

Caractérisation du séchage convectif du gombo, influence de la découpe et de ses constituants

Kondia Honoré OUOBA^{1*}, Hélène DESMORIEUX², François ZOUGMORE¹ et Bétaboalé NAON³

¹ Laboratoire des matériaux et Environnement (L.A.M.E.), Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquée (UFR/SEA), Université de Ouagadougou, BP 7021, Burkina Faso

² Laboratoire d'Automatisme et de Génie des Procédés (LAGEP), UCBL1-CNRS UMR 5007-CPE Lyon, Bât.308G, 43 bd du 11 Nov. 1918 Villeurbanne, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon, France

³ Groupe d'Étude et de Recherche en Mécanique Energétique et Techniques Industrielles (GERME-TI), Université Polytechnique de Bobo, BP 1091, Burkina Faso

* Correspondance, courriel : ouobakahonore@yahoo.fr

Résumé

Dans ce papier, le gombo est considéré comme un produit à structure complexe. Il a trois constituants à savoir la peau, les graines et la structure centrale qui n'ont pas le même comportement durant son séchage convectif. La peau est la composante qui réduit considérablement le séchage alors que les graines ont une facilité à sécher. En séchant les échantillons avec différentes formes de découpe, nous pouvons conclure qu'il est mieux de sécher le gombo de manière à ouvrir considérablement sa peau. En fixant la température de séchage à 70°C à convection libre, les coefficients de diffusion calculés sont de $7,54 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $5,8010^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et $2,81 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ respectivement pour les graines, la peau et le gombo entier.

Mots-clés : *séchage convectif, gombo, coefficient de diffusion, forme de découpe, constituants.*

Abstract

Characterization of okra convective drying, influence of okra cutting and its components

In this paper, okra is found to be a complex compound. It has three components, namely the skin, the seeds and the internal material which have not the same behavior during their convective drying. The skin is the component which slows down considerably the drying while seeds have easiness to dry. Drying samples with different forms of sample-cutting, we can conclude that it is better to dry okra by cutting it in the way to have its skin opened at the maximum. Fixing the drying temperature to 70°C at free convective drying, the effective diffusivity was $7.54 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $5.8010^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ and $2.81 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ respectively for seeds, skin and whole okra.

Keywords : *convective drying, okra, effective diffusivity, cut form, components.*

Nomenclature

D_{eff}	: coefficient de diffusion ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
D	: diamètre (m)
D_0	: facteur pré-exponentiel de l'équation d'Arrhenius ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
E_a	: énergie d'activation ($\text{kJ}.\text{mol}^{-1}$)
L	: longueur (m)
m	: masse (kg)
R	: constant des gaz parfait ($\text{kJ}.\text{mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
r	: rayon (m)
R^2	: coefficient de détermination
HR	: humidité relative de l'air, %
t	: temps (s)
T	: température ($^{\circ}\text{C}$)
V	: volume (m^3)
x	: coordonnée cartésienne (m)
X	: teneur en eau ($\text{kg}_e.\text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$)

Indices

c	: cylindre
cr	: critique
d	: diamètre
ms	: matière sèche
eff	: effectif
eq	: équilibre
f	: final
0	: initial ($t=0\text{s}$)
L	: longueur
s	: solide
e	: eau

1. Introduction

Le gombo (*Abelmoschus esculentus*) constitue l'un des condiments les plus consommés dans les pays d'Afrique et d'Asie [1-3]. Il est constitué de trois composantes à savoir la peau, les graines et une matière centrale spongieuse. Les graines ont une teneur en eau de l'ordre de 15-19 %. Sa peau contient des protéines de haute qualité [1] et a une forte teneur en polysaccharides [3]. La production en 2004 était de plus de 4,5 millions de tonnes dans plus de 33 pays avec l'Inde en tête (3,5 million tonnes). En Afrique de l'Ouest, le Nigéria est le plus grand producteur (1, 039,000 t) suivi de la Côte-d'Ivoire et du Ghana. Pour la préservation de la grande production [4], le producteur et/ou consommateur procède à son séchage. Le produit est découpé selon des formes et tailles variables avant d'être exposé pour le séchage (Figure 1). La découpe est généralement opérée manuellement, sans mesures géométriques précises [5], et d'un sécheur à l'autre, la taille et la forme varient. La mauvaise maîtrise des phénomènes de séchage conduit à des produits finis de qualité douteuse. Néanmoins, l'étude menée par Adom et al. [6] a montré que l'emballage en coton permet de conserver au mieux le gombo sec comparativement à ceux en plastic (*Figure 1*). La

maîtrise du séchage du gombo ne peut aboutir sans celle des phénomènes de séchage de ses constituants pris séparément. Ainsi, on peut obtenir un produit sec de qualité acceptable, qui prend en compte les qualités organo-leptiques, odeur et goût notamment dans le domaine alimentaire ainsi que de ses vertus thérapeutiques, avant de penser à sa conservation.

