



The 1st International Conference on Local Resource Exploitation

www.lorexp.org / info@lorexp.org
REF: LOREXP_2021_A1238 Pages: 426–446



Etude des cinétiques de séchage du gombo (*Abelmoschus esculentus* L.) : Influence de la taille des rondelles, de la température de séchage, du prétraitement et de la variété

Study of the drying kinetics of okra (Abelmoschus esculentus L.): Influence of disc size, drying temperature, pretreatment and variety

Jiokap Nono Y.^{1,*}, Telewo N.¹, Nanko N. L.¹, Kapseu C.²

¹ Laboratoire d'Analyses, Simulation et Essais (LASE), Département de Génie Chimique et Environnement, IUT, Université de Ngaoundéré-CAMEROUN, B.P. 455.

² Département de Génie des Procédés et d'Ingénierie, ENSAI, Université de Ngaoundéré, B.P. 455, Ngaoundéré-Cameroun

* Auteur Correspondant : jiokapnonoy@yahoo.fr

RÉSUMÉ :

Le présent travail avait pour objectif d'étudier l'influence de la variété de gombo, de la taille, du mode de prétraitement des échantillons et de la température de séchage sur le coefficient de diffusion de l'eau pendant un séchage par convection. Le travail a porté sur quatre variétés de gombo, prétraités ou non, trois tailles d'échantillon (5, 10 et 15 mm) et trois températures de séchage (40, 50 et 60 °C). Les prétraitements étaient le blanchiment simple, la déshydratation-imprégnation par immersion (DII) et le blanchiment couplé à une déshydratation-imprégnation par immersion (DII-blanchiment). Le séchage a été conduit dans une étuve ventilée. Les cinétiques de séchage obtenues ont été modélisées à l'aide de douze modèles semi-théoriques, par la méthode de régression non linéaire avec comme critères de validation, le coefficient de détermination, le χ^2 et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Le coefficient de diffusion a été estimé à partir des solutions simplifiées de la seconde loi de Fick. L'énergie d'activation a été déterminée à partir de l'équation du coefficient de diffusion en fonction de la température, selon le modèle d'Arrhenius. Cette étude montre que les grandeurs de transfert du séchage dépendent à la fois de la variété, de la taille, du mode de prétraitement et de la température de séchage. Pour une température donnée ou pour une taille fixée, l'évolution du coefficient de diffusion s'écrit sous une forme linéaire en fonction de l'épaisseur ou en fonction de la température, avec une pente positive. Les coefficients de détermination correspondants ont varié entre 0,9830 et 0,9997. Les énergies d'activation des gombos ont eu tendance à augmenter avec l'épaisseur des rondelles et ont présenté une valeur moyenne de $39,60 \pm 0,63 \text{ kJ.mol}^{-1}$. La constante pré-exponentielle d'Arrhenius a été en moyenne de $0,38 \pm 0,34 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Pour atteindre la teneur en eau de conservation du gombo de 0,15 g/g (base sèche), le couple température/taille conférant un temps de séchage minimal a été de 60 °C / 5 mm pour un temps de 250 min. Ce travail montre que les douze modèles testés peuvent être utilisés pour prédire le comportement du gombo en séchage simple au seuil de 5 %. Les cinétiques de séchage du gombo, traité ou non, ont été le mieux décrites par le modèle à deux termes, le modèle de Midilli et al. et le modèle de Henderson & Pabis modifié. Enfin, le blanchiment et la DII ont des effets positifs sur les transferts, car ils permettent de réduire significativement le temps de séchage.

Mots clés : *Abelmoschus esculentus* L., Cinétique de Séchage, Coefficient de diffusion, Énergie d'activation, Prétraitement.

ABSTRACT:

The objective of this work was to study the influence of okra variety, size, sample pretreatment mode and drying temperature on the diffusion coefficient of water during convective drying. The work focused on four varieties of okra, pretreated or not, three sample sizes (5, 10 and 15 mm) and three drying temperatures (40, 50 and 60 °C). The pretreatments were simple bleaching, dehydration-impregnation by immersion (DII) and bleaching coupled with DII. The drying was carried out in a ventilated oven. The drying kinetics obtained were modeled using twelve semi-theoretical models, by the nonlinear regression method with the coefficient of determination, the χ^2 and the mean square error (RMSE) as validation criteria. The diffusion coefficient was estimated from the simplified solutions of Fick's second law. The activation energy was determined from the equation of the diffusion coefficient as a function of temperature, according to the Arrhenius model. This study shows that the drying transfer quantities depend at the same time on the variety, the size, the method of pretreatment and the drying temperature. For a given temperature or for a fixed size, the evolution of the diffusion coefficient is written in a linear form as a function of the thickness or as a function of the temperature, with a positive slope. The corresponding coefficients of determination varied between 0.9830 and 0.9997. Okra activation energies tended to increase with sample thickness and averaged $39.60 \pm 0.63 \text{ kJ.mol}^{-1}$. Arrhenius' pre-exponential constant averaged $0.38 \pm 0.34 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. To achieve the water content for the storage of okra of 0.15 g/g (db), the temperature/size pair conferring a minimum drying time was 60 °C / 5 mm for a time of 250 min. This work shows that the twelve models tested can be used to predict the behavior of okra in simple drying at the 5 % threshold. The drying kinetics of okra, treated or not, have been best described by the two-term model, the model of Midilli et al. and the model of Henderson & Pabis modified. Lastly, bleaching and DII have positive effects on transfers, as they significantly reduce drying time.

Keywords: *Abelmoschus esculentus* L., Drying kinetics, Diffusion coefficient, Activation energy, Pretreatment.

1. INTRODUCTION

Le gombo (*Abelmoschus esculentus* L.) est une plante de la famille des *Malvacées* cultivée dans les régions tropicales et subtropicales, sur des sols très peu exigeants et de pH compris entre 6 et 7. Il existe une très grande diversité de variétés de gombo, chacune d'elles se caractérise par sa couleur, sa taille et sa forme. L'Inde est le premier producteur mondial avec une production évaluée à 6 176 000 tonnes en 2019. Il constitue à lui seul près de 72 % de la production mondiale. Il est suivi du Nigéria avec une production de 1 819 018 tonnes (FAOSTAT, 2021). La production annuelle du Cameroun, 8^{ème} producteur mondial de gombo, est évaluée à 104 216 tonnes en 2019 (FAOSTAT, 2021). Au Cameroun, le gombo est le troisième produit vivrier saisonnier cultivé derrière la tomate (1 215 466 tonnes) et l'oignon (325 196 tonnes) (FAOSTAT, 2021). Ses propriétés nutritionnelles et économiques suscitent un réel engouement chez les jeunes producteurs qui se lancent de plus en plus dans la colonisation de nouvelles terres pour le produire. Les surfaces cultivées de gombo augmentent chaque année de 15 % en moyenne et couvrent 36 975 ha en 2019. La production suit la même évolution. Au Cameroun, ce sont les départements de Ngo-Ketunjia et le Diamaré qui en sont les plus grands producteurs. Malgré tout ce potentiel, aucune industrie du secteur agroindustriel camerounais n'exploite le gombo. En ce qui concerne les exportations, près de 7 600 tonnes de gombo ont été exportées sous la forme brute en 2010, en direction principalement de l'Union Européenne, du Gabon et de la Guinée équatoriale (Minader, 2012).

Le gombo a de nombreuses vertus, il est peu calorique, car 100 g de matière apporte 36 kcal (Sawadogo *et al.*, 2006), il est utilisé en panification comme agent texturant (Acquistucci et Francisci, 2002), dans la confection des salades et des beignets notamment au Burkina-Faso (Acquistucci et Francisci, 2002 ; Sharma *et al.*, 2007), en médecine pour la cicatrisation des lésions internes d'estomac, la prévention de maladies chroniques, pour ses propriétés émoullientes, laxatives et expectorantes, contre l'incontinence urinaire et pour faciliter la digestion (Huang *et al.*, 2009 ; Sawadogo *et al.*, 2006 ; Camciuc *et al.*, 1998). Le gombo est également un puissant anti-oxydant, riche en composés phénoliques (Huang *et al.*, 2009). Au Cameroun, le gombo Paysan de nom vernaculaire gombo « Bamoun » est la variété la plus cultivée et appréciée pour des raisons alimentaire, nutritionnelle, technologique et économique. Il contient environ 87 à 90 % d'eau, 7 à 8 % de glucides, 1,8 % de protéines, les vitamines A, B, C, K et E ainsi que des sels minéraux dont le calcium et du fer (Hamon et Charrier, 1997 ; Hamon, 1988).

