

## Modélisation de la cinétique de séchage des granulés de farine de mil par la méthode de la courbe caractéristique de séchage

Panel T BASSENE <sup>a</sup>, Salif GAYE <sup>a</sup>, André TALLA <sup>b</sup>, Vincent SAMBOU <sup>a</sup>

<sup>a</sup>-Laboratoire d'Energétique Appliquée, Ecole Supérieure Polytechnique, BP 5085 Dakar-Fann, Dakar, Sénégal

<sup>b</sup>-Laboratoire d'Energétique, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, BP 8390, Yaoundé, Cameroun

<sup>1</sup>*pbassene@hotmail.com*

**Résumé :** La cinétique de séchage des granulés de mil en couche mince a été étudiée au moyen d'une soufflerie à conditions aérauliques et thermiques bien contrôlées. Les expériences sont effectuées à des températures différentes de l'air de séchage (40 °C, 50 °C, 60 °C) et pour des échantillons de diamètre 2,5 mm < d<sub>1</sub> < 3,15 mm et 5 mm < d<sub>2</sub> < 6,30 mm, en utilisant une vitesse d'air de 1 m/s et 2 m/s. Les paramètres caractéristiques du séchage ont été identifiés par la méthode de la Courbe Caractéristique de Séchage (CCS). Les résultats montrent que le modèle semi-empirique élaboré reproduit avec une erreur relative inférieure à 10 % les courbes expérimentales.

**Mots Clés :** séchage, cinétique de séchage, modélisation, Courbe Caractéristique de Séchage (CCS)

### 1. Introduction

Dans le secteur agroalimentaire, de nombreux travaux ont été menés pour optimiser l'opération du séchage. Cette opération consiste à rationaliser à la fois la consommation de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité du produit séché. Le séchage en couche mince a été largement utilisé pour traiter plusieurs produits tel que les peaux d'orange et la pulpe de betterave [1] ; la tomate et la Fraize [2] ; les graines de raisin [3]. Récemment la cinétique de séchage en lit fluidisé de la pulpe d'olive et des graines d'huile de ricin a été étudiée [4,5].

Une connaissance approfondie des paramètres de transfert de chaleur, de masse, la diffusion et le comportement au séchage du produit notamment à sécher sont considérés comme indispensables pour la conception, la simulation et l'optimisation du processus de séchage en utilisant la modélisation mathématique. Il est alors nécessaire d'avoir un modèle précis, capable de prédire les taux d'élimination de l'eau et décrivant le séchage de chaque produit dans les conditions courantes utilisées dans les installations commerciales normales pertinentes.

Cependant le choix d'un modèle *a priori* pour décrire l'intégralité d'une courbe de séchage peut également s'avérer un handicap dans le cas d'un produit présentant différentes phases de séchage. Ces raisons ont poussé de nombreux auteurs [6-8] à opter pour la méthode de la Courbe Caractéristique de Séchage qui caractérise les cinétiques de séchage sans faire l'hypothèse préalable sur la forme.

Ainsi dans cet article, nous nous proposons d'étudier expérimentalement le séchage en couche mince des granulés de farine de mil et de définir une corrélation permettant de retrouver les courbes caractéristiques de séchage du produit.

### 2. Produit et méthodologie

#### 2.1. Granulés de la farine de mil

Les granulés sont préparés à partir de la farine de mil et sont moulus par des moulins classiques. La fabrication du produit consiste à humidifier la farine puis à la rouler à la main afin d'obtenir des grains dont les dimensions dépendent de la qualité du produit recherché. Les tailles des granulés sont obtenues en utilisant un système de tamis.

