8ème Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies de Séchage
Session spécifique : Séchage des produits céramiques de construction
18, 19 et 20 mars 2023 – Sousse - Tunisie

Modélisation de la cinétique de séchage en couche mince de pommes entières en Séchoir solaire indirect

Ali Zine[1], Abdelouahab Benseddik[2], Rachid Saim[3] ,Abdeldjalil Laouini[1], Messaoud Zelaci[4]
1 : (Unité de recherche Développer des énergies renouvelables dans les zones arides université d'el oued. Laboratoire d'énergie et thermique appliquée Tlemcen Algérie)
2 : (Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algérie)
3 : (Laboratoire d'énergie et thermique appliquée Algérie)
4 : (Université Ziane Achour Djelfa 17000 DZ, Algérie)

Zine-ali@univ-eloued.dz, *Zineali85@yahoo.fr* , *abdelouahabbenseddik@gmail.com* , *saimrachid@gmail.com, djalild6@gmail.com, mesze@yahoo.fr*

Résumé : Cette recherche étudie la cinétique de séchage de pommes entières en utilisant un séchoir solaire indirect. L'étude estime la diffusivité efficace de l'humidité et la cinétique de séchage d'échantillon, en utilisant le modèle de diffusion de Fick pour éclairés le transfert d'humidité. La valeur de diffusivité effective égal $4{,}82.10^{-10}$ m^2 /s. Les données expérimentales de teneur en eau sont ajustées par dix modèles empiriques sélectionnés de séchage en couche mince. On suppose que le modèle le mieux adapté est celui qui a le coefficient de détermination le plus élevé R^2, le plus bas réduit le quadrant χ^2 et l'erreur carrée moyenne RMSE. L'étude conclut que le modèle Midilli-Kucuk modélise avec succès la cinétique de pommes entières. Ces résultats contribuent au développement de méthodes efficaces de séchage de pommes et donnent un aperçu de la cinétique de séchage.

Mots clés : Séchoir solaire ; Cinétique de séchage ; Séchage direct. Diffusivité efficace de l'humidité

1. Introduction

Le séchage solaire est une méthode importante pour la préservation des produits agricoles. Le processus de séchage et de stockage pommes entière serait alors nécessaire l'applicabilité, cela pourrait être étendu beaucoup plus loin. L'objectif principal de ces séchoirs solaires est d'améliorer l'efficacité et la qualité [1].
Le séchage est un processus thermique complexe qui implique à la fois un transfert instable de chaleur et d'humidité [2].
D'un point de vue technique, il est essentiel d'acquérir une compréhension plus approfondie sur les paramètres régissant le processus complexe. Des modèles mathématiques de processus de séchage sont utilisés dans la conception de systèmes de séchages nouveaux ou améliorés, ainsi que dans le contrôle du processus de séchage[3]. Divers modèles mathématiques ont été proposés pour décrire le processus de séchage des produits agricoles. Pour décrire les caractéristiques de séchage des produits agricoles, plusieurs modèles de séchage en couche mince publiés dans la littérature ont été utilisés. Ces dernières années, plusieurs chercheurs ont mené de nombreuses études sur la cinétique et la modélisation mathématique des procédés de séchage des légumes et fruits [4 – 6].

Le but de cette étude était d'étudier la cinétique de séchage des tranches de pommes en utilisant à la fois un séchoir solaire indirect.
Cette expérience a été réalisée les 5 et 6 septembre 2023 à l'Université d'el oued, au sud-est de l'Algérie.

2. Materials et méthodes

2.1. Expérience de séchage

L'université d'el oued a été utilisée pour mener des expériences de séchage, qui ont été réalisées à l'aide d'un séchoir solaire a capteur plans (fig.1 (a), (b) , et (c)) . Les pommes fraîches entières ont été obtenues dans un marché local de la ville d'el oued. La teneur en humidité initiale moyenne des pommes entières a été déterminée à 87,5% (w,b) à l'aide de la méthode AOAC (1990), ce qui implique un séchage à 105 °C pendant 24 heures. Avant

le processus de séchage, les échantillons ont été lavés et étalés uniformément sur un plateau de séchage dans la chambre de séchage.

L'expérience a été menée en utilisant un séchoir solaire direct à convection forcé. Pour cet essai de séchage, environ 1000 g de pommes fraîches entières ont été placées en une seule couche.

Une balance électronique numérique avec une plage de mesure de 0 à 3 000 g et une précision de 0,01 g a été utilisée pour mesurer le poids de l'échantillon pendant le processus de séchage. Le poids net de l'échantillon est 121.96 g. Le séchage a été arrêté lorsque la teneur en humidité a diminué du niveau initial de 87.5 % (w,b) à 19 % (w,b). Après séchage, le produit a été refroidi pendant 10 minutes et stocké dans des récipients hermétiques en plastique.

