

## Investigation mathématique et expérimentale de cinétiques de séchage des tomates

Bilel HADRICH, Imen KHARRAT et Nabil KECHAOU

Groupe de Recherche en Génie des Procédés Agro-alimentaire - Laboratoire Mécanique des Fluides Appliquée, Génie des Procédés et Environnement - Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Université de Sfax, BP '1173', 3038, Sfax, Tunisia – Fax: 0021674275595

*bilelhadrach@yahoo.fr, Imen-kharrat@hotmail.com et nabil.kechaou@enis.rnu.tn*

**Résumé :** Le séchage des tranches de tomate a été étudié. Cette opération a été réalisée avec trois différentes températures de séchage: 45, 55 et 65°C et trois vitesses différentes: 0,5- 1,2 et 1,6 m/s. L'étude expérimentale a été consacrée à la détermination de la cinétique de séchage dans des conditions contrôlées de séchage par convection de l'air chaud. Par conséquent, un certain nombre de corrélations empiriques qui ont été testés pour simuler le séchage des tomates par convection : Newton ; Henderson et Pabis ; Henderson et Pabis modifié ; Logarithmique ; A deux termes ; Wang et Singh. Tous les modèles ont montré des qualités de lissage très intéressantes pour toutes les cinétiques de séchage effectuées à différentes conditions. Ils présentent un coefficient de corrélation (entre 0,980 et 1) et une erreur standard (entre 0,008 to 0,052). Le modèle donnant le meilleur lissage pour toutes les conditions expérimentales et pour les deux variétés de tomates, est le modèle Logarithmique. Des corrélations, fonction des différentes conditions expérimentales, ont été établies pour les différents paramètres du modèle Logarithmique. Ceci est obtenu pour les deux variétés des tomates. Ce qui nous permet d'établir un modèle global afin de simuler des cinétiques de séchage effectuées à toute température entre 45 et 65°C et avec une vitesse d'air entre 0,5 et 1,6 m/s.

**Mots-clés :** cinétique de séchage, tomate, lissage, modèles empiriques.

### 1. Introduction

L'optimisation de l'opération de séchage doit répondre à deux impératifs essentiels qui sont la consommation restreinte de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité biologique du produit séché. Ce qui a incité l'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie de lancer un appel pour un Projet de Recherche Fédéré (PRF) intitulé « Conception et Réalisation d'un Séchoir Solaire de Produit Agro-alimentaires ». Parmi les 4 équipes partenaires impliqués au PRF dans ce projet, le Groupe de Recherche en Génie des Procédés Agroalimentaires (GPAA) du Laboratoire Mécanique des Fluides Appliquée, Génie des Procédés et Environnement de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, contribue à la caractérisation, la détermination des cinétiques de séchage et des isothermes de sorption ainsi que l'établissement des courbes caractéristiques de séchage. Ces courbes permettent par la suite à la conception et la construction d'un séchoir solaire pour le séchage des tomates.

Le présent travail présente l'étude expérimentale et de lissage des cinétiques de séchage pour deux variétés données de tomate. Ceci est effectué afin d'établir un modèle global simulant les cinétiques de séchage à des températures entre 45 et 65°C et à une vitesse d'air entre 0,5 et 1,6 m/s.

### 2. Matériel et méthodes

#### 2.1. Matière première

Les différents échantillons de tomates qui ont servi au séchage proviennent de la société Tunisienne « AGRIFOOD » spécialisée dans séchage de Tomate, Calamar et poulpe. Les échantillons de tomates utilisés sont répartis en deux variétés distinctes : une variété de tomate cultiver sous serre (variété 1, figure 1) et une variété de champs (variété 2, figure 1). Les deux variétés de tomates présentent une différence au niveau de leur forme : La première variété est de forme arrondie alors que la deuxième variété est de forme plus allongé. Les tomates étaient en premier lieu lavées avec l'eau distillée puis découpées soigneusement en quatre quartiers.