#### 2.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est une soufflerie à air appelée veine de séchage, qui permet d'avoir un écoulement d'air avec des caractéristiques aérothermiques bien contrôlés et que l'on peut faire varier pour conduire l'étude expérimentale. Le dispositif expérimental comprend :

- un ventilateur axial entraîné par un moteur ;
- une batterie de chauffage comportant des résistances qui permettent de chauffer l'air ;

- une veine d'essais de section  $175 \times 175 \text{ mm}^2$  et de longueur 200 mm ;
- un convergent à l'entrée de la gaine pour mieux canaliser le flux d'air ;
- une centrale d'acquisition de données connectée à un micro-ordinateur doté du logiciel pour la gestion de la centrale, le stockage et le traitement des données ;
- un humidificateur pour le contrôle de l'humidité de l'air ;
- un emplacement pour faire entrer le produit à sécher ;
- une balance électronique de précision  $\pm 0,1\text{g}$  pour le suivi de l'évolution de la masse au cours du séchage ;
- un anémomètre pour le contrôle de la vitesse d'écoulement d'air dans la veine d'essai.

### 2.3 Procédé expérimental

Dans un premier temps, les conditions de séchage souhaitées, à savoir la température  $T$ , l'humidité relative  $HR$  et vitesse de l'air  $V$  sont fixées. Une fois les conditions expérimentales stabilisées, le produit à sécher est posé sur une plaque en aluminium placée parallèlement à l'écoulement de l'air chaud. Pour suivre les pertes de masse du produit au cours du séchage, on a effectué les mesures de poids par intervalle de temps de 5 min. La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau souhaitée.

## 3. Formulation mathématique

Pour comparer les différentes cinétiques de séchage on peut, pour chaque série de conditions opératoires fixées ( $T$ ,  $HR$ ,  $V$ ), représenter le transfert d'humidité entre l'air et le produit à sécher par la courbe décrivant l'évolution de la teneur en eau  $X$  en fonction du temps  $t$ . Les pesées successives au cours du temps permettent de déterminer l'évolution de la masse du produit au cours d'une opération de séchage. Les teneurs en eau sont ensuite déduites en appliquant la relation suivante :

$$X = \frac{m_t}{m_f} (X_f + 1) - 1 \quad (1)$$

On peut également représenter la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau. La vitesse de séchage aux instants intermédiaires  $t_i$ ,  $i$  variant de 1 à  $n-1$  est calculée par la relation :

$$u_i = \frac{1}{2} \left[ \frac{X_{i-1} - X_i}{t_i - t_{i-1}} + \frac{X_i - X_{i+1}}{t_{i+1} - t_i} \right] \quad (2)$$

La teneur en eau réduite  $X_R$  est définie par :

$$X_R = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3)$$

Les valeurs de  $X_e$  utilisées dans cet article sont obtenues à partir des isothermes de sorption du produit. Les vitesses réduites sont obtenues sous la forme:

$$u_r = \frac{u}{u_1} = f(X_r) \quad (4)$$

## 4. Modélisation

Il s'agit de déterminer si, en dépit de la complexité des phénomènes au niveau microscopique (c'est-à-dire dans les pores du milieu) s'il est possible d'obtenir au niveau macroscopique une certaine simplicité d'interprétation des résultats expérimentaux, et un même modèle de comportement de produits étudiés. La modélisation de la courbe de séchage nécessite la détermination de la teneur en eau initial et de la vitesse en phase initiale  $u_1$ .

Cependant il est possible de définir une courbe caractéristique de séchage en utilisant à la place de  $u_1$  une valeur de référence  $u_{ref}$  vitesse en «début de séchage» qui correspond à une humidité  $X_{ref}$  du produit étudié [8]. Dans notre étude nous avons utilisé comme référence le premier point de mesure. A partir des considérations nommées ci-dessus, l'équation (4) peut se mettre sous la forme :

$$u_r = \frac{u}{u_{ref}} = \left[ \frac{X - X_{eq}}{X_{ref} - X_{eq}} \right]^\alpha \quad (5)$$

Il est en général envisagé des fonctions polynomiales ou de type puissance pour représenter les courbes caractéristiques de séchage. Nous avons dans cette partie utilisée les fonctions puissances présentées sous la forme simple :

$$f(X_r) = X_r^\alpha \quad (6)$$

Où l'exposant  $\alpha$  doit être déterminé par identification avec les résultats expérimentaux obtenus. L'équation (4) peut alors s'écrire sous la forme

$$\frac{dX}{dt} = u_1 X_r^\alpha \quad (7)$$

En intégrant l'équation (6) nous obtenons :

$$X(t) = X_{eq} + \left[ (X_{cr} - X_{eq})^{(1-\alpha)} - \frac{(1-\alpha)u_1}{(X_{cr} - X_{eq})^\alpha} t \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (8)$$