Figure 1 : Photo de séchoir indirect (a) capteur, (b) chambre de séchage, (c) tranches de pommes fraîches

2.2. Modélisation mathématique des courbes de séchage des couches minces

Plusieurs modèles courants sont largement utilisés pour décrire la relation entre le taux d'humidité et le temps de séchage lors du séchage en couche mince. Le tabl 1 représente ces modèles. Le taux d'humidité (XR) peut être exprimé comme suit :

$$XR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \qquad (1)$$

Les valeurs de X_t, X_{eq} et X_0 représentes teneur en eau instantané, teneur en eau à équilibre et teneur en eau initiale respectivement.

Table 1 : Modèles mathématiques

N	Modèle	Equation	Ref
1	Newton	$XR = \exp(-kt)$	[7]
2	Modèle de page	$XR = \exp(-kt^n)$	[8]
3	Modèle de page modifié	$XR = \exp(-(kt)^n)$	[9]
4	Modèle de Henderson et Pabis	$XR = a\exp(-kt)$	[7]
5	Modèle de Midilli-Kucuk	$XR = a\exp(-kt^n) + bt$	[10]
6	Modèle Approximation de Diffusion	$XR = a\exp(-kt^n) + (1-a)\exp(-kbt)$	[4]

Les mécanismes de transport de l'humidité pendant le processus de séchage Peut être modélisée mathématiquement en utilisant la deuxième loi de Fick la diffusion (Eq. (2)).

$$\frac{dXR}{dt} = D_{eff}\nabla^2 M \qquad (2)$$

En supposant que le transport d'humidité se produit par diffusion, en négligeant le rétrécissement et en supposant des valeurs constantes pour le coefficient de diffusion et la température, la solution analytique de la deuxième équation de la loi de Fick pour une plaque infinie est [5].

$$XR = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)}exp\left[-(2n+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff}t}{4L^2}\right] \qquad (3)$$

Le deuxième terme et les termes supérieurs sont négligeables par rapport au premier terme à un temps de séchage suffisamment long. Donc Eq.(3) peut s'écrire comme suit :

$$XR = \frac{8}{\pi^2}exp\left[\frac{-\pi^2 D_{eff}t}{4L^2}\right] \qquad (4)$$

MR représente le taux d'humidité adimensionnelle, D_{eff} est la diffusivité effective de l'humidité par m^2/s. T le temps de séchage par seconde et L l'épaisseur de tranches de pommes en (m). Eq. (4) peut s'exprime en notation logarithmique comme suite :

$$\ln(XR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff}t}{4L^4} \qquad (5)$$

La diffusivité effective de l'humidité pendant de l'opération de séchage peut être déterminée par la courbe de ln(XR) en fonction de temps.

3. Résultats et discussion

3.1. Courbes de séchage

La figure 2 illustre la variation de teneur en eau en fonction de temps pendant les deux jours de séchage.
On remarque deux phase la première perte rapide de l'humidité dans le produit et la deuxième variation faible.

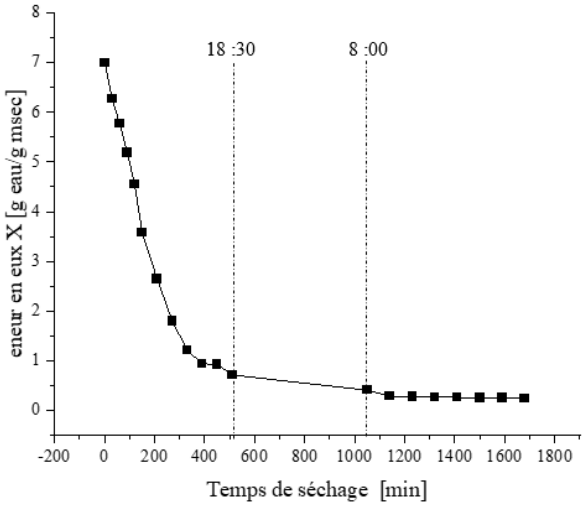

Figure. 2 : variation de teneur en eau au cours de temps

3.2. Estimation de modèle de séchage

Six modèles de séchage listé dans le tableau l'ont été adaptés au comportement de séchage en couche mince afin de déterminer la teneur en humidité en fonction du temps de séchage. Les valeurs d'analyse statistique pour chaque modèle sont fournies dans le tableau II.

Comme le montre le tableau II, le modèle Midilli Kucuk a fourni un bon accord entre le taux d'humidité expérimental et prévu par rapport aux autres modèles. Les valeurs moyennes de R^2, RMSE et χ^2pour le modèle Midilli-Kucuk étaient respectivement de 0,99**75**, **0,0**00557 et 3,**274**× 10−4.

Sur la figure 3, une comparaison est faite entre les valeurs expérimentales de séchage des tranches de pommes par un séchoir solaire indirecte et les valeurs mathématiques selon le modèle Midilli Kucuk.