Cependant, le gombo est hautement périssable en raison de sa forte teneur en eau et de sa grande activité respiratoire. En plus, à maturité, il devient fibreux et empli de graines dures, perdant ainsi ses propriétés rhéologiques recherchées par les utilisateurs et les consommateurs (Kolawole *et al.* 2008). En période de récolte, les producteurs sont confrontés à une surproduction à court terme et une difficulté à étendre la consommation de cette denrée sur toute l'année. La conservation du gombo se présente donc comme une problématique scientifique et socio-économique majeure. En effet, les pertes post-récoltes pour les produits vivriers au Cameroun ont été estimées à près de 25 % (Ahouannou *et al.*, 2000). Il est donc indispensable, de concevoir des techniques adéquates de conservation de ce légume si profondément ancré dans la culture culinaire camerounaise (Njike, 1997). Le séchage est un moyen approprié pour freiner ces pertes et étendre la consommation aux périodes de non-production (Ahouannou *et al.*, 2000).

Les techniques de séchage du gombo ont déjà fait l'objet de quelques travaux. Ahouannou *et al.* (2000) ont travaillé sur la caractérisation et la modélisation du séchage du manioc, du gingembre et du gombo. Doymaz (2005) a étudié les caractéristiques et les cinétiques de séchage solaire et convectif du gombo. Kuitche *et al.* (2007) ont effectué une modélisation du séchage gombo blanchi et non blanchi. Kolawole *et al.* (2008) de même que Inyang et Ike (1998) ont travaillé sur les effets des procédés de séchage solaire, de réfrigération et de blanchiment sur les propriétés physiques, chimiques, rhéologiques et sensorielles du gombo. Enfin, Jiokap Nono *et al.* (2015) ont montré qu'un prétraitement de DII en prélude au séchage est nécessaire pour obtenir un produit présentant de bonnes propriétés organoleptiques. Il ressort de ces travaux que les données sur le séchage du gombo cultivé au Cameroun en général et dans l'Adamaoua en particulier sont rares dans la littérature. Par ailleurs, compte tenu de la diversité des variétés de gombo, les résultats des divers auteurs sont difficilement exploitables dans le cas du gombo cultivé dans la région de l'Adamaoua. On peut également noter que très peu de travaux mettent l'accent sur l'étude de l'influence des conditions opératoires sur le coefficient de diffusion et l'énergie d'activation lors du séchage du gombo. D'où l'objectif de ce travail qui est d'étudier l'influence de la taille des rondelles, de la température de séchage, du mode de prétraitement et de la variété de gombo de l'Adamaoua, sur les cinétiques de séchage, la variation du coefficient de diffusion et l'énergie d'activation.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Le matériel biologique

Le gombo utilisé pour ce travail est le gombo « Bamoun » du genre *Abelmoschus esculentus* issu du champ d'un agriculteur de la région de l'Adamaoua-Cameroun, dans la localité de Ngaoundéré 3^{ème}. Ce champ est situé dans une zone marécageuse caractérisée par un sol assez fertile et bien drainé. Le semis a été effectué au mois de juillet, pendant les premiers mois de la saison de pluie (Figure 1-a). Les variétés de gombos dont les paramètres de séchage sont déterminés dans ce travail, ont été décrits par Jiokap Nono et al. (2015) (Figure 1-b).

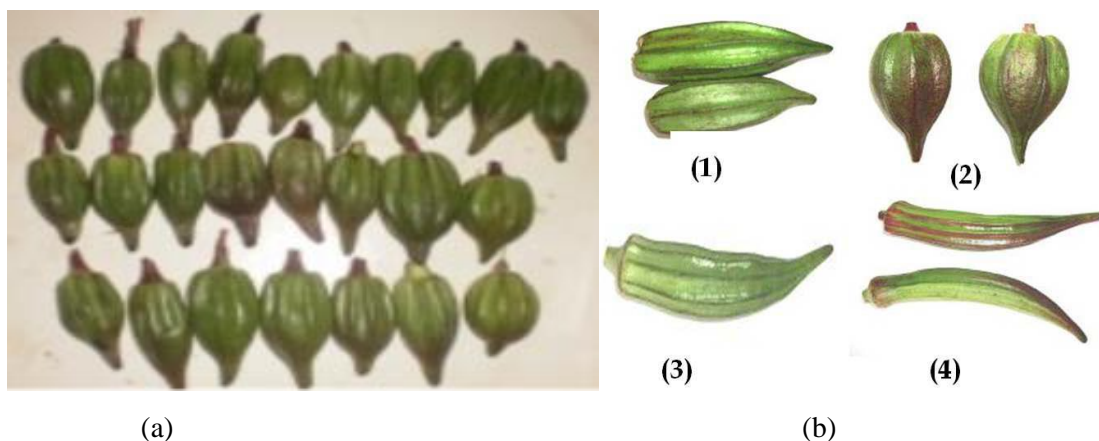


Figure 1 : Morphologie des différentes variétés de gombo étudiées. (a) : Gombo « Bamoun » ; (b) Les variétés de gombos (Jiokap Nono et al., 2015).

2.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'une étuve ventilée de laboratoire de marque Memmert Beschickung loading Model fabriqué en Allemagne. Elle comporte quatre claies en aluminium perforées, un ventilateur et un thermostat. Le dispositif est présenté sur la Figure 2.

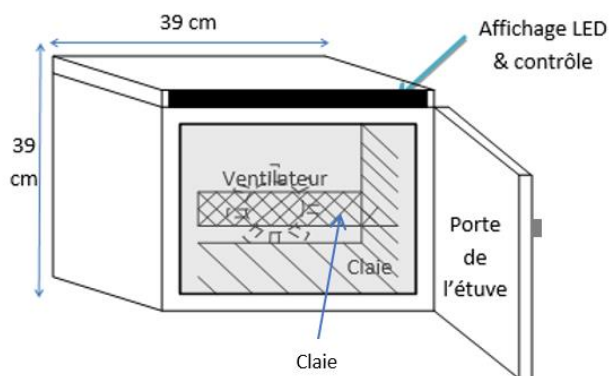


Figure 2 : Schéma de l'étuve Memmert.

2.3. Préparation des échantillons et réalisation des essais

Le gombo a été récolté directement dans les champs, en les détachant manuellement à 1 cm de la base de la tige avec leurs pédoncules et leurs têtes, de manière à ne pas les endommager. Ensuite, un tri a été effectué sur place. Les bons fruits (pas endommagés physiquement et tendres) ont été placés dans des bocaux en verre et acheminés directement au laboratoire dans l'heure qui suivait, afin de débiter les expérimentations. Une fois au laboratoire, le gombo a été

caractérisé sur le plan physique par l'évaluation de sa couleur, sa longueur et de son diamètre maximal. La longueur a été déterminée à l'aide d'un ruban gradué et le diamètre maximal, mesuré à l'aide d'un pied à coulisse électronique de marque MUTUYO fabriqué au Japon. La couleur a été visuellement évaluée. Le gombo ainsi caractérisé a été lavé à l'eau courante, essoré puis découpé à la taille fixée pour l'étude. Les prétraitements de blanchiment et de DII ont été réalisés avec des fruits entiers, selon les travaux de Jiokap Nono et al. (2015). Ensuite, le découpage a été effectué avant le séchage. Trois épaisseurs de rondelles de gombo ont été étudiées ($5 \pm 0,75$ mm, $9,6 \pm 0,75$ mm et $15,41 \pm 0,87$ mm). Trois températures de séchage ont été sélectionnées pour l'étude à savoir 40, 50 et 60 °C. Quatre protocoles ont été définis : le séchage du gombo non prétraité, le séchage du gombo prétraité par blanchiment dans de l'eau à 100 °C pendant 10 secondes (Jiokap Nono et al., 2015), le séchage du gombo prétraité par DII dans une solution de saccharose à 60 °B, à 30 °C et pendant 6 heures (Bchir, 2011) et le séchage du gombo prétraité par le couplage DII/blanchiment selon le protocole de Jiokap Nono et al. (2015). A la fin des différents prétraitements, les gousses sont récupérées et le surplus d'eau éliminé à l'aide du papier absorbant. Le gain en soluté, la perte d'eau et la réduction de poids ont ensuite été calculés (Jiokap Nono et al. (2015)). Pendant le séchage, la masse de l'échantillon a été mesurée à des temps précis, sur 24 heures de séchage. Les essais ont été répétés trois fois et la masse moyenne mesurée a servi pour les calculs ultérieurs. Les cinétiques d'évolution de la teneur en eau réduite (MR) en fonction du temps pour chacune des tailles et pour chaque température ont été analysées.