Dans ce travail, nous caractérisons aussi bien le séchage convectif du gombo entier que celui de ses constituants pris séparément. Aussi, nous examinons l'influence de la découpe sur le séchage, afin de trouver la forme qui optimise le séchage. Pour cela, la peau, les graines et la matière centrale sont isolées pour l'estimation de leur comportement face au séchage. Nous considérons la structure du gombo par les différentes formes de découpe (*Figure 1, 2*).



Figure 1 : a) séchage solaire sur un support en plastique b) Emballage du gombo au Burkina Faso.

2. Matériel et méthodes

2.1. Le gombo

Le gombo, de la variété de *Clemson Spineless*, utilisé dans cette étude est acheté dans un marché local du Burkina et transporté en France. D'autres, originaires du Nicaragua, ont été acheté dans les magasins de Lyon, France.

Ils sont de couleur vert-foncées, de forme cylindrique avec une extrémité conique. Le fruit est supporté par un pédoncule qui est impropre à la consommation. De la base (vers le pédoncule) à son sommet, le gombo devient de moins en moins dur et diminue sa teneur en graines. La découpe latérale montre, de l'extérieur vers l'intérieur, une peau ferme de couleur vert-foncée, des graines quasi-sphériques et une structure spongieuse constituant l'axe central du gombo. Entre ces trois constituants il existe des vides qui pourront jouer le rôle de pompe à pression (*Figure 2*). Cette description du gombo vient compliquer la caractérisation du séchage du gombo entier, sans la prise en compte de ses constituants pris séparément.

