

APPROCHE THEORIQUE ET EXPERIMENTAL DE LA VITESSE DE SECHAGE SOLAIRE DE LA TOMATE.

Nadia Nadir*, B. BOUCHEKIMA, S. BOUGHALI, H. BOUGUETTAIA ET D. BECHKI

*Laboratoire de développement des Energies Nouvelles et Renouvelables en Zones Arides
(LENREZA)*

Université Kasdi Merbah Ouargla

B.P. 511, Route de Ghardaïa, 30000, Ouargla

ALGERIE

** Nadia.Nadir67@gmail.com*

Résumé : Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale de séchage par convection forcée d'un produit agro-alimentaire (la tomate) dans un séchoir solaire indirect muni d'un appoint électrique au laboratoire LENREZA de l'université d'Ouargla. L'objectif de ce travail consiste à faire une approche théorique et expérimentale de la vitesse de séchage solaire (1,15 et 2m/s) des tranches de tomate avec une température fixée à $T=65^{\circ}\text{C}$.

Mots clés : séchage, séchage solaire, tomate, paramètre de fonctionnement, Cinétique de séchage, Convection forcée

1. INTRODUCTION

La nature saisonnière de la production de beaucoup de fruits et légumes, ainsi que leur teneur élevée en eau qui les rend périssables, a menée à la recherche des différentes technologies pour les préserver et pour nous permettre de rendre ces produits disponibles à tout moment.

Le séchage est une des plus anciennes opérations unitaires qui permet la conservation des aliments par l'élimination partielle ou totale d'eau, auquel les réactions chimiques microbiennes de détérioration sont considérablement réduites au minimum. Il s'agit d'une technique faisant intervenir des transferts simultanés de chaleur et de masse entre le produit et l'air environnant.

Pour utiliser librement, l'énergie renouvelable et non polluante comme source principale fournie par le soleil, l'introduction des séchoirs solaires dans les pays en voie de développement peuvent réduire des pertes de récoltes et améliorer sensiblement, la qualité du produit sec comparé aux méthodes traditionnelles de séchage.

Diverses technique de séchage existent déjà ; elles se sont largement développées dans les zones arides et semi-arides qui présentent des conditions climatiques optimales : une saison sèche avec un fort ensoleillement, une faible pluviométrie, une hygrométrie peu élevée [1].

Cette étude a été consacrée à l'étudier l'influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage des tranches de tomate.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel

La tomate a été achetée fraîche du marché local et choisie d'une façon homogène pièce par pièce en utilisant trois critères qui sont la dimension, le degré de maturation (ni crue ni trop mur), et la morphologie externe (surface saine sans fissure).

La surface du collecteur solaire est de 2.45 m². Elle est inclinée par rapport à l'horizontale d'un angle de 31° égal à la latitude de Ouargla. Les dimensions du caisson de dessiccation sont de 1.65 × 0.60 × 1.00. La distance entre les claies est de 12 cm. Une résistance de chauffe de 3.75 kW est placée à l'entrée de la chambre de séchage reliée à un thermostat au cas où le solaire seul ne suffit pas pour atteindre les températures voulues. Un ventilateur avec variateur de vitesse est placé à la sortie de la chambre pour évacuer vers l'extérieur l'air humidifié par l'évaporation de l'eau des produits. Le dispositif utilisé est schématisé sur la figure 1.



Figure. 1 : Schéma descriptif du système de séchage

2.2. Protocole expérimental

Des expériences de séchage ont été effectuées à 65 °C avec une épaisseur d'échantillon approximativement égale à 1 cm, et pour différentes vitesses de l'air (1, 1,5 et 2 m/s). La masse de l'échantillon au niveau de la claie est de 2400 g.

L'humidité initiale mesurée est d'environ 93,24 %, le séchage se produit jusqu'à une humidité finale de 13 % [2] en prélevant la perte d'humidité chaque 60 minutes, au moyen d'une balance numérique. En plus les mesures de température, du rayonnement, de la vitesse, et d'humidité relative de l'air sont effectuées chaque 30 minutes.

Les expériences de séchage ont été effectuées pendant les périodes (Novembre - Avril 2007-2008) dans les conditions climatiques de Ouargla, chaque expérience commence à 9 h et se termine à 17h.