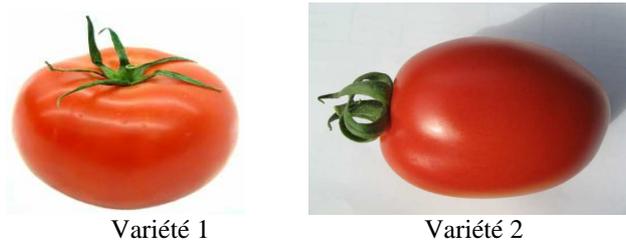


Figure 1 : Matière première

**2.2. Description de la boucle de séchage**

L'étude des cinétiques de séchage du produit a été effectuée grâce à la boucle de séchage par convection d'air chaud du groupe de recherche GP2A du Laboratoire de Mécanique des Fluides Appliquée, Génie des Procédés et Environnement, à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax. Le dispositif expérimental utilisé est une boucle fermée dont l'écoulement d'air dans la veine d'essai est horizontal à la surface du produit à sécher. Ce système de séchoir pilote ainsi que ses éléments constitutifs sont donnés par la figure 1.

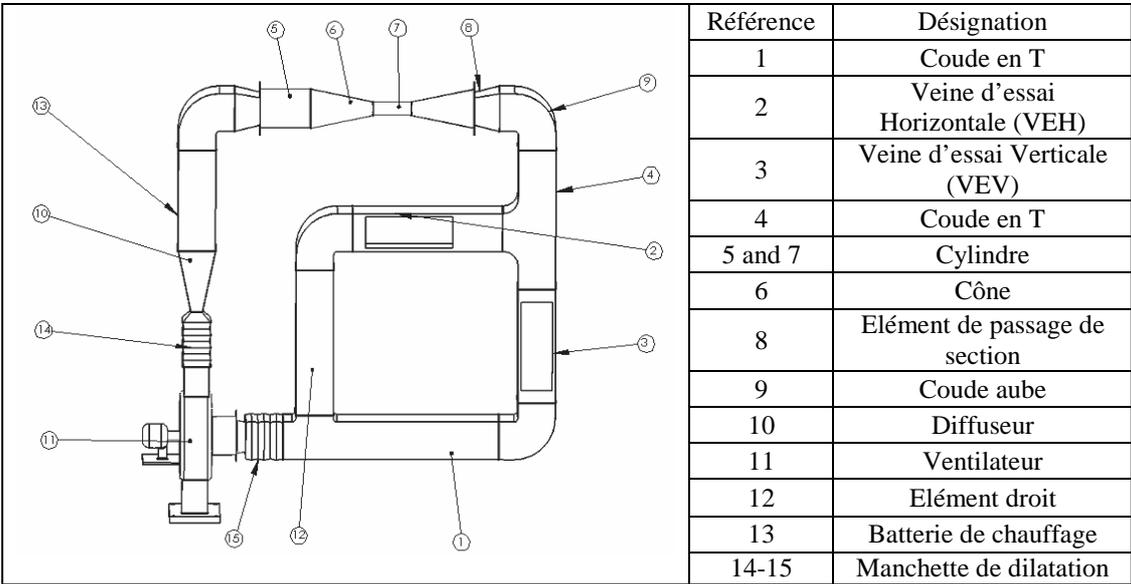


Figure 2 : Système de Séchage

**2.3. Protocole expérimental de séchage**

La cinétique de séchage a été déterminée à partir des mesures de la variation de masse des échantillons au cours du temps. Ces mesures ont été effectuées à l'aide de pesées horaires faites au moyen d'une balance électronique de haute précision à affichage numérique. Cette balance est liée à un ordinateur, et équipée d'une sortie de donnée permettant, par l'intermédiaire d'un logiciel adapté, l'acquisition de la masse au cours du temps. Les différents résultats ainsi obtenus ont permis de suivre l'évolution de la teneur en eau à base sèche en fonction du temps, la vitesse de séchage en fonction de la variation de la teneur en eau. Les différentes conditions expérimentales, réalisées avec la boucle de séchage sont : trois températures (45, 55 et 65°C) et trois vitesses d'air (0,5-1,2 et 1,6 m/s) ont été testé.

**2.4. Lissage des courbes de séchage et des isothermes de sorption**

Le lissage des courbes de séchage permet de décrire les courbes expérimentales par des courbes théoriques et l'identification de certains paramètres utiles. Six modèles, dont les équations sont présentées au tableau 1, ont été testés pour le lissage des courbes de séchage.