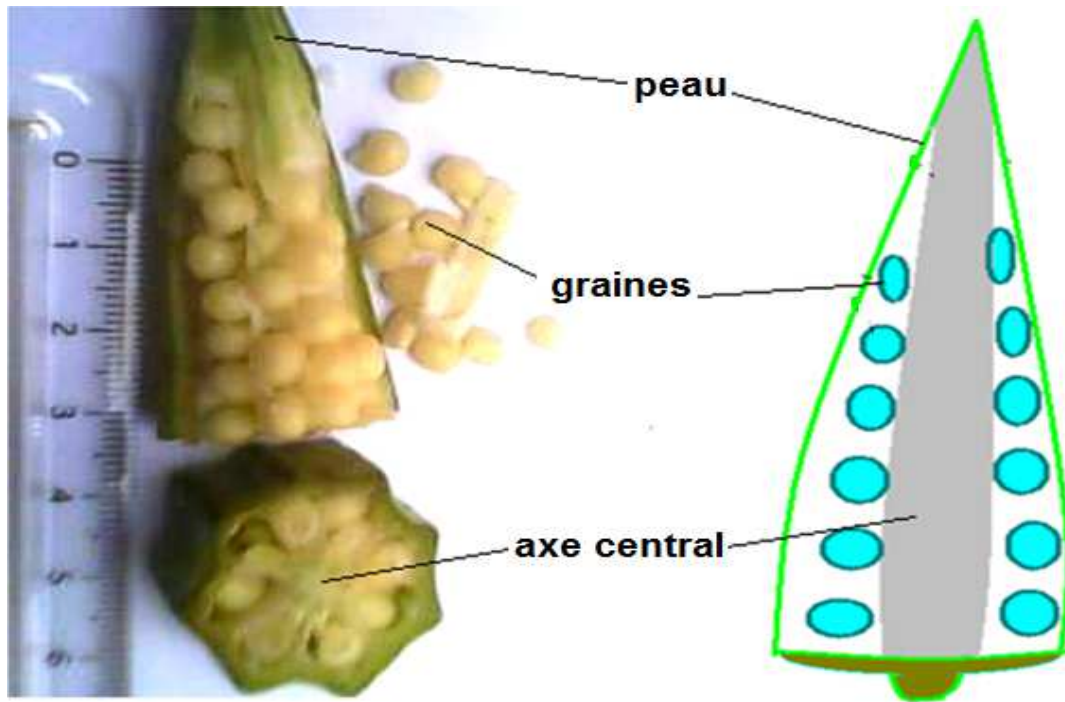


Figure 2 : Arrangement des constituants du gombo dans le gombo frais

2.2. Préparation des échantillons

Le gombo entier a été séché en comparaison aux échantillons découpés sous différentes formes et tailles. Pour optimiser la forme de la découpe, différentes formes ont été étudiées. Cela nous permet de prendre en compte la forme de la découpe dans l'estimation des paramètres et de contribuer à optimiser le séchage pour aboutir à une qualité de séchage acceptable. Premièrement, le gombo est découpé de manière à isoler ses constituants: la peau, les graines et la matière centrale.

A l'aide d'un couteau inoxydable, des échantillons de 5 et de 10mm de long ont été découpés au milieu du gombo afin d'éviter l'écarte de l'état mécanique. Aussi, une découpe a été faite longitudinalement, vu que cette forme est pratiquée par les sécheurs sur le terrain (*Figure 1*).

2.3. Procédures expérimentales

Afin de comprendre l'importance de la forme de la découpe et la contribution des constituants du gombo, nous avons fixé la température à 70°C tout en variant les autres paramètres. Un séchoir convectif (WTF BINDER) a été utilisé pour la caractérisation du séchage. Durant le séchage, le gombo est régulièrement retiré de l'étuve, la masse de l'échantillon est déterminée avec une balance (SARTORIUS, 0.001 g précision, France), et les dimensions mesurées à l'aide d'un micromètre à affichage numérique (MITUTOYO, Japan, $2 \cdot 10^{-5}$ m de précision). Un gombo est totalement ouvert, les constituants séparés et séchés à 70°C. La masse sèche du produit ainsi que celle de ses constituants ont été évaluées en séchant le produit dans une étuve réglée à 70°C pendant 24 h [7]. Les différentes expériences sont résumées dans le *Tableau 1*.

Tableau 1 : Conditions expérimentales

But de la manipulation:	Forme de la découpe	T (°C)	V _{air} (m/s)	HR (-)	Diamètre initial (cm)	Longueur initiale (cm)
Cinétique de séchage	Cylindrique 0,50 cm	70	0	—	1,85	0,50
Cinétique de séchage	Cylindrique 1cm	70	0	—	1,75	1,00
Cinétique de séchage	Longitudinale	70	0	—	—	7,23
Cinétique de séchage et coefficient de diffusion	Gombo entier	70	0	—	1,24	7,52
Cinétique de séchage et coefficient de diffusion	Peau	70	0	—	—	—
Cinétique de séchage et coefficient de diffusion	Graines	70	0	—	0,11-0,23	—
Cinétique de séchage	Matière centrale	70	0	—	0,12	3,02

3. Méthodologie

3.1. Teneur en eau, établissement des cinétiques et teneur en eau critique

La teneur en eau initiale du gombo ainsi que celle de ses constituants sont déterminées par la relation :

$$X_0 = \frac{m_e}{m_s} = \frac{m_0 - m_s}{m_s} \quad (1)$$

où m_e (Kg) est la masse d'eau initialement contenue dans le produit, m_0 (Kg) est la masse initiale de l'échantillon et m_s (Kg) la masse de l'échantillon séché.

La teneur en eau à chaque instant t (s) du séchage est $X(t)$ ($kg_e \cdot kg^{-1}_{ms}$) déterminée à partir des données expérimentales par la formule :

$$X(t) = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \quad (2)$$

où $m(t)$ (Kg) est la masse de l'échantillon à chaque instant t (s) du séchage. Les cinétiques de séchage sont tracées par la variation de $X(t)$ en fonction du temps de séchage. La teneur en eau critique est estimée par la méthode des tangentes à l'origine. Elle consiste à tracer la tangente à la courbe de la cinétique de séchage à l'origine comme l'ont reporté Dissa et al. [8]. La teneur en eau critique est le point de décollage entre la tangente et la courbe.