Après 17h, les échantillons sont stockés dans des boîtes en plastique et placés dans un réfrigérateur afin d'empêcher la fermentation et garder leur états pour la continuité de l'opération de séchage le lendemain.

3. Modèle mathématique des courbes de séchage

Des résultats expérimentaux du rapport d'humidité avec le temps de séchage ont été adaptés aux modèles théoriques les plus importants, largement répandus dans le processus de séchage [3].

Le rapport d'humidité (MR) et la vitesse de séchage de tranches de tomate pendant les expériences de séchage ont été calculés en utilisant les équations suivantes :

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

$$\frac{dX}{dt} = \frac{X_{t+dt} - X_t}{dt} \quad (2)$$

Où : X_0 , X_e , X_t , et X_{t+dt} (Kg d'eau / Kg masse sèche) sont la teneur en eau initiale, teneur en eau d'équilibre, teneur en eau à l'instant t et teneur en eau à l'instant $t+dt$, respectivement, t est le temps de séchage (min). Cependant, MR est simplifié à M/M_0 dû à X_e qui est très petit devant X et X_0 .

Les modèles mathématiques choisis sont identifiés dans la table 1. La régression non linéaire au sens des moindres carrés a été employée pour évaluer les paramètres du modèle choisi avec le procédé de Levenberg-Marquardt en utilisant le programme Origine. La qualité de l'ajustement a été déterminée en utilisant les paramètres statistiques, (R^2 , χ^2). Ces paramètres peuvent être décrits dans les équations :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (3)$$

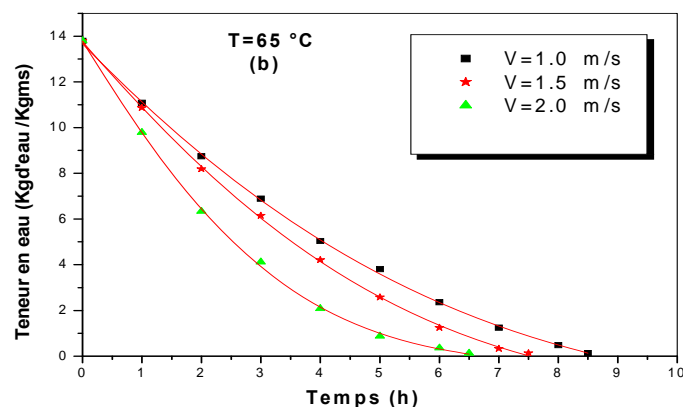
Tableau 1 : Différents modèles mathématiques de séchage.

No	Le nom modèle	Modèle	References
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Lewis (1921)
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis (1961); Park et al. (2002).
3	Page	$MR = e \exp(-kt^n)$	Doymaz (2005a); Kashaninejad and Tabil (2004)
4	Modified Page	$MR = e \exp(-kt)^n$	Overhults et al. (1973)
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yagcioglu et al. (1999)
6	Two-term	$MR = a \exp(-kot) + b \exp(-kit)$	Henderson (1974)
7	Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Sharaf-Elden et al. (1980)
8	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Yaldiz and Ertekin (2001)
9	Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	Doymaz (2005b); Verma et al. (1985)
10	Midilli et al	$MR = a \exp(-Kt^n) + bt$	Midilli et al. (2002)

4. Résultats expérimentaux

4.1. Caractéristiques de séchage

La teneur en eau X_a a été tracée en fonction du temps, pour les différentes valeurs de la vitesse d'air (1, 1.5, 2 m/s) et pour une température d'air de 65 °C sont rapportées dans la fig.2. D'après la figure ci-dessous (2) on remarque que l'augmentation de la vitesse de l'air asséchant influe négativement sur le temps de séchage , la vitesse variant de 1 m/s à 1,5 m/s a engendré une baisse en temps de séchage de 8,5 h à 7,5 h (une diminution de 11,76%). De même, un accroissement en vitesse de $V=2$ m/s a diminué le temps de séchage d'environ 6,5 h. Cette diminution est de 23,53% et 13,33% respectivement à $V=1$ m/s et $V=1,5$ m/s [4], [5], [6], [7], [8]).



vitesse de l'air asséchant sur la teneur en eau du produit en fonction du temps de séchage.

4.2. Cinétique de séchage

La variations de la vitesse de séchage en fonction de temps sont illustrées par la figure. 3 pour les différentes vitesses.