La teneur en eau réduite (MR) est donnée par l'équation 1 :

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

Où $X(t)$ est la teneur en eau en base sèche du produit à un instant t, et calculée selon l'équation 2 :

$$X(t) = \frac{M_p(t) - MS}{MS} \quad (2)$$

Avec $M_p(t)$ la masse de produit à un instant t et MS la masse sèche du produit. Nous supposons qu'il n'y a pas de perte et que la masse sèche du produit reste constante pendant le séchage. X_e est la teneur en eau d'équilibre. X_e est déterminé par extrapolation à travers la courbe de l'équation 3 :

$$dX/dt = f(X) \quad \text{pour} \quad dX/dt = 0 \quad (3)$$

X_e peut également être obtenu à l'aide de l'isotherme de sorption du produit, aux conditions d'hygrométrie et de température de la fin du séchage. X_c est la teneur en eau critique (valeur au point de transition entre la période à vitesse de séchage constante et la période de ralentissement) (Mujumdar et Menon 1995). Pour les produits sans période de séchage à vitesse constante bien visible, la teneur en eau critique peut être assimilée à la teneur en eau initiale X_0 . C'est le cas pour la plupart des produits biologiques. En faisant l'hypothèse que la teneur en eau finale est proche de zéro, la teneur en eau réduite se calcule finalement suivant l'équation 4 :

$$MR = \frac{X(t) - X_e}{X_c - X_e} \approx \frac{X(t) - X_e}{X_0 - X_e} \approx \frac{X(t)}{X_0} \quad (4)$$

2.4. Modélisation des cinétiques de séchage

Douze modèles de séchage en couche mince, couramment utilisés pour la modélisation des cinétiques de séchage des produits biologiques, ont été testés. Ils sont présentés dans le Tableau 1. Ces modèles empiriques et semi-empiriques ont été mis en oeuvre par plusieurs auteurs (Hii et al., 2009 ; Mohammadpour et al., 2008, Kuitche et al., 2007 ; Simal et al., 2005, Doymaz, 2004, Vega et al., 2007). Les logiciels Excel 2010 et MATLAB R2015b ont été utilisés pour le tracé des cinétiques, les calculs et la régression non linéaire. La méthode de corrélation non linéaire a permis d'obtenir les constantes des différents modèles.

Tableau 1 : Modèles utilisés pour décrire le séchage des produits biologiques.

N°	Nom du modèle	Equation du modèle	Références
1	Newton ou Lewis	$MR = \exp(-k.t)$	Mohammadpour et al. (2008), McMin (2006), Kuitche et al.(2006), Akpinar et al. (2006)
2	Page	$MR = \exp(-k.t^n)$	Hii et al. (2009), Mohammadpour et al. (2008), McMin (2006), Akpinar et al. (2006), Kuitche et al. (2007)
3	Page modifié	$MR = \exp(-k.t^n)$	Mohammadpour et al. (2008), Akpinar et al. (2006)
4	Henderson et Pabis	$MR = a.\exp(-k.t)$	Mohammadpour et al. (2008), McMin (2006), Akpinar et al. (2006), Kuitche et al. (2007)
5	Logarithmique	$MR = a.\exp(-k.t) + c$	Mohammadpour et al. (2008), McMin (2006), Akpinar et al. (2006), Kuitche et al. (2007)
6	Deux termes	$MR = a.\exp(-b.t) + c.\exp(-d.t)$	Hii et al. (2009), Mohammadpour et al.(2008), McMin (2006), Kuitche et al.(2007)
7	Exponentiel à deux termes	$MR = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-k.a.t)$	Mohammadpour et al. (2008), Akpinar et al. (2006)
8	Approche de diffusion	$MR = a.\exp(-kt) + (1-a)\exp(-k.b.t)$	Mohammadpour et al. (2008), McMin (2006), Kuitche et al.(2007)
9	Verma et al.	$MR = a.\exp(-kt) + (1-a).\exp(-j.t)$	Mohammadpour et al. (2008), Akpinar et al. (2006)
10	Henderson et Pabis modifié	$MR = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-j.t) + c.\exp(-q.t)$	Mohammadpour et al. (2008), McMin (2006)
11	Midilli et al.	$MR = a.\exp(-k.t^n) + b.t$	Mohammadpour et al. (2008), McMin (2006), Kuitche et al. (2007)
12	Equation de diffusion de Fick simplifiée (SFFD)	$MR = a.\exp[-c.(t/L^2)]$	Mohammadpour et al. (2008)

Notation : a, b, c, d, k, j, q, n : constantes dans les modèles de séchage ; L : demi-épaisseur d’une tranche (mm) ; MR : Teneur en eau réduite (sans dimension) ; t : Temps (min).

2.5. Détermination du coefficient de diffusion effectif et de l’énergie d’activation

Pendant le séchage des aliments, l’équation de diffusion de Fick (équation 5) est largement utilisée pour modéliser les cinétiques de séchage dans la période de diminution de la vitesse de séchage.

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = -div(-D_m.\vec{\nabla}MR + MR.\vec{v}) \tag{5}$$

Le système étant au repos, cette équation peut s’écrire conformément à l’équation 6 :

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = -div(-D_m.\vec{\nabla}MR) \tag{6}$$

Une solution analytique à cette équation a été donnée dans la littérature (équation 7, 8 et 9) pour les géométries cartésiennes, cylindriques et sphériques, avec des hypothèses de transfert d’humidité uniquement par diffusion (phase de diminution de la vitesse de séchage), le rétrécissement négligeable, la température de séchage et le coefficient de diffusion constants (Crank, 1975).

$$MR = \frac{X(t)-X_e}{X_0-X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cdot \exp\left[-\frac{D_{eff} \cdot (2n-1)^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{4 \cdot L^2}\right] \tag{7}$$

$$MR = \frac{X(t)-X_e}{X_c-X_e} \approx \frac{X(t)-X_e}{X_0-X_e} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{B_n^2} \cdot \exp\left[-B_n^2 \cdot \frac{D_{eff} \cdot t}{r^2}\right] \tag{8}$$

$$MR = \frac{X(t)-X_e}{X_0-X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot \exp\left[-\frac{D_{eff} \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{r^2}\right] \tag{9}$$

L est la dimension caractéristique (épaisseur ou demi-épaisseur) de la plaque selon la position de l’axe de symétrie pendant les transferts.

B_n est la racine de l’équation de Bessel de première espèce, d’ordre zéro : $J_0(B_n) = 0$

r est le rayon du cylindre ou de la sphère.

Pour toutes les cinétiques, nous supposons que la diffusion est le principal mécanisme mis en jeu pendant le transport de l’humidité vers la surface du produit. Plusieurs auteurs ont montré que pour des temps de séchage long, le premier

terme de ces séries est suffisant pour déterminer les coefficients de diffusion effectif. Ces équations s'écrivent comme indiqué dans le Tableau 2 :

Tableau 2 : Premiers termes de la solution de la seconde loi de Fick, en fonction du système de coordonnées.

Système de coordonnées	Premier terme	Forme linéaire
Cartésien	$MR = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left[-\frac{D_{eff} \cdot \pi^2 \cdot t}{4 \cdot L^2}\right]$	$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{D_{eff} \cdot \pi^2 \cdot t}{4 \cdot L^2}$
Cylindrique	$MR = \frac{4}{B_1^2} \cdot \exp\left[-\frac{D_{eff} \cdot B_1^2 \cdot t}{r^2}\right]$	$\ln(MR) = \ln\left(\frac{4}{B_1^2}\right) - \frac{D_{eff} \cdot B_1^2 \cdot t}{r^2}$
Sphérique	$MR = \frac{6}{\pi^2} \cdot \exp\left[-\frac{D_{eff} \cdot \pi^2 \cdot t}{r^2}\right]$	$\ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \frac{D_{eff} \cdot \pi^2 \cdot t}{r^2}$

Les formes linéaires permettent, à travers la pente et l'ordonnée à l'origine (pour le cas du système cylindrique) d'avoir accès aux coefficients de diffusion effectif. Lors du séchage des rondelles de gombo, plusieurs auteurs ont utilisé l'expression en coordonnées sphériques pour la détermination du coefficient de diffusion (Doymaz, 2004 ; Kuitche et al., 2007). En effet, les gombos découpés et disposés dans un flux d'air chaud ressemblent plus à des sphères qu'à des cylindres infinis. De plus, pour des rondelles ayant un même diamètre de cylindre, il convient de considérer une nouvelle dimension caractéristique qui prendrait en compte l'épaisseur de la rondelle. Le calcul du coefficient de diffusion a donc été effectué en considérant le premier terme de la solution de la seconde loi de Fick en coordonnées sphérique, sous la forme linéarisée de l'équation 9 et en utilisant la dimension caractéristique de l'équation 10 :

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \frac{D_{eff} \cdot \pi^2 \cdot t}{l_c^2} \tag{10}$$

$$l_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{(d+h)}{2} \tag{11}$$

Où l_c , d et h sont respectivement la dimension caractéristique de transfert par diffusion, le diamètre et l'épaisseur de la rondelle.