3-2. Coefficient de diffusion et énergie d'activation

Pour la détermination des coefficients de diffusion, nous considérons le gombo entier comme ayant une forme cylindrique, la peau découpée en lamelle a la forme d'une plaque infinie et les graines sont quasi sphériques. Les solutions de la seconde loi de Fick dépend de la forme de l'échantillon [9,10] : Pour cela, les résultats expérimentaux peuvent être analysés en utilisant l'équation de diffusion de Fick, développée par Crank (1975) [11-13]. En supposant que les transferts sont unidimensionnels, la teneur en eau initialement uniforme dans le produit, sans contraction de la matière solide et un long temps de diffusion [14,15], la solution analytique de l'équation de Fick, selon la forme géométrique de l'échantillon, est donnée par les équations Eq(3-5) [16] :

➤ forme cylindrique :

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{4}{\beta^2} \exp\left(-\frac{\beta^2 D_{eff} t}{r_c^2}\right) \quad (3)$$

➤ forme sphérique :

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r_s^2}\right) \quad (4)$$

➤ plaque infinie :

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi D_{eff} t}{4 L^2}\right) \quad (5)$$

Dans les équations Eq(3)-Eq(5), MR est le taux de teneur en eau, $X_t(\text{kg}_e.\text{kg}^{-1}_{ms})$, la teneur en eau moyenne du produit, $X_0(\text{kg}_e.\text{kg}^{-1}_{ms})$ sa teneur en eau initiale, $X_{eq}(\text{kg}_e.\text{kg}^{-1}_{ms})$ la teneur en eau d'équilibre, $D_{eff}(\text{m}^2.\text{s}^{-1})$ est le coefficient de diffusion effective, r_c , $r_s(\text{m})$ sont respectivement les rayons du cylindre et de la sphère, $L(\text{m})$ la longueur caractéristique de la plaque et $t(\text{s})$ le temps de séchage.

Les coefficients de diffusions sont généralement déterminés en traçant la relation en terme de $\ln(MR)$ en fonction du temps de séchage t . Les coefficients de diffusions sont déterminés par la pente de $\ln(MR)$ en fonction du temps qui a la forme d'un droite. En effet, les équations Eq(3)-Eq(5) [17] peuvent se mettre simplement sous la forme Eq(6) [18,19] :

$$\ln(MR) = A - B.t \quad (6)$$

A et B sont des constantes déduites graphiquement de la droite. B est calculé de la valeur de A et réintroduit dans B pour la détermination du coefficient de diffusion.

Des auteurs ont montré que D_{eff} dépend de la température. Cette dépendance est linéaire en fonction de l'inverse de la température $1/T$ [8,20,21]. Elle se met sous la forme appelée dépendance d'Arrhénius :

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R.T}\right) \quad (7)$$

où $D_0(\text{m}^2.\text{s}^{-1})$, est le facteur pré-exponentiel de l'équation d'Arrhénius, $E_a(\text{kJ}.\text{mol}^{-1})$, est l'énergie d'activation, $T(\text{K})$ la température de l'échantillon, $R(\text{kJ}.\text{mol}^{-1}.\text{K}^{-1})$ la constante des gaz parfaits. Nous considérons, en première approche que le gombo a une forme cylindrique. Dans le but de voir l'influence de la température sur le coefficient de diffusion, nous traçons D_{eff} en fonction de l'inverse de la température $1/T$.

4. Résultats et discussion

4.1. Le coefficient de diffusion

L'appréciation du séchage peut être vue dans le coefficient de diffusion. Plus les transferts sont importants, plus le coefficient de diffusion est élevé. Dans le cas du gombo, les résultats ont montré que ces trois constituants n'ont pas la même facilité à établir les transferts. Le **Tableau 2** regroupe les valeurs des coefficients de diffusion du gombo entier que de ses constituants, pour ce présent travail, comparativement à ces valeurs, sont présentées celles des coefficients de diffusion du gombo ainsi que pour d'autres produits agricoles donnés dans la littérature. Le coefficient de diffusion des graines est relativement plus élevé que celui de la peau, de valeurs respectives de $7,54.10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ et $5,80.10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. Ceci semble indiquer que la peau constitue une barrière qui freine les transferts lors du séchage du gombo. Un fait que ce **Tableau** indique est que le gombo entier a un coefficient de diffusion plus faible que celui de ses constituants. Ce coefficient de même ordre de grandeur que celui de Doymaz [25] est dix fois moindre que celui de ses constituants.