Lors de l'opération de séchage, on observe la présence d'une seule phase de séchage celle de la phase à allure décroissante, l'absence de la phase de mise en température et de la phase de séchage à allure constante.

Ce résultat indique probablement que le mécanisme de diffusion est le mécanisme physique le plus susceptible qui régit le mouvement d'humidité dans ces échantillons. Ces résultats sont conformes aux différents travaux réalisés avec les produits agricoles, [9], [10], [11], [12].

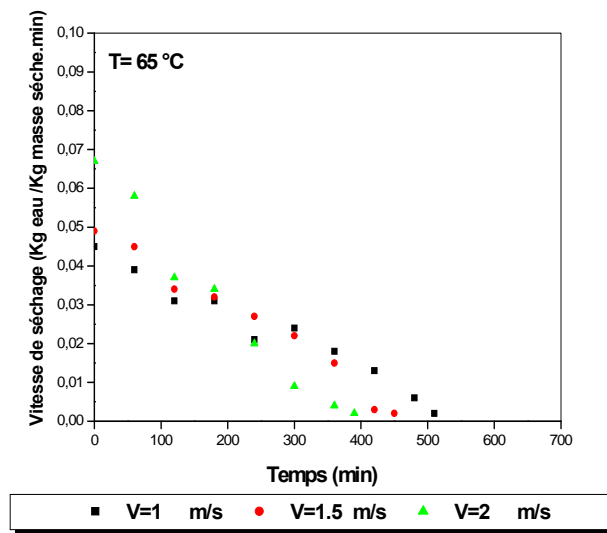


Figure 3 : Variation de la vitesse de séchage avec le temps pour les différentes vitesses d'air.

4.3. Approche théorique

Les données de la teneur en humidité du produit, obtenues à différentes vitesses de l'air de séchage, ont été converties en rapport d'humidité (MR) et puis adaptées aux dix modèles mathématiques de séchage. Le tableau (2) montre les coefficients des modèles de séchage et les critères de comparaison employés pour évaluer la qualité de l'ajustement, notamment R^2 et χ^2 . Dans tous les cas, les valeurs de R^2 , et de χ^2 des modèles varient entre 0,96378 et 0,99985 ; 0,00003 et 0,00723 respectivement.

On observe que la valeur la plus élevée de R^2 et la valeur la plus basse de χ^2 ont été obtenues à partir du modèle de Midilli. En conséquence, le modèle Midilli a été choisi en tant que modèle approprié pour représenter le comportement du séchage de la tomate .

Tableau 2 : Résultats statistiques obtenus à partir des modèles choisis pour les différentes vitesses de l'air et à la température de 65 °C

Nom du modèle	Température	Constant du model	R ²	Chi ²
Lewis	V=1m/s V=1.5m/s V=2m/s	K=0,271 K=0.31533 K=0.43175	0,97594 0.97041 0.98452	0,00277 0.00366 0.00201
Henderson and Pabis	V=1m/s V=1.5m/s V=2m/s	a=1,04595, k=0,28302 a=1.05147, k=0.33032 a=1.03546, K=0.4451	0,97904 0.97421 0.98625	0,00271 0.00365 0.00208
Page	V=1m/s V=1.5m/s V=2m/s	K=0,1755, n=1,29944 K=0.19489, n=1.36423 K=0.31913, n=1.28771	0,99354 0.99356 0.99785	0,00084 0.00091 0.00033
Modified page	V=1m/s V=1.5m/s V=2m/s	K=0,26204, n=1,30104 K=0.30155, n=1.36595 K=0.41189, n=1.28769	0,99354 0.99356 0.99785	0,00084 0.00091 0.00033
Logarithmic	V=1m/s V=1.5m/s V=2m/s	a=1,29862, K=0,1677, c=-0,29548 a=1.36741, K=0.17951, c=-0.36155 a=1.15844, K=0.32291, c=-0.14812	0,99911 0.99931 0.99834	0,00013 0.00011 0.0003
Two-term-exponential	V=1m/s V=1.5m/s V=2m/s	a=1,81685, K=0,3831 a=1.87511, K=0.45712 a=1.82705, K=0.60628	0,99211 0.99109 0.99698	0,00102 0.00126 0.00046
Approximation of diffusion	V=1m/s V=1.5m/s V=2m/s	a=227,67603, K=0,09984, b=0,99503 a=261.69236, K=0.10365, b=0.99503 a=157.13745, K=0.20078, b=0.99503	0,99924 0.99942 0.99866	0,00011 0.0001 0.00024
Verma et al.	V=1m/s V=1.5m/s V=2m/s	a=227,7458, K=0,09984, g=0,09935 a=261.72002, K=0.10365, g=0.10314 a=-157.11699, K=0.20078, g=0.19978	0,99924 0.99942 0.99866	0,00011 0.0001 0.00024
Two-term	V=1m/s V=1.5m/s V=2m/s	a=0,52297, K ₀ =0,28302, b=0,52297, K ₁ =0,28302 a=0.52572, K ₀ =0.33032, b=0.52572, K ₁ =0.33032 a=0.51776, K ₀ =0.44516, b=0.51776, K ₁ =0.44517	0,97904 0.97421 0.98625	0,00362 0.00511 0.00312
Midilli et al	V=1m/s V=1.5m/s V=2m/s	a=0,99715, K=0.19001, n=1,08149, b=-0,01494 a=0.99832, K=0.20853, n=1.11438, b=-0.0188 a=0.99891, K=0.3268, n=1.17631, b=-0.00746	0,99913 0.9995 0.9994	0,00015 0.0001 0.00014