Les paramètres des modèles sont déterminés en minimisant la différence entre les données expérimentales et calculées. Le traitement mathématique se résume à l'utilisation de la régression non linéaire par le logiciel « Curve Expert 1.4 ». La capacité de ces équations à analyser les données expérimentales est vérifiée par deux termes statistiques : l'erreur standard (ES) et le coefficient de corrélation (r). En effet, les plus grandes valeurs

de  $r$  et les plus petites valeurs de ES sont les critères qui justifient le choix du modèle le plus approprié pour la description des données expérimentales.

Tableau 1 : Equations des modèles empiriques de lissage des cinétiques de séchage

Nom	Equation	Référence
Newton	$X/X_0 = \exp(-a t)$	[1]
Henderson et Pabis	$X/X_0 = a \exp(-b t)$	[2]
Henderson et Pabis modifié	$X/X_0 = a \exp(-b t) + c \exp(-d t) + e \exp(-f t)$	[3]
Logarithmique	$X/X_0 = a \exp(-b t) + c$	[4]
A deux termes	$X/X_0 = a \exp(-b t) + c \exp(-d t)$	[5]
Wang et singh	$X/X_0 = 1 + a t + b t^2$	[6]

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Cinétiques de séchage

La teneur en eau initiale des tomates de la variété 1 varie de 16,655 à 17,349 kg eau/kg M.S et elle a été réduite à une teneur en eau finale variant de 0,740 à 0,048 kg eau/kg M.S ; alors que la teneur en eau initiale des tomates de la variété 2 est de 14,385 kg eau/kg M.S et elle a été réduite à une teneur en eau finale variant de 0,347 à 0,002 kg eau/kg M.S. Les courbes d'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps ( $X/X_0 = f(t)$ ) pour trois températures et une vitesse égale à 0,5 m/s sont rassemblées sur les figures 3.a et 3.b relative à la variété 1 et la variété 2, respectivement.

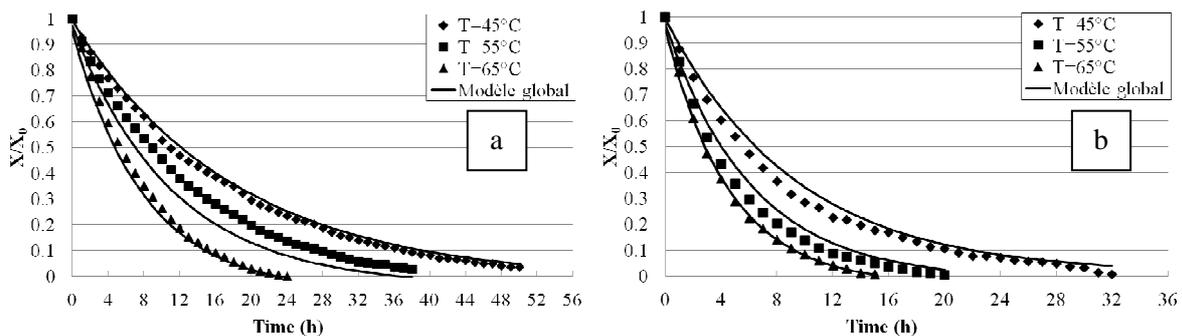


Figure 3 : Variations de la teneur en eau expérimentale et calculée par le modèle global établi de la variété 1 (fig. 3.a) et de la variété 2 (fig. 3.b) pour les températures de séchage 45, 55 et 65°C et une vitesse de séchage égale à 0,5 m/s

L'allure des cinétiques de séchage des tomates est similaire pour les différentes températures ainsi que pour les différentes vitesses de séchage (résultats non montrés) et montre que la teneur en eau du produit diminue de manière rapide aux premiers temps de séchage, puis de plus en plus lentement aux temps long. En effet, au début de séchage, le mécanisme de déplacement de l'eau par capillarité à travers les parois des pores du solide vers la surface s'effectue de façon accélérée traduisant ainsi une diminution assez rapide de l'activité de l'eau dans le produit. A la fin du procédé de séchage, l'augmentation de la température au centre du produit et la diminution de sa teneur en eau entraînent un nouvel état d'équilibre dans le produit, un équilibre enthalpique dans lequel la différence de température entre l'air et le produit diminue et l'activité de l'eau du solide sera en équilibre avec l'humidité relative de l'air. Au cours de cet équilibre, l'eau migre donc de plus en plus difficilement dans le produit et le transfert interne de matière devient un phénomène limitant. D'autres phénomènes s'y ajoutent et rendent le transfert de matière difficile tel que la concentration des solutés, le développement du phénomène de croûtage et de durcissement à la surface du produit, traduisant ainsi une résistance éventuelle des parois cellulaires [7]. On a observé que les échantillons séchés (pour les 2 variétés) à 45°C avaient une texture plus moelleuse que celles séchées à 55 et 65°C qui ont subi un durcissement particulièrement à la fin de la période de séchage.