Tableau 2 : *Le coefficient de diffusion du gombo, de ses constituants et d'autres produits*

Produits	$D_{\text{eff}} (\text{m}^2.\text{s}^{-1})$	Références
Oignon et poivron	$0,2.10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ & $10,10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	[22]
Raisin	$9,4.10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	[23]
Pomme de terre	$5,3.10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	[24]
Haricot vert	$9,335.10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	[21]
Gombo entier	$4,28.10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ - $8,30.10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	[25]
Peau de gombo	$5,80.10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	Présent travail
Graine de gombo	$7,54.10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	Présent travail
Gombo entier	$2,8110^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	Présent travail

4.2. Influence de la forme et de la découpe

Le séchage traditionnel en Afrique est généralement pratiqué par les femmes avec différentes tailles et formes de découpe (**Figure 1, 3**). Les mesures ont été effectuées deux à trois fois pour la reproductibilité des résultats, pour le séchage convectif à 70°C . La **Figure 4** montre que la découpe effectuée dans le sens longitudinal en divisant le gombo en quatre sèche mieux que la découpe en tranche d'épaisseur supérieure à 10 mm. Tous les échantillons découpés sèchent mieux que le gombo entier. De ces résultats on peut conclure que le gombo sèche plus vite en le découpant de manière à ouvrir au maximum sa peau. En effet, l'ouverture de la peau évite l'accumulation de la vapeur d'eau dans le gombo qui, par conséquent, augmente la pression, d'une part, et de l'autre permet de renouveler l'air à l'intérieur du gombo favorisant ainsi les transferts. En plus, l'ouverture permet d'exposer tous les constituants du gombo aux meilleures conditions de séchage en même temps qu'il y a augmentation de la surface d'échange air-produit.

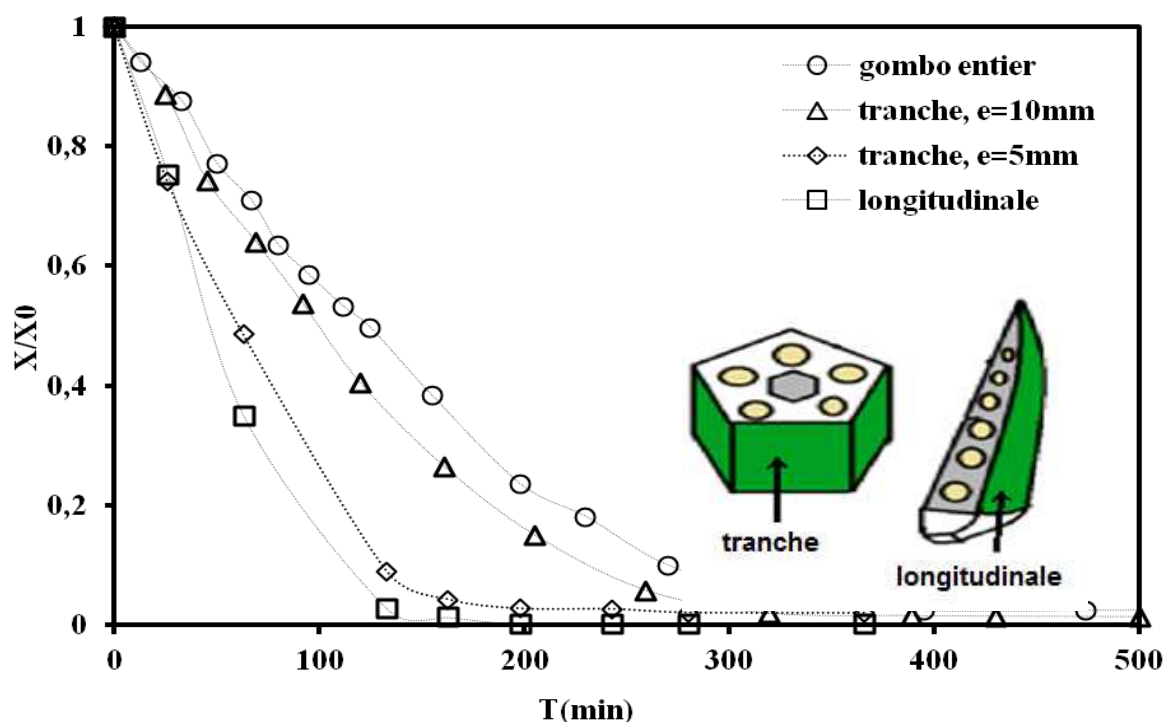


Figure 3 : Influence de la découpe, séchage convectif à 70°C du gombo entier, la découpe en tranche de 5 et 10mm d'épaisseur et la découpe longitudinale en divisant le gombo en quatre (04) parties

Les états critiques de ces différentes formes de découpe sont résumés dans le **Tableau 3**. Les résultats montrent que la découpe à faibles épaisseurs permet d'atteindre plus vite leurs états critiques que les échantillons à grandes épaisseurs ou le gombo entier.