La dépendance à la température de la diffusivité effective a été modélisée par l'équation d'Arrhenius (équation 12) et la linéarisation a donné accès à l'énergie d'activation pour chaque épaisseur des rondelles (équation 13).

$$D_{eff} = D_0 \cdot \exp\left[-\frac{E_a}{R \cdot T}\right] \tag{12}$$

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \left(\frac{E_a}{R}\right) \cdot \left(\frac{1}{T}\right) \tag{13}$$

Dans les équations 12 et 13, R est la constante des gaz parfaits ($R=8.31 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$), E_a est l'énergie d'activation pour la diffusion de l'eau en J.mol^{-1} , T est la température de séchage en kelvin (K) et D_0 (en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) est le facteur pré-exponentiel d'Arrhenius, qui représente le coefficient de diffusion effectif pour une température infinie.

2.6. Analyses statistiques

Les paramètres statistiques ayant servi pour la validation des modèles sont le coefficient de détermination (R^2), le chi2 réduit (χ^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) respectivement présenté par les équations 14, 15 et 16.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{i,exp} - X_{i,pre})^2}{\sum_{i=1}^n \left(X_{i,exp} - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{i,exp}\right)\right)^2} \tag{14}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{exp,i} - X_{pre,i})^2}{N-n} \tag{15}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{i,exp} - X_{i,pre})^2\right]^{1/2} \tag{16}$$

$X_{i,exp}$ est la grandeur expérimentale du $i^{\text{ème}}$ point et $X_{i,pre}$ est la grandeur du $i^{\text{ème}}$ point, prédite par le modèle.

Le RMSE a été défini comme la fonction coût à minimiser lors de l'ajustement des paramètres des modèles. Le meilleur modèle est celui présentant une valeur de R^2 plus élevée (proche de 1), un χ^2 plus faible (proche de zéro) et un RMSE plus faible (proche de zéro).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Caractérisation physique de la matière première

Les éléments évalués dans cette partie sont le diamètre maximal, la longueur et la couleur des gombos traités. Les gombos traités ont une couleur vert foncé avec des pigments rouges (Figure 1-a), un diamètre moyen et une longueur moyenne sur un échantillon de 146 gombos, de $(2,85 \pm 0,5)$ cm et $(6,15 \pm 1,19)$ cm respectivement. La teneur en eau en base sèche des gombos « Bamoun » a été de 966,1 %, soit de 90,62 % en base humide.

3.2. Influence de la taille et de la température de séchage sur les cinétiques de séchage

Les figures 3, 4 et 5 présentent respectivement la superposition des cinétiques de séchage des rondelles de gombo « Bamoun » de 5 mm, 10 mm et 15 mm d'épaisseur, aux températures de 40 °C, 50 °C et 60 °C.

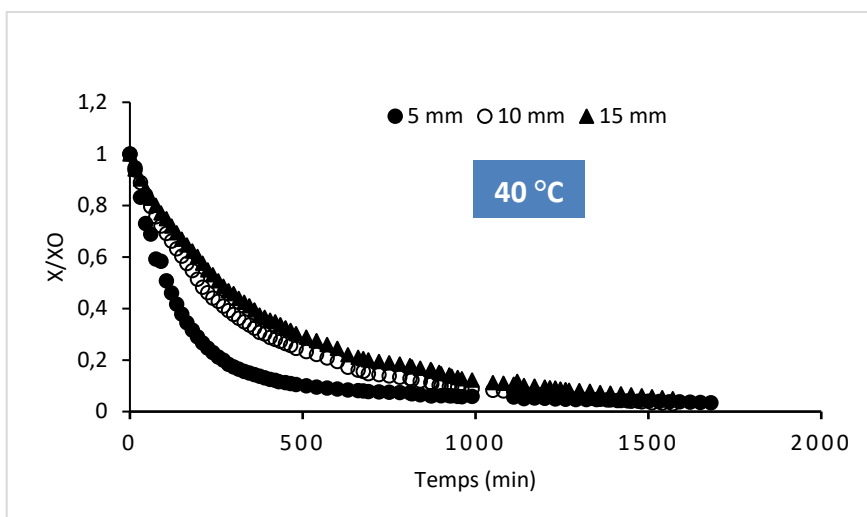


Figure 3 : Evolution de la teneur en eau réduite pour les différentes tailles à 40 °C

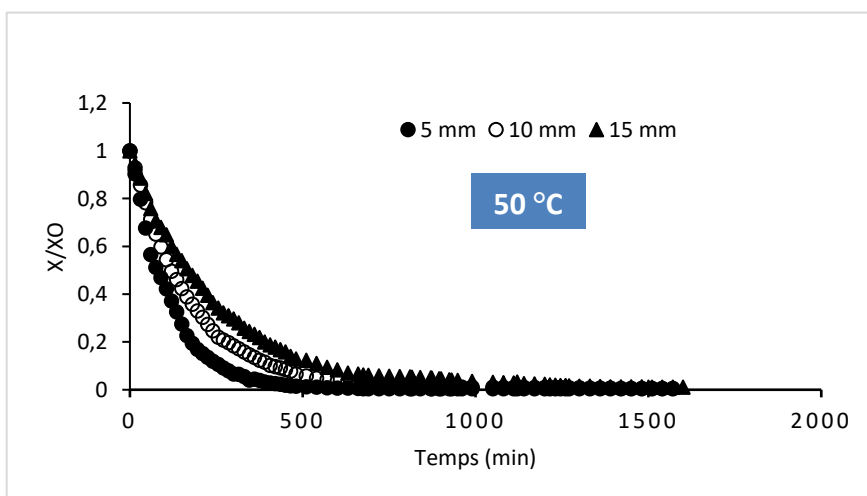


Figure 4 : Evolution de la teneur en eau réduite pour les différentes tailles à 50 °C

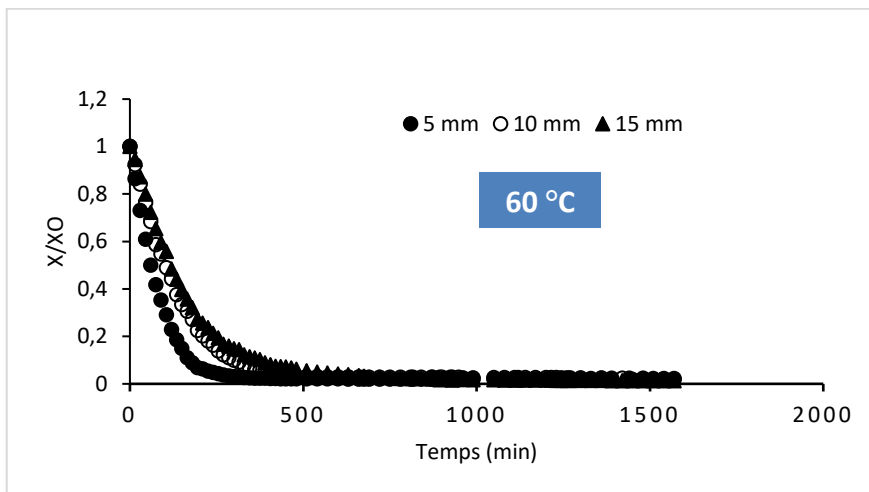


Figure 5 : Evolution de la teneur en eau réduite pour les différentes tailles à 60 °C