Pour identifier la meilleure valeur de  $\alpha$ , caractéristique du produit étudié, nous avons utilisé une méthode analytique. La procédure est la suivante : les points  $(X, u)$  et les valeurs  $u_{ref}$ ,  $X_{ref}$  et  $X_{eq}$  sont connus et permettent de calculer  $u_r$  et  $X_r$  à l'instant  $t$ . On déduit pour chaque point expérimental une valeur  $\alpha_t$  telle que :

$$\alpha_t = \frac{\ln u_r}{\ln X_r} \quad (9)$$

Pour chaque expérience de séchage, à des températures différentes, réalisées sur un produit, la moyenne  $\alpha_m$  est calculée à partir de l'expression :

$$\alpha_m = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \alpha_t \quad (10)$$

La valeur du paramètre  $\alpha$  caractéristique du séchage est donnée par la moyenne des  $\alpha_m$ . La valeur ainsi identifiées pour le produit est donnée dans le tableau 1.

L'erreur relative moyenne de déviation enregistrée sur l'évolution de la teneur en eau entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par l'équation (11) est calculée à partir de l'expression :

$$E(\%) = \frac{100}{p} \sum_{i=1}^p \frac{|X_{exp} - X_{mod}|}{X_{exp}} \quad (11)$$

Tableau 1. Identification des paramètres du produit étudié

Diamètre	Vitesse (m/s)	Température (°C)	$\alpha$	E %
2,5 mm < d <sub>1</sub> < 3,15 mm	1	40	0,65	2,58
	1	50	0,46	2,54
	1	60	0,64	1,93
	2	40	0,78	1,17
	2	50	0,74	3,63
	2	60	0,50	2,27
$\alpha_m$			<b>0,63</b>	
5 mm < d <sub>2</sub> < 6,30 mm	1	40	0,64	5,72
	1	50	0,61	4,58
	1	60	0,59	3,64
	2	40	1,18	2,32
	2	50	1,06	2,32
	2	60	0,92	2,37
$\alpha_m$			<b>0,82</b>	

Les valeurs de E obtenues sont inférieures à 10 % ce qui traduit une bonne simulation des résultats expérimentaux. Compte tenu de l'ajustement du paramètre  $\alpha$ , les figures 1 et 2 montrent que les courbes calculées sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Elles sont obtenues pour une valeur de  $\alpha_m < 1$ . Alors le mécanisme responsable de la migration de l'eau est un mécanisme de diffusion caractéristique des gels homogènes. Le séchage se déroule alors en un temps fini [7,8].

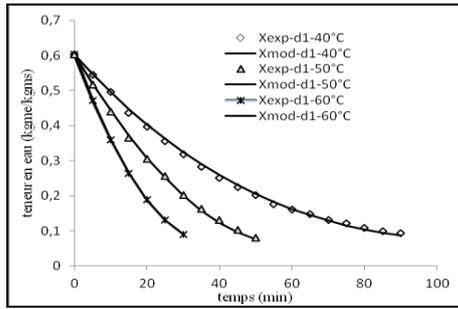


Figure 1 : Comparaison entre les courbes expérimentales et les courbes du modèle pour un échantillon de diamètre  $d_1$  et une vitesse  $V=1\text{ m/s}$

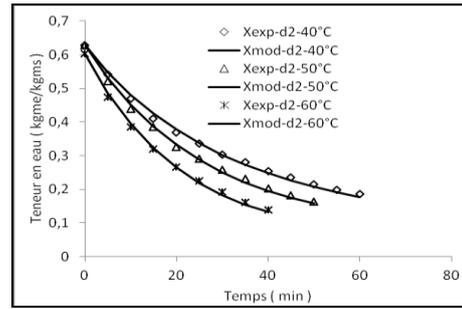


Figure 2 : Comparaison entre les courbes expérimentales et les courbes du modèle pour un échantillon de diamètre  $d_2$  et une vitesse  $V=2\text{ m/s}$

## Conclusion

La cinétique de séchage des granulés de la farine de mil a été étudiée au moyen d'une soufflerie à conditions aérauliques et thermiques bien contrôlées. Les expériences effectuées à des conditions différentes de l'air asséchant, montrent que les courbes de séchage présentent l'allure décroissante et l'absence des phases de mise en température et à allure constante. La courbe caractéristique de séchage (CCS) obtenue permet de généraliser les données de cinétique de séchage des granulés de la farine de mil et d'optimiser le dimensionnement des séchoirs adaptés au séchage des granulés de farine de céréales.