CONCLUSIONS

D'après l'étude réalisée et les résultats obtenus on peut dire que le séchage solaire par les séchoirs solaires permettent d'améliorer les méthodes traditionnelles en protégeant les produits et en

augmentant les performances. Cette technique est un procédé qui peut être utilisé pour les besoins domestiques et industriels, surtout dans les régions ensoleillées.

L'étude de la cinétique de séchage solaire de la tomate montrent la présence unique de la phase de ralentissement, et l'absence de la phase de mise en température et la phase à allure constante, comme c'est le cas de la majorité des produits agricoles. L'effet de la vitesse de l'air est moindre en comparaison avec l'effet de la température.

Le modèle proposé a fourni une bonne conformité entre les rapports expérimentaux et le calcul d'humidité. Ceci indique la convenance du modèle de Midilli en décrivant le comportement de séchage de la tomate.

Références

- [1] M. Dagueneat, "Les séchoirs solaires : théorie et pratique ", Publication de l'UNESCO, Paris, France (1985).
- [2] P. Dudez, "Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : expériences et procédés", Edition du Gret, France (1999).
- [3] K. Sacilik, R. Keskin and A. K. Elicin Bennis "Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato", Journal of Food Engineering. 73(231 - 238)-(2003).
- [4] A. Ruiz Celmaa, F. Cuadrosb, F. López-Rodríguezc, Convective drying characteristics of sludge from treatment plants in tomato processing industries, Food and Bioproducts Processing, 90 (2012) 224–234.
- [5] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz and J. T. Jaouhqi, "Drying kinetics of prickly pear fruit", Journal of Food Engineering. 61(173 - 179)-(2004).
- [6] J. Banout , P. Ehl , J. Havlik , B. Lojka , Z. Polesny , V. Verner " Design and performance evaluation of a Double-pass solar drier for drying of red chilli (Capsicum annum L.)", Solar Energy 85 (2011) 506–515.
- [7] A. Kaya, O. Aydin, C. Demirtas, M. Akgun, An experimental study on the drying kinetics of quince, Desalination, 212, 2007, 328-343.
- [8] Lyes Bennamouna, Réda Khamab, Angélique Léonard, Convective drying of a single cherry tomato: Modeling and experimental study, Food and Bioproducts Processing 94 (2015) 114–123.
- [9] C. T. Akanbi, R. S. Adeyemi, A. Ojom Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices, Journal of Food Engineering, 73, 2006, 157-163.
- [10] D. Arslan, M.M. Özcan, "Dehydration of red bell-pepper (Capsicum annum L.): Change in drying behavior, colour and antioxidant content ", Food and Bioproducts Processing. 89 (2011) 504–513
- [11] Ibrahim Doymaz "Sun drying of figs: an experimental study ", Journal of Food Engineering. 71 (403 -407) – (2005).
- [12] G. P. Sharma, R. C. Verma, P. B. Pathare " Thin-Layer infrared radiation drying of onion slices ", Journal of Food Engineering 67 (361-366)-(2005)