L'analyse des courbes montre que le séchage des rondelles de gombo s'effectue dans la période de décroissance de la vitesse de séchage. Ce constat est mieux visualisé sur les figures 6 (a, b et c) et 7 (a, b et c), qui présentent la vitesse de séchage des rondelles en fonction du temps, pour les différentes épaisseurs et différentes températures. Il n'est pas observé de phase de mise en température du produit, cette phase serait très rapide et non perceptible expérimentalement. On constate que la période de séchage à vitesse constante est inexistante. Des tendances similaires ont été observées lors du séchage du gombo (Kolawole et al., 2008 ; Doymaz, 2005, Ahouannou et al., 2000 ; Kuitche et al., 2007), ou d'autres légumes tels que la carotte (Doymaz, 2004), le gingembre et le manioc (Ahouannou et al., 2000) et le cardon (Medjoudj et Zidoune, 2008). Pour chaque température étudiée, la valeur absolue de la pente à l'origine des courbes est d'autant plus grande que l'épaisseur des rondelles est petite, indiquant que le séchage est d'autant plus rapide que la taille des rondelles est petite. L'écart observé entre les courbes est d'autant plus grand que l'épaisseur du produit diminue. Ce comportement se justifierait par le fait que le séchage étant principalement gouvernée par le phénomène de diffusion de l'eau, le flux de transfert tel que décrit par la première loi de FICK, est directement proportionnel à la surface spécifique d'échange et au gradient de pression partielle de vapeur d'eau. Une réduction de la taille permet d'augmenter la surface spécifique d'échange et donc le flux de transfert d'eau vers l'extérieur d'une masse donnée de produit, d'où un séchage plus rapide.

Pour toutes les températures étudiées, toutes les courbes de vitesse de séchage en fonction du temps, présentent un point caractéristique, caractérisé par une inversion de l'ordre d'évolution des différentes courbes. Pour les courbes de vitesse présentant une concavité initiale, ce point est localisé au niveau du point d'inflexion. En considérant la température de 40 °C, cette inversion se produit à environ 200 min pour toutes les épaisseurs des rondelles de gombo (Figure 6), dès que la vitesse de séchage est autour de 1,5 g.g⁻¹.min⁻¹. Cette évolution pourrait s'expliquer par le fait que pendant les premières heures du séchage, c'est de l'eau très faiblement liée qui est éliminée, car il n'y a pas de vitesse de séchage à allure constante, dont la présence indique habituellement la phase d'élimination d'eau libre d'un matériau. Par la suite, l'élimination de la fraction d'eau moyennement liée ou de plus en plus liée est toujours plus difficile que celle de la fraction très faiblement ou faiblement liée. En effet, l'eau moyennement ou fortement liée établit des liaisons avec les molécules du produit, et son élimination nécessite, en plus de l'énergie d'évaporation de l'eau, de l'énergie pour rompre ces liaisons (Kemene Dapabko et al, 2021). Par ailleurs, le chemin de l'eau depuis le front d'évaporation jusqu'à la surface du produit devenant de plus en plus grand pendant le séchage, l'éventuel transport avec l'eau, des solutés solubles dans l'eau et s'accumulant progressivement au niveau des pores, et l'éventuelle modification structurale des cellules du gombo, pourraient expliquer ce ralentissement. Le temps de 200 min de séchage à 40 °C, peut donc être considéré comme un temps critique ou seuil ou temps de transition entre les deux phases d'élimination d'eau très faiblement liée et de celle moyennement ou fortement liée. Pour cette température de séchage de 40 °C, le temps nécessaire pour atteindre la teneur en eau de stabilité microbiologique, correspondant à une activité de l'eau de 0,6 (soit 15 g/100 g de matière sèche), obtenue à partir de l'isotherme de sorption du gombo à 40 °C (Kemene Dapabko et al., 2021), est en moyenne de 1250, 1500 et 1600 min, respectivement pour les épaisseurs de 5, 10 et 15 mm. Ces temps étant différents, ce résultat indique que l'épaisseur des rondelles aurait une influence non négligeable dans la deuxième partie de cette période de ralentissement.

L'élimination de l'eau liée dans cette deuxième phase serait d'autant plus lente que l'épaisseur des rondelles est grande.

Les Figures 6b et 6c montrent l'influence de la taille sur les vitesses de séchage aux températures de 50 °C et 60 °C. Toutes les courbes présentent des tendances similaires de celles observées à 40 °C. Cependant les temps nécessaires pour atteindre la teneur en eau de stabilité microbiologique sont plus courts. Cela est également visible à travers les vitesses initiales de séchage qui sont plus grandes pour chacune des épaisseurs. Le temps critique pour l'inversion des évolutions des vitesses de séchage sont également plus petits et sont de 195 min et 100 min respectivement pour les températures de 50 °C et 60 °C. L'inversion se produit également à partir d'une vitesse de séchage plus grande, et respectivement de 1,5 g.g⁻¹.min⁻¹ et 3 g.g⁻¹.min⁻¹ pour les températures de 50 et 60 °C. Ces différences sont essentiellement dues à l'augmentation de la température qui a pour conséquence d'accélérer les transferts. Des comportements apparentés ont été présentés par Medjoudj et Zidoune (2008) lors du séchage de cardon.

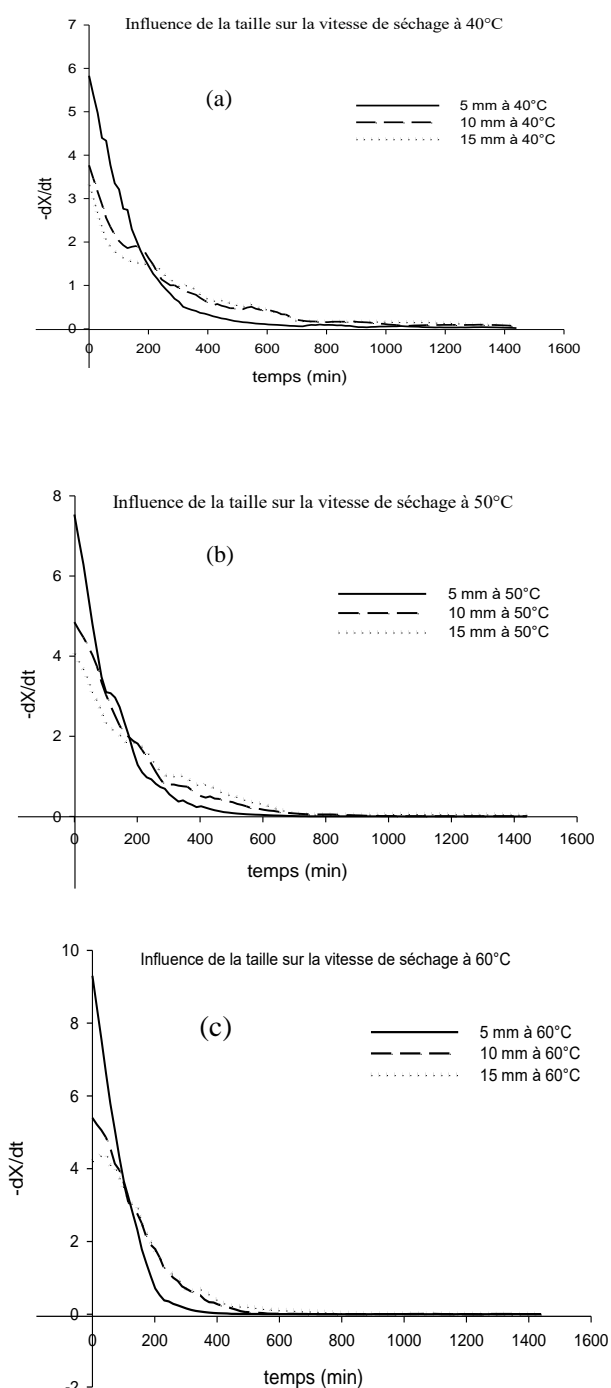


Figure 6 : Influence de la taille sur les vitesses de séchage.