## Nomenclature

Symbole	Nom, unité	Symboles grecs	
E	erreur relative moyenne de déviation sur la teneur en eau du produit (%)	$\alpha$	Coefficient caractéristique du séchage du produit
$m_f$	masse du produit en fin de séchage, kg	Exposant, Indice	
$m_t$	masse du produit à l'instant t, kg	$c_r$	critique
$u_0$	vitesse à l'instant t = 0, $m.s^{-1}$	$eq$	équilibre
$u_n$	vitesse finale, $m.s^{-1}$	$0$	initial
$u_i$	vitesse à l'instant $t_i$ , $m.s^{-1}$	$I$	première phase
$u_l$	vitesse en première phase, $m.s^{-1}$	$m$	moyenne
$u_r$	vitesse réduite	$t$	instant de mesure
$u_{ref}$	vitesse de référence	$r$	réduite
$X_f$	teneur en eau moyenne du produit en base sèche, $kg_{meaur} (kg_{ms})^{-1}$	$f$	anhydre
X	teneur en eau moyenne du produit en base sèche, $kg_{meaur} (kg_{ms})^{-1}$	$i$	numéro d'essai
$X_{cr}$	la teneur en eau critique, $kg_{meaur} (kg_{ms})^{-1}$	$ref$	référence
$X_o$	teneur en eau initial, $kg_{meaur} (kg_{ms})^{-1}$	$p$	nombre de points
$X_{eq}$	teneur en eau d'équilibre, $kg_{meaur} (kg_{ms})^{-1}$	$exp$	expérimental
$X_r$	teneur en eau réduite, $kg_{meaur} (kg_{ms})^{-1}$	$mod$	modèle

## Références

- [1] E. Belahmidi, A. Belghit, A. Mrani, M. Kaoua, Approche expérimentale de la cinétique des produits agro-alimentaires: Application aux peaux d'orange et à la pulpe de betterave, *Revue Générale de Thermique*, pp. 380–381, 444–453, 1993.
- [2] Ibrahim Doymaz, Air-drying characteristics of tomatoes, *Journal of Food Engineering*, pp. 497-503, 2005.
- [3] J.S. Roberts, D.R. Kidd, O.P. Zakour, Drying kinetics of grape seeds, *Journal of Food Engineering*, vol. 89, pp. 460-465, 2008.
- [4] Smail Meziane, Drying kinetics of olive pomace in fluidized bed dryer, *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 1644-1649, 2011.
- [5] M.J. Perea-Flores, V. Garibay-Febles, J.J. Chanona-Pérez, G. Calderon-Dominguez, J.V. Méndez, E. Palacios-Gonzalez, G.F. Gutiérrez-Lopez, Mathematical modeling of castor oil seeds (*Ricinus Communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures, *Industrial Crops and Products*, vol. 38, pp. 64-71, 2012.
- [6] Y. Jannot, A. Talla, Nganhou, J.R. Puigalli, Modeling of Banana Convective Drying by the Drying Characteristic curve (DCC) Method, *Drying Technology*, vol. 22, no. 8, pp. 1949-1968, 2004.
- [7] A. Talla, Y. Jannot, C. Kapseu, J. Nganhou, Etude expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage de fruits tropicaux. Application à la banane et à la mangue, *Sciences des Aliments*, vol. 21, pp. 499-518, 2001.
- [8] C. Ahouannou, Y. Jannot, B. Lips, A. Lallemand, Caractérisation et modélisation du séchage de trois produits tropicaux : manioc, gingembre et gombo, *Sciences des Aliments*, vol. 20, pp. 413-432, 2000.