Tableau 3 : Temps et teneur en eau critiques des différentes formes de découpes du gombo et de ses constituants, séchage convectif à 70°C.

	X_0	X_{cr}	X_{cr}/X_0	$t_{cr}(\text{min})$	$t_f(\text{min})$
Découpe longitudinale	6,51	1,95	0,3	65	170
Tranche, e=5mm	5,85	3,8	0,65	45	180
Tranche, e=10mm	4,62	2,91	0,63	70	350
Gombo entier	3,38	2,03	0,6	95	400
Structure interne	5,89	2,95	0,5	25	70
Graines	6,34	1,27	0,2	80	150
Peau	4,44	2	0,45	70	200

Les échantillons en tranche de 5mm et 10mm d'épaisseur atteignent leur état critique t_{cr} à environ en 45 et 70min pour une teneur en eau critique relative X_{cr}/X_0 égale à 0,65 et 0,63 respectivement. Le temps critique et la teneur en eau relative pour la découpe longitudinale sont respectivement de 63min et de 0,3. Quant au gombo entier, ces valeurs sont de 95min et 0,6.

4.3. Contribution des constituants du gombo

En séchant les constituants du gombo (la peau, les grains et la matière centrale) pris séparément à 70°C, les résultats ont montré qu'ils n'ont pas le même comportement face au séchage (**Figure 4**). Chaque courbe de cinétique de séchage a été répétée deux fois pour vérifier la reproductibilité.