D'après la figure 3, la comparaison des courbes de séchage montre que, l'augmentation de la température de l'air de 45 à 65 °C a diminué significativement le temps de séchage. Cette influence est due à l'augmentation de la pression osmotique de l'eau dans le produit. On peut conclure donc qu'il y a une corrélation négative entre la température et le temps de séchage. Ces résultats sont en accord avec les résultats des travaux réalisés sur des produits agroalimentaires tels que la carotte, pomme, banane et datte, pulpe de Betterave etc.

La comparaison des courbes de séchage à différentes vitesses d'air (résultats non montrés) montre que, pour une même température, plus la vitesse de séchage augmente, plus le processus de séchage est accéléré et plus le temps de traitement est faible. Également une augmentation de la vitesse de l'air de 0,5 à 1,6 m/s diminue relativement le temps de séchage à la suite de l'augmentation de la chaleur par convection et le coefficient de transfert de masse entre l'air de séchage et le produit.

L'allure des cinétiques de séchage des deux variétés de tomates est similaire, on remarque que les deux courbes sont non confondu (l'absence de la première phase de séchage caractéristique de la présence de l'eau libre à la surface du produit), pour une même température et même vitesse les tranches de tomates de la deuxième variété séchent plus rapidement que celle de la première variété (20 heures de différence, pour une température de 40°C et une vitesse d'air 1m/s). Ceci est expliqué par la différence de la teneur en eau initiale entre les deux variété et surtout de la nature de l'eau dans le produit. La teneur en eau initiale de la première variété de tomates est de 14,385 kg/kg M.S qui est inférieure à la teneur en eau initiale de la deuxième variété de tomates qui varie de 16,655 à 17,349 kg/kg M.S.

### 3.2. Lissage des courbes de séchage

Les évolutions de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour les différentes conditions de séchage ont été lissées par six modèles choisis parmi les plus utilisés dans la littérature. L'identification des paramètres de chaque modèle et le calcul des paramètres statistiques reflétant la qualité de lissage ont été effectués moyennant le logiciel « Curve Expert 1.4 ».

Les différents modèles ont montré des valeurs très importantes de coefficient de corrélation ( $0,937 \leq r \leq 1$ ) et des valeurs faibles de l'erreur standard ( $0,007 \leq ES \leq 0,238$ ). Ceci est vrai pour les deux variétés, les températures 45, 55 et 65°C et pour vitesses d'air 0,5, 1,2 et 1,6 m/s.

Le modèle présentant les plus fortes valeurs du coefficient de corrélation « r » et les plus faibles valeurs de l'erreur standard « ES » pour les différentes conditions, est le modèle Logarithmique. Il a été choisi alors pour décrire les cinétiques expérimentales pour  $45 \leq T \leq 65^\circ\text{C}$  et  $0,5 \leq v \leq 1,6$  m/s.

Le tableau 2 présente les résultats de l'identification des constantes du modèle Logarithmique pour les deux variétés de tomates séchées à différentes températures et différentes vitesses.

Tableau 2 : Constantes de l'équation de modèle Logarithmique [ $\frac{x}{x_0} = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$ ] identifiées pour les deux variétés et pour les différentes températures et différentes vitesses.

