seule la phase à allure décroissante est présente dans le séchage convectif du grignon d'olive. Parmi les modèles mathématiques semi-empiriques et empiriques utilisés, le modèle 'Diffusion Approach' semble le plus approprié pour décrire le comportement du séchage du grignon d'olive dans les conditions expérimentales étudiées.

NOMENCLATURE

| | |
|---|--|
| X : Teneur en eau à t , (kgeau/kgms) X_e : Teneur en eau, équilibre, (kgeau/kgms) X_{ei}^* : $i^{\text{ème}}$ valeur expérimentale de la teneur eau réduite N : Nombre d'observations R^2 : Coefficient de détermination $RMSE$: Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (Root mean square error) | X_0 : Teneur initiale en eau, (kgeau/kgms) X^* : Teneur en eau réduite X_{pi}^* : $i^{\text{ème}}$ valeur prédite par le modèle de la teneur eau réduite n : Nombre de constantes du modèle χ^2 : ki-carré réduit; ms : Matière sèche |
|---|--|

REFERENCES

- [1] F. Boukhoubza, A. Ait Boughrous, M. Yacoubi-Khebiza, A. Jail, L. Hassani, L. Loukili Idrissi and A. Nejmeddine, 'Impact of Olive Oil Wastewater on the Physicochemical and Biological Quality of Groundwater in the Haouz Plain, South of Marrakesh (Morocco)', *Environmental Technology*, Vol. 29, N°9, pp. 959 – 974, 2008.
- [2] V. Kavvadiasa, M.K. Doulaa, K. Komnitsasb and N. Liakopouloua, 'Disposal of Olive Oil mill Wastes in Evaporation Ponds: Effects on Soil Properties', *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 182, N°1-3, pp. 144 – 155, 2010.
- [3] L. Di Giovacchino, 'Extraction de l'Huile des Olives par les Systèmes de la Pression, de la Centrifugation et de la Percolation: Incidence des Techniques d'Extraction sur les Rendements en Huile', *Olivae*, Vol. 36, pp. 14 - 41, 1991.
- [4] E.K. Akpınar, 'Mathematical Modelling of Thin Layer Drying Process Under Open Sun of Some Aromatic Plants', *Journal of Food Engineering*, Vol. 77, N°4, pp. 864 – 870, 2006.
- [5] E.K. Akpınar and Y. Bicer, 'Mathematical Modelling of Thin Layer Drying Process of Long Green Pepper in Solar Dryer and Under Open Sun', *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, N°6, pp. 1367 – 1375, 2008.
- [6] R.K. Goyal, A.R.P. Kingsly, M.R. Manikantan and S.M. Ilyas, 'Mathematical Modelling of Thin Layer Drying Kinetics of Plum in a Tunnel Dryer', *Journal of Food Engineering*, Vol. 79, N°1, pp. 176 – 180, 2007.
- [7] T. Gunhan, V. Demir, E. Hancioglu and A. Hepbasli, 'Mathematical Modelling of Drying of Bay Leaves', *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, N°11, 1667–1679, 2005.
- [8] C. Ertekin and O. Yaldiz, 'Drying of Eggplant and Selection of a Suitable Thin Layer Drying Model', *Journal of Food Engineering*, Vol. 63, N°3, pp. 349 – 359, 2004.
- [9] I. Doymaz, O. Gorel and N.A. Akgun, 'Drying Characteristics of the Solid By-Product of Olive Oil Extraction', *Biosystems Engineering*, Vol. 88, N°2, pp. 213 – 219, 2004.
- [10] S. Meziane, 'Drying Kinetics of Olive Pomace in a Fluidized Bed Dryer', *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, N°3, pp. 1644 - 1649, 2011.
- [11] A.R. Celma, S. Rojas, F. Lopez, I. Montero and T. Miranda, 'Thin-Layer Drying Behaviour of Sludge of Olive Oil Extraction', *Journal of Food Engineering*, Vol. 80, N°4, pp. 1261 – 1271, 2007.
- [12] X. Liu, Z. Qiu, L. Wang, Y. Cheng, H. Qu and Y. Chen, 'Mathematical Modeling for Thin Layer Vacuum Belt Drying of Panax Notoginseng Extract', *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, N°4, pp. 928 – 932, 2009.

- [13] A. Benhamou, A. Idlimam, A. Lamharrar, B. Benyoucef and M. Kouhila, '*Diffusivité Hydrique et Cinétique de Séchage Solaire en Convection Forcée des Feuilles de Marjolaine*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°1, pp. 75 – 85, 2008.
- [14] I. Doymaz, '*Convective Drying Kinetics of Strawberry*', Chemical Engineering and Processing, Vol. 47, N°5, pp. 914 – 919, 2008.