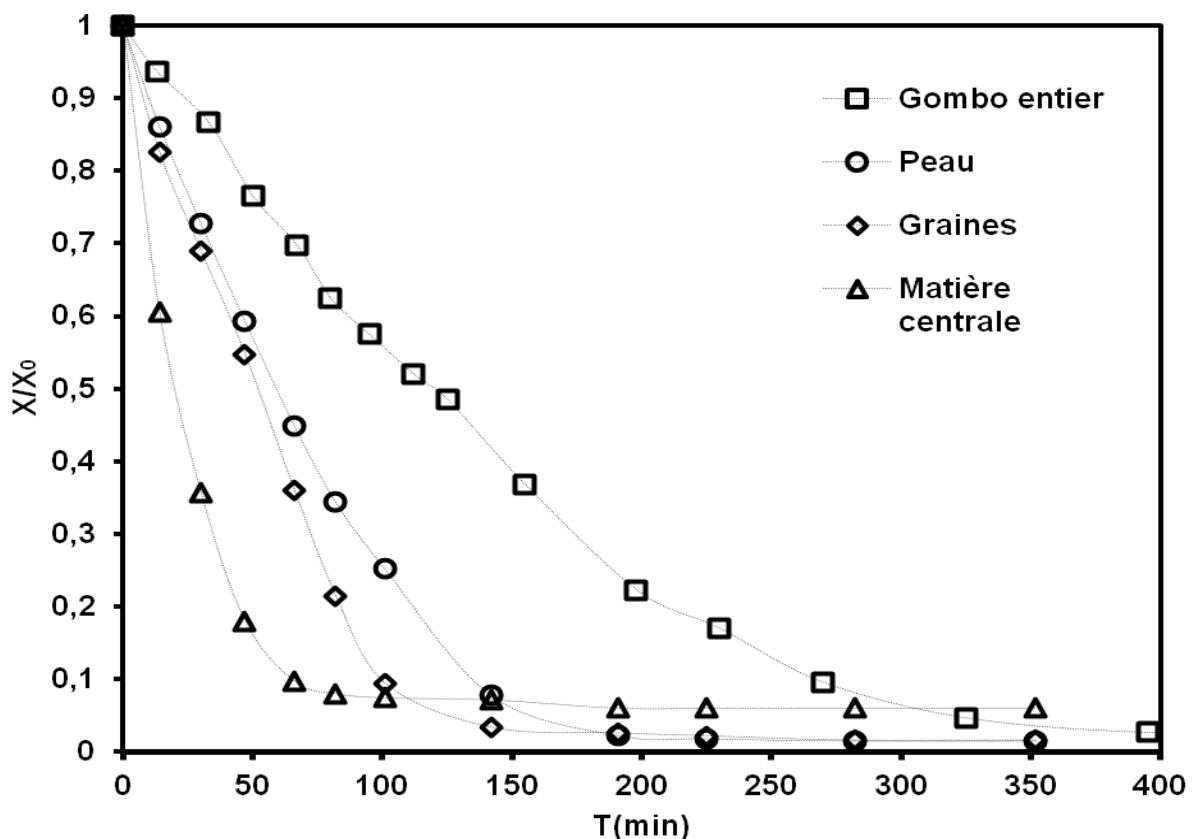


Figure 4 : Influence des trois constituants du gombo sur les courbes de séchage : la peau ($X_0=1,37\pm 0,44Kg_g.Kg_{ms}$), les graines($X_0=2,76\pm 0,96Kg_g.Kg_{ms}$), et la matière centrale ($X_0=1,05\pm 0,79 Kg_g.Kg_{ms}$), séchage convectif, $T=70^\circ C$.

La matière centrale sèche plus vite que les graines. Parmi ces trois constituants, la peau, les grains et de la matière centrale, la peau est celui qui ralentit considérablement le séchage. Nous observons qu'à 70°C à convection libre, que la peau met environ 3/2 du temps de séchage des graines pour atteindre sa teneur en eau finale. Le séchage de la peau met deux fois plus de temps que la matière centrale, soient 70min, 150min et 190min respectivement pour le séchage complet de la matière centrale, des graines et la peau. Cette facilité qu'ont les graines à sécher comparativement à la peau pourrait être intéressante pour ses applications thérapeutiques en particulier dans le cas de certaines maladies cardiovasculaires et les maladies gastriques [2-4], applications où on a besoin de faibles températures et un temps de séchage réduit pour conserver les éléments chimiques ainsi que leurs propriétés. En plus, à l'échelle industrielle, la

différence qui existe entre les temps de séchage des différents constituants doit être prise en compte, en séparant le gombo de tous ses constituants avant son séchage.

La teneur en eau critique a été déterminée à partir des courbes de la **Figure 4**, comme étant la teneur en eau à la fin de la partie quasi linéaire de la courbe. Sur le Tableau 3, la matière centrale atteint sa teneur critique plus vite que les autres constituants. Sa teneur en eau critique relative de $X_{cr}/X_0=0,5$ est atteinte à $t_{cr}=25\text{min}$. Les graines et la peau atteignent leurs teneurs en eau critique qui sont respectivement de 0,45 et 0,2 aux temps critiques respectifs de 70 min et 80min.

5. Conclusion

Le travail présenté dans cet article souligne le caractère complexe du séchage des produits agroalimentaires avec comme exemple le gombo. Dans cette étude, le gombo est décrit comme étant formé de trois constituants de natures différentes ayant des comportements différents face au séchage. En plus, la propriété mécanique du gombo et sa composition chimique rendent difficile la caractérisation du séchage du gombo. A 70°C , le séchage convectif des constituants du gombo révèle que :

- ✓ les constituants sont de natures différentes et se comportent de façon singulière face aux transferts durant le séchage ;
- ✓ la matière centrale présente le séchage le plus rapide, tandis que la peau ralentit considérablement le séchage ;
- ✓ comparativement au gombo entier, le séchage est plus efficace lorsque les constituants sont séchés étant isolés ;
- ✓ le coefficient de diffusion des graines est relativement plus élevé que celui de la peau, de valeurs respectives de $7,54.10^{-9} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ et $2,81.10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. Le gombo entier a un coefficient de diffusion plus élevé que celui de ses constituants.

Ces résultats pourraient être pris en compte lors du séchage des produits agroalimentaires, surtout pour certaines applications thérapeutiques où les éléments chimiques (vitamines ou éléments thermosensibles et volatiles) nécessitent un court temps de séchage et une basse température.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Ambassade de France au Burkina Faso à travers le projet RESEAU pour leur soutien financier.

Références

- [1] - M. Camciuc., M. Deplagne, G. Vilarem, A. Gaset, *Ocra Abelmoschus esculentus L. Moench.) a crop with economic potential for set aside acreage in France, Industrial Crops and Products, Vol. 7 (1998)257–264*
- [2] - S. Avallonea, T.W. E. Tiemtorea, C. Rivierb, S. Trècheb, *Nutritional value of six multi-ingredient sauces from Burkina Faso, Journal of Food Composition and Analysis, Vol. 21 (2008)553– 558*
- [3] - N.Sengkhamparn, L.M.C Sagis, A. Renko de Vries, H. A. Henk Schols, T. Sajjaanantakul, G. J. Alphons, A. G. J. Voragen, *Physicochemical properties of pectins from ocra Abelmoschus esculentus L.) Moench), Food Hydrocolloids, Vol. 24 (2008) 35–41*