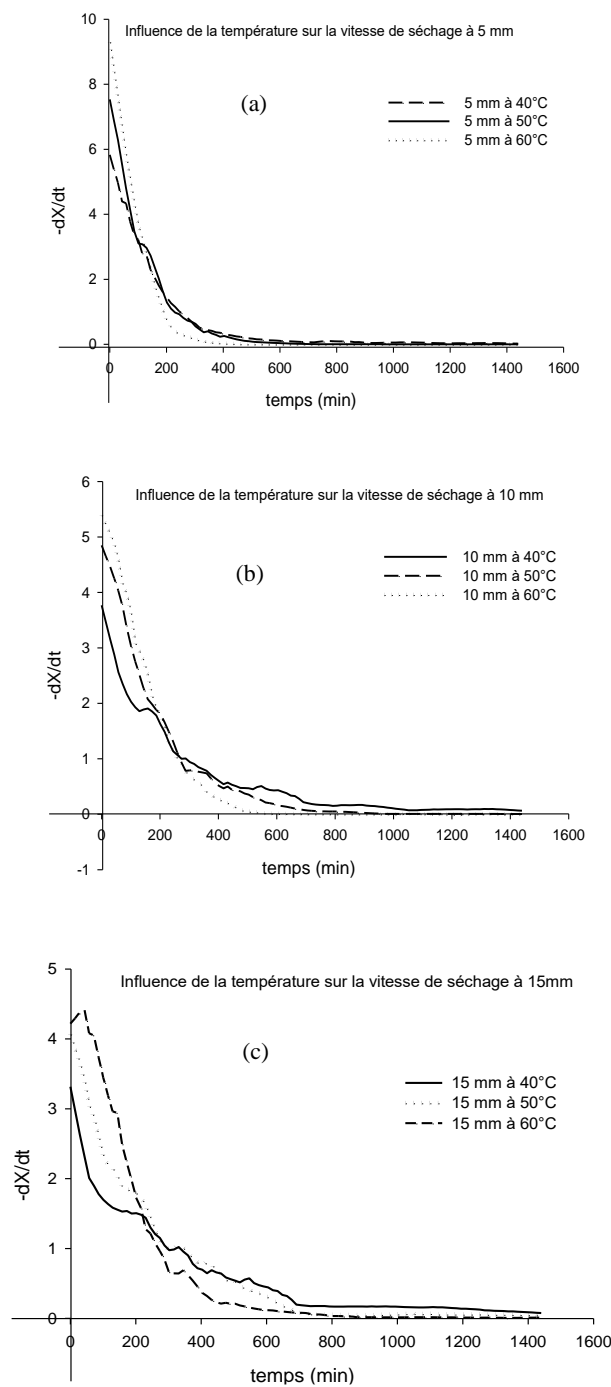


Figure 7 : Influence de la température sur la vitesse de séchage.

Les cinétiques de séchage du gombo « Bamoun » et les vitesses de séchage à différentes températures (40, 50 et 60 °C) et pour les épaisseurs de gombo de 5 mm, 10 mm et 15 mm sont présentées sur les figures 8 à 10 et les figures 7(a, b et c).

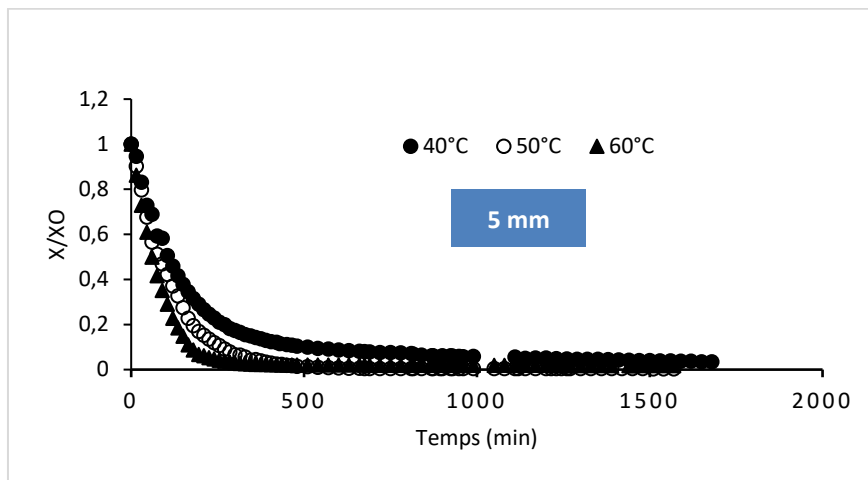


Figure 8 : Evolution de la teneur en eau réduite à différentes températures, pour l'épaisseur 5 mm.

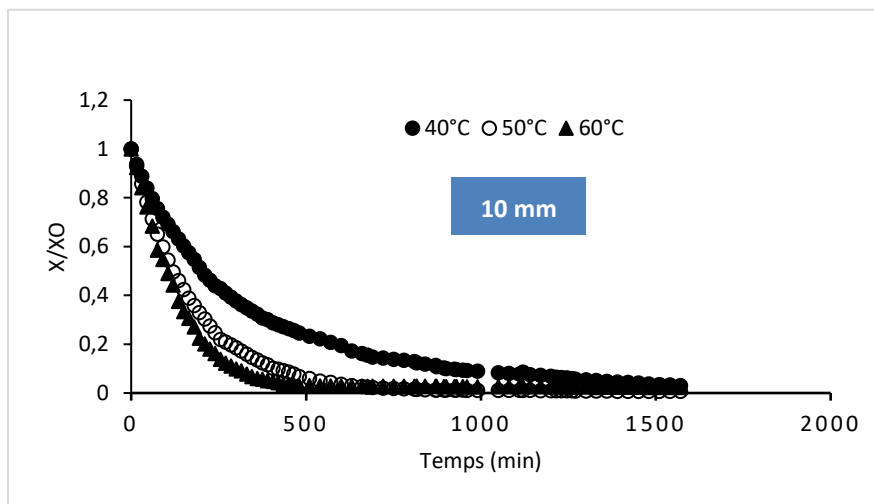


Figure 9 : Evolution de la teneur en eau réduite à différentes températures, pour l'épaisseur 10 mm.

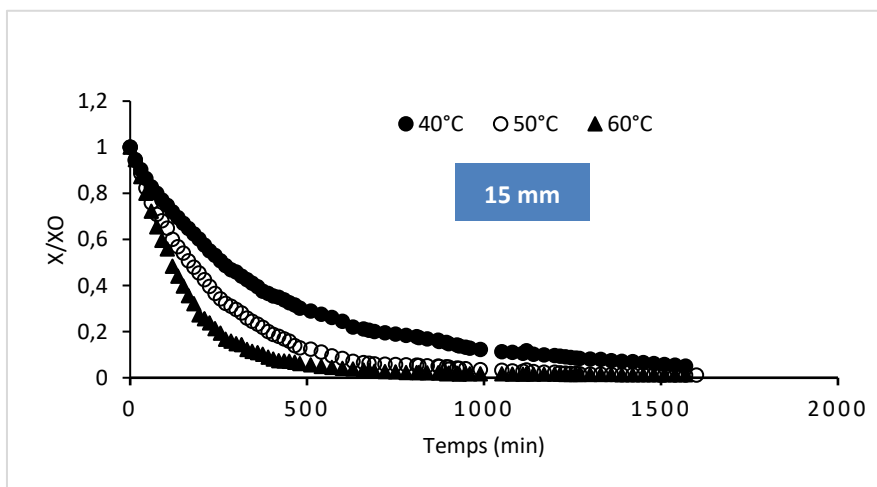


Figure 10 : Evolution de la teneur en eau réduite à différentes températures, pour l'épaisseur 15 mm.

Les courbes d'évolution de la vitesse en fonction de la température (Figures 7 (a, b et c)) présentent également un temps critique d'inversion du sens de l'évolution en fonction de la température. Ce temps est d'autant plus grand que l'épaisseur des rondelles est grande. Pour les épaisseurs de 5, 10 et 15 mm, ce temps critique est respectivement de 100, 210 et 250 minutes et les vitesses de séchage correspondant à ces points critiques sont respectivement de 3 g.g⁻¹.min⁻¹, 1,8 g.g⁻¹.min⁻¹ et 1,5 g.g⁻¹.min⁻¹. Les résultats obtenus montrent que la taille et la température n'influencent pas de la même manière le point critique. En faisant varier l'épaisseur, la vitesse critique est la plus grande à 60 °C et en faisant varier la température, la vitesse critique est la plus grande pour l'épaisseur des rondelles de 5 mm. Le séchage étant un couplage des phénomènes de transferts thermique et de matière, l'on pourrait penser que ces phénomènes ont chacun une prédominance en fonction du paramètre que l'on fait varier. Sur cette base, une variation de l'épaisseur ferait ressortir l'influence du transfert de matière sur la vitesse de séchage alors qu'une variation de la température ferait ressortir l'influence du transfert d'énergie thermique.