Vitesse (m/s)		Variété 1			Variété 2		
		45°C	55°C	65°C	45°C	55°C	65°C
0,5	a	0,993	1,006	0,993	0,970	1,014	1,028
	b	0,0571	0,073	0,0571	0,123	1,952	0,236
	c	-0,019	-0,035	-0,019	0,013	-0,016	-0,023
1,2	a	0,963	1,047	0,963	0,944	0,954	1,017
	b	0,072	0,217	0,072	0,119	0,156	0,278
	c	-0,039	-0,043	-0,039	-0,002	-0,025	0,056
1,6	a	1,020	0,991	1,020	0,917	1,017	1,008
	b	0,093	0,185	0,093	0,200	0,299	0,381
	c	-0,058	-0,002	-0,058	0,006	-0,023	-0,034

### 3.3. Etablissement de modèle global

A partir des résultats obtenus pour chaque variété (tableau 2), des corrélations linéaires donnant les paramètres (b et c) ont été établies en fonction de la température de séchage ( $b = b_1 \cdot T + b_2$  et  $c = c_1 \cdot T + c_2$ ). On a montré aussi dans une deuxième étape que les pentes ( $b_1$  et  $c_1$ ) et les ordonnées à l'origine ( $b_2$  et  $c_2$ ) sont fonction eux même de la vitesse de l'air (tableau 3).

La figure 3 montre les résultats de lissage donnés par le modèle global établi dans ce travail, pour toutes les températures et une vitesse d'air égale à 0,5 m/s. La figure 3 montre la bonne concordance des résultats de modèle avec les conditions expérimentales, pour les deux variétés de tomate, surtout que le coefficient de corrélation correspondant est important ( $0,965 \leq r \leq 0,991$ ) et l'erreur standard correspondant est faible ( $0,015 \leq ES \leq 0,061$ ).

Tableau 3 : Corrélations donnant les paramètres du modèle Logarithmique lissant toutes les cinétiques de séchage

Constantes	Variété 1	Variété 2
a	1,008	0,986
b	$(0,005 v + 0,001) * T - (0,188 v + 0,006)$	$(0,003 v + 0,004) * T - (0,086 v + 0,102)$
c	$(0,005 v - 0,004) * T - (0,230 v - 0,197)$	$-(0,001 v + 0,002) * T + (0,011 v + 0,090)$

On peut dire alors que le modèle est valable pour toute température située entre 45 et 65°C et toute vitesse d'air située entre 0,5 et 1,6 m/s. Il suffit donc d'entrer la température et la vitesse d'air de séchage pour trouver la courbe de séchage correspondante.

## Conclusion

Notre travail consiste à l'étude théorique et expérimentale du séchage des tomates par convection forcée moyennant un séchoir pilote régulé. Une étude expérimentale est réalisée pour les tomates afin de déterminer la teneur en eau et la vitesse de séchage en fonction du temps du produit pour les températures (45, 55 et 65°C) et pour trois vitesses de séchage (0,5-1,2 et 1,6 m/s). La température et la vitesse de séchage présentent une grande influence sur les cinétiques de séchage des deux variétés de tomates. La comparaison des cinétiques de séchage des deux variétés de tomates montre que les courbes sont non confondu ce qui explique l'absence de l'eau libre qui confirme l'absence de la première phase dans les cinétiques de séchage.

Six modèles mathématiques ont été testés pour le lissage des cinétiques de séchage des tomates. Le modèle Logarithmique a donné la meilleure description des données expérimentales du séchage convectif. Ce choix a été confirmé par l'analyse statistique des données expérimentales.

Un modèle global a été établi afin de simuler les cinétiques de séchage pour toute température située entre 45 et 65°C et toute vitesse d'air située entre 0,5 et 1,6 m/s.

## Références

- [1] W. K. Lewis, The rate of drying of solid materials, Journal of Industry and Engineering Chemical, 13(5), Pages 427-432, 1921.
- [2] Q. Zhang et J.B. Litchfield, An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer, Drying Tech, 9, Pages 383-395, 1991.
- [3] V.T. Karathanos, Determination of water content of dried fruits by drying kinetics, Journal of Food Engineering. 39, Pages 337-344, 1999.
- [4] O. Yaldiz et C. Ertekin, Thin layer solar drying of some vegetables, Drying Technology, 19, Pages 583-596, 2001.
- [5] S. M. Henderson, Progress in developing the thin layer drying equation, Transactions of Americans Society of Agricultural Engineers (ASAE). 17, Pages 1167-1172, 1974.
- [6] C. Y. Wang et R.P. Singh, A single layer drying equation for rough rice, ASAE, Paper n° 3001, 1978.
- [7] C. Bonazzi et J.J. Bimbenet, Séchage des Produits Alimentaires – Matériels et applications. In Techniques de l'Ingénieur Traité Agroalimentaire F 3000, Pages 1-17, 2008.