- [4] - FAOSTAT (Food and Agricultural Organization of the United Nations). On-line and multilingual database currently covering international statistics, <http://faostat.fao.org/foastat/>, (2008)
- [5] - J. M. Kordylas, *Processing and Preservation of Tropical and Subtropical Foods*, Macmillan Education Ltd, UK. (1991)
- [6] - K. K. Adorn, V. P. Dzagbafia, W. O. Ellis, B. K. Simpsor, *Solar drying of oca-effects of selected package materials on storage stability*, Food Research International, Vol. 29 (1996) 589-593
- [7] - AOAC, (Association of official Chemists) Official Methods of Analysis No.934-06., Washington AC (1990)
- [8] - A.O. Dissa, H. Desmorieux, P.W. Savadogo, B.G. Segda, J. Koulidiati, *Shrinkage, porosity and density behaviour during convective drying of spirulina*, Journal of Food Engineering, Vol. 97 (2010) 410 – 418
- [9] - N. Wang, J. G. Brennan, *Effect of water binding on the drying behavior of potato*, Drying, Vol. 92 (1992) 1350–1359
- [10] - S. Sablani, S. Rahman, N. Al-Habsi, *Moisture diffusivity in foods an overview*. (In A. S. Mujumdar Ed.), Drying Technology in Agriculture and Food Sciences Enfield (2000)35–59
- [11] - G. D. Saravacos, Z. B. Maroulis, *Transport properties of foods*. New York: Marcel Dekker (2001)
- [12] - G. Hashemi, D. Mowla, M. Kazemeini, *Moisture diffusivity and shrinkage of broad beans during bulk dryin in an inert medium fluidized bed dryer assisted by dielectric heating*, Journal of Food and Engineering, Vol. 92 (2009) 331-338
- [13] - J. S., Roberts, C. H., Tong, D. B. Lund, *Drying kinetics and time-temperature distribution of pregelatinized bread*. Journal of Food Science, Vol. 67 (2002) 1080–1087
- [14] - S. S. H. Rizvi, *Thermodynamic properties of foods in dehydration*. In M. A. Rao S. S. H. Rizvi (Eds.), Engineering properties of foods New York: Marcel Dekker, Inc. (1986) 133–214
- [15] - C. O. Rovedo, C. Suarez, P. E. Viollaz, *Drying of foods: Evaluation of a dryingmodel*, Journal of Food Engineering, Vol. 26 (1995)1–12
- [16] - J. Crank, *The mathematics of diffusion* second (ed.). London,UK: Oxford University Press (1975) 69–88
- [17] - L. Hassini, S. Azzouz, R. Peczalski, A. Belghith, *Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage*, Journal of Food Engineering, Vol. 79 (2007) 47–56
- [18] - A. C. Jason, *A study of evaporation and diffusion processes in the drying of fish muscle*. In Fundamental aspects of dehydration of foodstuffs. London: Society of Chemical Industry (1958) 103–135
- [19] - L. Villa-Corrales, J. J. Flores-Prieto, J. P. Xamán-Villaseñor, E. García-Hernández, *Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango*, Journal of Food Engineering, Vol. 98 (2010) 198–206
- [20] - I. Doymaz, *Air-drying characteristics of tomato*, Journal of Food Engineering, Vol. 78 (2007)1291-1297
- [21] - I. Doymaz, *Drying behaviour of green beans*, Journal of Food Engineering, Vol. 69 (2005a) 161–165

- [22] - C. T. Kiranoudis, Z. B. Maroulis, D. Marinos-Kouris, G. D. Saravacos, *Estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. Application to some vegetables*, In ICEF 6 , (Paper No. P.2.13). Chiba, Japan (1993)
- [23] - G. Pavon-Melendez, J. A. Hernandez, M. A. Salgado, M. A. Garcia, *Dimensionnels analysis of the simultaneous heat and mass transfer in food drying*, Journal of Food Engineering, Vol. 51 (2002) 347–353
- [24] - N. P. Zogzas, Z. B. Maroulis, *Effective moisture diffusivity estimation from drying data – A comparison between various methods of analysis*, Drying Technology, Vol. 14 (7–8) (1996) 1543–1573
- [25] - I. Doymaz *Drying characteristics and kinetics of ocra*, Journal of Food Engineering, Vol. 69 (2005b) 275–279.