En somme, les figures 6 et 7 montrent que le séchage est d'autant plus rapide que la taille des rondelles est faible et la température de l'air élevée. Ce résultat corrobore celui de Doymaz (2004) et Kuitche et al. (2006). Cependant, il serait nécessaire de veiller à bien réguler le système d'approvisionnement en énergie thermique, car les températures très élevées exposeront le produit au croûtage ainsi qu'aux dégradations organoleptiques et nutritionnelles. Dans le domaine expérimental étudié, l'épaisseur des rondelles de 5 mm et la température de 60 °C permettent d'obtenir la plus grande vitesse moyenne de séchage (7 g/g.min) dans la zone d'élimination de l'eau très faiblement liée, et le temps le plus court pour atteindre la teneur en eau de conservation du gombo, de 0,15 g/g (base sèche). Le couple 5 mm / 60 °C peut donc être considéré comme adéquat pour le séchage du gombo « Bamoun ». Le récapitulatif des résultats est donné dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Récapitulatif du couple vitesses moyenne de séchage (en g/g.min) dans la phase de séchage avant le point critique et le temps (en minutes) pour atteindre la teneur en eau de conservation du gombo, de 0,15 g/g (base sèche).

Épaisseur des rondelles	Température de séchage					
	40 °C		50 °C		60 °C	
	v (g/g.min)	t (min)	v (g/g.min)	t (min)	v (g/g.min)	t (min)
5 mm	4	1250	7	400	7	250
10 mm	2	1500	4	600	5	500
15 mm	2	1600	3	1000	4	600

Des résultats qui précèdent, la taille de 5 mm et la température de 60 °C ont été retenues pour le séchage convectif du gombo après la DII.

3.3. Influence de la forme de l'échantillon et du prétraitement par DII

Les essais préliminaires avec trois solutions de DII (solution de saccharose, solution de chlorure de sodium ou solution mixte) et des formes de gombos entières ou découpées en rondelles, montrent que la maximisation de la perte d'eau et la minimisation du gain en soluté sont obtenus en traitant les gombos sous la forme entière, dans une solution simple de saccharose à 60 °B pendant 6 heures et à la température de 30 °C. Dans ces conditions, la perte d'eau, le gain en soluté et la réduction de poids sont respectivement de 50,31 ; 32,65 et 30,24 g/100g. Les gombos ainsi traités sont ensuite découpés (5 mm d'épaisseur) avant de procéder au séchage à la température de 60 °C. La Figure 11 compare la cinétique de séchage des rondelles d'épaisseur 5 mm et à 60 °C avec ou sans DII et la figure 12 présente l'influence de la DII sur la vitesse de séchage.

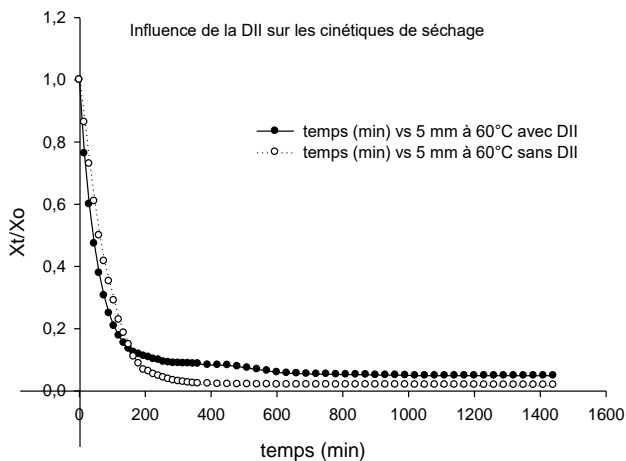


Figure 11 : Influence de la DII sur le séchage du gombo

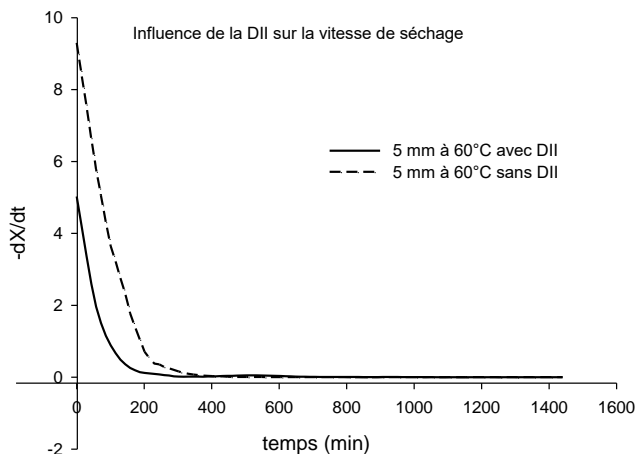


Figure 12 : Influence de la DII sur la vitesse de séchage

Les figures 11 et 12 montrent que le séchage des gombos prétraités par DII ou non se déroule dans la phase de vitesse décroissante et il existe une zone de séchage rapide et une zone de séchage plus lente avec formation d'un plateau marquant la fin du séchage. Pendant tout le séchage, la vitesse d'élimination d'eau du gombo non prétraité reste toujours supérieure à celle du gombo prétraité par DII. Ce comportement s'expliquerait par le fait que l'eau présente dans le gombo prétraité soit davantage liée au support et demanderait plus d'énergie pour son élimination. Toutefois, la vitesse de séchage s'annule en premier pour le gombo prétraité, notamment à environ 200 min, alors que ce temps est d'environ 325 min pour le gombo non prétraité. Soit une réduction du temps de séchage de 38,5 % par rapport au temps de séchage sans prétraitement. Des résultats similaires ont été obtenus par Jiokap Nono et al. (2015) lors du séchage de quatre variétés de gombos camerounais, collectés dans la localité de Ngaoundéré-Cameroun.

3.4. Modélisation des cinétiques de séchage du gombo

Le Tableau 4 présente les résultats de modélisation des cinétiques de gombos découpés, non prétraités. Les résultats de la modélisation de la cinétique de séchage des rondelles de 5 mm d'épaisseur à 60 °C après un traitement de DII sont présentés dans le Tableau 5.

L'ensemble des résultats de modélisation des cinétiques de séchage du gombo « Bamoun » (Tableau 4) montre que des douze modèles étudiés, le modèle à deux termes, le modèle de Midilli et al et le modèle de Henderson & Pabis modifié sont les trois modèles qui décrivent le mieux le comportement du gombo « Bamoun » pendant le séchage. En effet, ils possèdent le coefficient de détermination le plus élevé, compris entre 0,9985 et 0,9998, le Chi2 le plus petit compris entre $1,447 \cdot 10^{-5}$ et $9,314 \cdot 10^{-5}$ et le RMSE le plus faible, compris entre 0,00362 et 0,00935. Des résultats similaires ont été obtenus lors de la modélisation des cinétiques de séchage des pistaches (Mohammadpour et al., 2008), des prunes (Doymaz, 2005) et du gombo (Kuitche et al., 2007).

Il ressort du Tableau 5 que la cinétique de séchage à 60 °C des rondelles d'épaisseur 5 mm prétraitées par DII, est bien décrite par le modèle d'Henderson et Pabis modifié. En effet, il possède le coefficient de détermination le plus élevé de 0,9985, un Chi2 et un RMSE les plus petits et respectivement de $8,43167 \cdot 10^{-5}$ et de 0,0087. Il est également intéressant de noter que, pour la même température de séchage de 60 °C et pour la même épaisseur, le modèle décrivant le mieux la cinétique de séchage est différent selon que le gombo est prétraité ou pas. Ce résultat montre que la DII influence effectivement le comportement du gombo lors du séchage.

Des trois meilleurs modèles identifiés, le modèle de Henderson & Pabis modifié a présenté les meilleures performances, pour le séchage à 50 °C des rondelles de 10 mm d'épaisseur. Les cinétiques des trois meilleurs modèles ainsi que les conditions opératoires sont présentées sur la Figure 13 pour le gombo prétraité ou non. Le Tableau 6 présente les valeurs des constantes des modèles obtenues.

Tableau 4 : Résultats de modélisation des cinétiques de séchage des rondelles de gombo non prétraités pour les différentes épaisseurs et températures de séchage.