Table. 2 : Résultats statistiques

N	Modèle	Coefficients				R^2	RMSE	χ^2
		k	n	a	b			
1	Newton	0.00476	-	-	-	0.98811	0.02736	0.00144
2	Modèle de page	0.00105	1.28588	-	-	0.99745	0.00587	3.26362E-4
3	Modèle de page modifié	0.00482	1.28165	-	-	0.99745	0.00587	3.26145E-4
4	Modèle de Henderson et Pabis	0.00476	-	1	-	0.98811	0.02736	0.00144
5	**Modèle de Midilli-Kucuk**	**0.001**	**1.29457**	**0.99532**	**4.17126E-6**	**0.99758**	**0.00557**	**3.27495E-4**
6	Modèle Approximation de Diffusion	0.00476	-	0.01	0.99981	0.98811	0.02736	0.00144

3.3. Évaluation de la diffusivité effective

Afin d'estimer la valeur de diffusion de l'humidité pendant le processus de séchage, la deuxième courbe de séchage doit être calculée en fonction du temps de séchage figure. (4).
Les valeurs de la modélisation de la diffusivité de l'humidité dans les tranches de pommes sont représentées dans la table. (III).

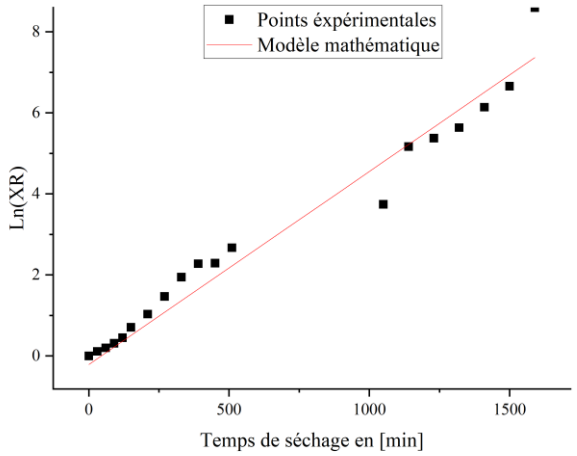

Figure. 4 : Ln(XR) en fonction de temps de séchage

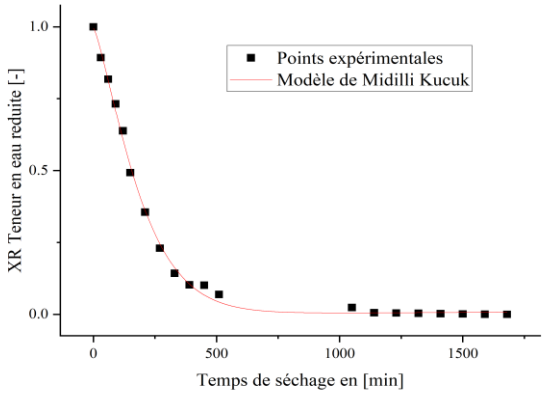

Figure. 3 : valeurs expérimentales et modèle mathématique

Table. III : les valeurs statistiques de la diffusivité

Type de séchage	D_{eff} m^2/s	R^2
Séchage solaire indirecte	$4.82.10^{-10}$	0.98395

4. Conclusion

La cinétique de séchage des tranches de pommes entières a été étudiée à l'aide d'un séchoir solaire indirect. Dans les conditions expérimentales utilisées, les tranches de pommes entières n'ont pas présenté une période de séchage à vitesse constante et ont montré une période de vitesse décroissante, comme c'est généralement le cas pour la plupart des produits alimentaires. Le séchage en fine couche de feuilles de menthe entières a été modélisé à l'aide de six modèles mathématiques différents. Parmi ces modèles, le modèle Midilli-Kucuk a fourni la meilleure prédiction, avec un coefficient R^2 plus élevé et RMSE et χ^2 plus moins. La diffusivité effective calculée est égale $4{,}82.10^{-10}$ m^2/s.

Références

[1] Zhengfu Wang et all: Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace: *Food Research International;* 40, 1, 39-46, 2007.

[2] A-Z. Sahin and I. Dincer, Prediction of drying times for irregular shaped multi-dimensional moist solids, *Journal of Food Engineering;* 71, 1, 119-126, 2005.

[3] İ. Doymaz, he kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, *Journal of Food Engineering;*, 71,1, 243-248, 2007.

[4] O. Yaldiz, C. Ertekin, and H. I. Uzun, Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes, *Energy;* 26,5, 457-465, 2001.

[5] A. Benseddik, A. Azzi, M. N. Zidoune, R. Khanniche, and C. Besombes. Empirical and diffusion models of rehydration process of differently dried pumpkin slices: *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*; 18,4,401–410, 2019.

[6] A. Benseddik, A. Azzi, M. N. Zidoune, and K. Allaf, Mathematical empirical models of thin-layer airflow drying kinetics of pumpkin slice: *Engineering in Agriculture, Environment and Food*; 11,4,220–231,2018.

[7] Lewis, W.K. (1921); The rate of drying of solid materials: *J Ind Eng Chem*; 427–432.

[8] G. Xanthopoulos, Gr. Lambrinos, and H. Manolopoulou; Evaluation of Thin-Layer Models for Mushroom (Agaricus bisporus) Drying: *Drying Technology*; 25,9, 1471–1481, 2007.

[9] A. Midilli, H. Kucuk, and Z. Yapar; A new model for single layer drying: *Drying Technology*; 20(7), 1503-1510, 2002.

[10] Q. Zhang and J. B. Litchfield; "An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer: *Drying Technology*; 9(2), 383-395, 1991