Nom du modèle	5 mm à 40 °C			5 mm à 50 °C			5 mm à 60 °C		
	R^2	χ^2	$RMSE$	R^2	χ^2	$RMSE$	R^2	χ^2	$RMSE$
Newton ou Lewis	0,9903	0,00181034	0,04221949	0,9987	7,4843.10 ⁻⁰⁵	0,00858436	0,9955	0,00032178	0,01779983
Page	0,9838	0,00111541	0,03287998	0,9988	6,7651.10 ⁻⁰⁵	0,00809752	0,9981	0,00027154	0,01622301
Page modifié	0,9834	0,00111596	0,03340603	0,9988	6,8002.10 ⁻⁰⁵	0,0082463	0,9981	0,00027154	0,01647858
Henderson et Pabis	0,9858	0,00174908	0,04117359	0,9988	6,7757.10 ⁻⁰⁵	0,00810386	0,9964	0,00030015	0,01705626
Logarithmique	0,9971	0,00015531	0,01217145	0,9988	6,3153.10 ⁻⁰⁵	0,00776132	0,9972	0,00012296	0,01082983
Deux termes	0,9989	6,03884.10⁻⁰⁵	0,007528094	0,9988	6,41881.10 ⁻⁰⁵	0,007761315	0,9972	0,000124976	0,010829829
Exponentiel à deux termes	0,9894	0,00113305	0,0331389	0,9987	7,0279.10 ⁻⁰⁵	0,0082533	0,9983	0,00027185	0,01623227
Approche de diffusion	0,9986	8,02912.10 ⁻⁰⁵	0,008751313	0,9989	6,30065.10 ⁻⁰⁵	0,007752323	0,9968	0,000169385	0,012710924
Verma et al.	0,9986	8,16424.10 ⁻⁰⁵	0,008824639	0,9989	6,30065.10 ⁻⁰⁵	0,007752323	0,9968	0,000169385	0,012710924
Henderson et Pabis modifié	0,9989	6,24355.10 ⁻⁰⁵	0,007528094	0,9988	6,63639.10 ⁻⁰⁵	0,007761315	0,9972	0,000129212	0,010829829
Midilli et al.	0,9948	0,00028806	0,01644191	0,9989	6,3316.10⁻⁰⁵	0,00770843	0,9988	5,8273.10⁻⁰⁵	0,00739506
SFFD	0,9852	0,00177586	0,04115695	0,9988	6,8811.10 ⁻⁰⁵	0,00810157	0,9964	0,00030491	0,01705397

Nom du modèle	10 mm à 40 °C			10 mm à 50 °C			10 mm à 60 °C		
	R^2	χ^2	$RMSE$	R^2	χ^2	$RMSE$	R^2	χ^2	$RMSE$
Newton ou Lewis	0,9937	0,0016199	0,03993724	0,9996	5,348.10 ⁻⁰⁵	0,00725652	0,9943	0,00044305	0,02088627
Page	0,9954	0,00032258	0,01768205	0,9995	5,3209.10 ⁻⁰⁵	0,00718133	0,9972	0,00035829	0,01863515
Page modifié	0,9948	0,00033389	0,01827279	0,9995	5,1056.10 ⁻⁰⁵	0,00714532	0,9973	0,00035721	0,01889998
Henderson et Pabis	0,9633	0,02273388	0,14843981	0,9996	5,2825.10 ⁻⁰⁵	0,0071554	0,9960	0,00038618	0,01934676
Logarithmique	0,9988	7,6566.10 ⁻⁰⁵	0,008545907	0,9997	1,5283.10 ⁻⁰⁵	0,00381804	0,9970	0,00017906	0,01306901
Deux termes	0,9996	2,56028.10⁻⁰⁵	0,004901763	0,9997	1,5402.10 ⁻⁰⁵	0,003801871	0,9970	0,000329106	0,017574217
Exponentiel à deux termes	0,9965	0,00041603	0,02008052	0,9994	4,2217.10 ⁻⁰⁵	0,00639674	0,9977	0,00036291	0,01875494
Approche de diffusion	0,9996	2,96954.10 ⁻⁰⁵	0,005322106	0,9997	1,81205.10 ⁻⁰⁵	0,004157427	0,9964	0,000286471	0,016530247
Verma et al.	0,9996	2,72959.10 ⁻⁰⁵	0,00510256	0,9997	1,81205.10 ⁻⁰⁵	0,004157427	0,9964	0,000286471	0,016530247
Henderson et Pabis modifié	0,9996	3,79033.10⁻⁰⁵	0,005865542	0,9997	1,44715.10⁻⁰⁵	0,003624317	0,9970	0,000188168	0,013069008
Midilli et al.	0,9992	5,4026.10⁻⁰⁵	0,00712046	0,9997	1,7412.10 ⁻⁰⁵	0,00404228	0,9993	4,4187.10⁻⁰⁵	0,006439542
SFFD	0,9872	0,00117278	0,0334462	0,9995	5,3338.10 ⁻⁰⁵	0,00713279	0,9960	0,0003924	0,01934652

Nom du modèle	15 mm à 40 °C			15 mm à 50 °C			15 mm à 60 °C		
	R^2	χ^2	$RMSE$	R^2	χ^2	$RMSE$	R^2	χ^2	$RMSE$
Newton ou Lewis	0,9930	0,00161641	0,03989413	0,9983	0,0002593	0,01597835	0,9964	0,00029861	0,01714677
Page	0,9947	0,0003535	0,01851003	0,9977	0,00020369	0,01405077	0,9978	0,00026595	0,01605505
Page modifié	0,9949	0,00035555	0,01885597	0,9976	0,000204	0,01428292	0,9978	0,00026418	0,01625358
Henderson et Pabis	0,9878	0,00112556	0,03302924	0,9976	0,00025073	0,01558898	0,9975	0,00023946	0,01523448
Logarithmique	0,9990	6,5511.10 ⁻⁰⁵	0,00790491	0,9991	6,4083.10 ⁻⁰⁵	0,00781827	0,9983	0,00010641	0,01007475
Deux termes	0,9992	5,063.10⁻⁰⁵	0,006893059	0,9991	6,51336.10 ⁻⁰⁵	0,00781827	0,9983	0,000108156	0,01007475
Exponentiel à deux termes	0,9959	0,00038013	0,01919458	0,9980	0,00015993	0,01245034	0,9970	0,00028557	0,01663679
Approche de diffusion	0,9992	5,79989.10 ⁻⁰⁵	0,007437878	0,9991	6,52284.10 ⁻⁰⁵	0,007887828	0,9985	0,000208139	0,014090155
Verma et al.	0,9992	5,40104.10 ⁻⁰⁵	0,007177579	0,9991	6,52284.10 ⁻⁰⁵	0,007887829	0,9985	0,000208351	0,014097342
Henderson et Pabis modifié	0,9993	7,15787.10 ⁻⁰⁵	0,008060487	0,9991	6,73415.10 ⁻⁰⁵	0,00781827	0,9983	0,000111823	0,01007475
Midilli et al.	0,9988	8,3155.10⁻⁰⁵	0,00883388	0,9991	6,2104.10⁻⁰⁵	0,00763425	0,9986	9,314.10⁻⁰⁵	0,00934926
SFFD	0,9864	0,00111879	0,03266736	0,9978	0,00025262	0,01552305	0,9977	0,00024196	0,01519187

Tableau 5 : Résultats de modélisation des cinétiques de séchage des rondelles de gombo prétraités par DII, puis découpés en rondelles (5 mm d'épaisseur) avant d'être séchées à 40 °C.

Nom du modèle	Constantes									R ²	χ ²	RMSE
	k (min ⁻¹)	n (-)	a (-)	b (-)	c (-)	d (min ⁻¹)	f (m ² min ⁻¹)	j (min ⁻¹)	q (min ⁻¹)			
Newton ou Lewis	0,0142									0,9842	0,0038	0,0610
Page	0,0951	0,5685								0,9687	0,0019	0,0431
Page modifié	0,0159	0,5685								0,9685	0,0019	0,0430
Henderson et Pabis	0,0127		0,9184							0,9745	0,0037	0,0595
Logarithmique	0,0173		0,9185		0,0627					0,9902	0,0003	0,0179
Deux termes			0,8958	0,0195	0,1018	0,0007				0,9984	9,8.10 ⁻⁰⁵	0,0095
Exponentiel à deux termes	0,0327		0,3147							0,9846	0,0032	0,0555
Approche de diffusion	0,0196		0,8980	0,0340						0,9982	8,5.10 ⁻⁰⁵	0,0090
Verma et al.	0,0007		0,1020					0,0076		0,9983	0,0001	0,0096
Henderson et Pabis modifié	0,0203		0,8760	0,0419	0,0831			9,90.10⁻¹⁴	0,0022	0,9985	8,4.10 ⁻⁰⁵	0,0087
Midilli et al.	0,0593	0,6875	1,0295	4,98.10 ⁻⁵						0,9804	0,0008	0,0269
SFFD			0,9184				0,3182			0,9747	0,0037	0,0595

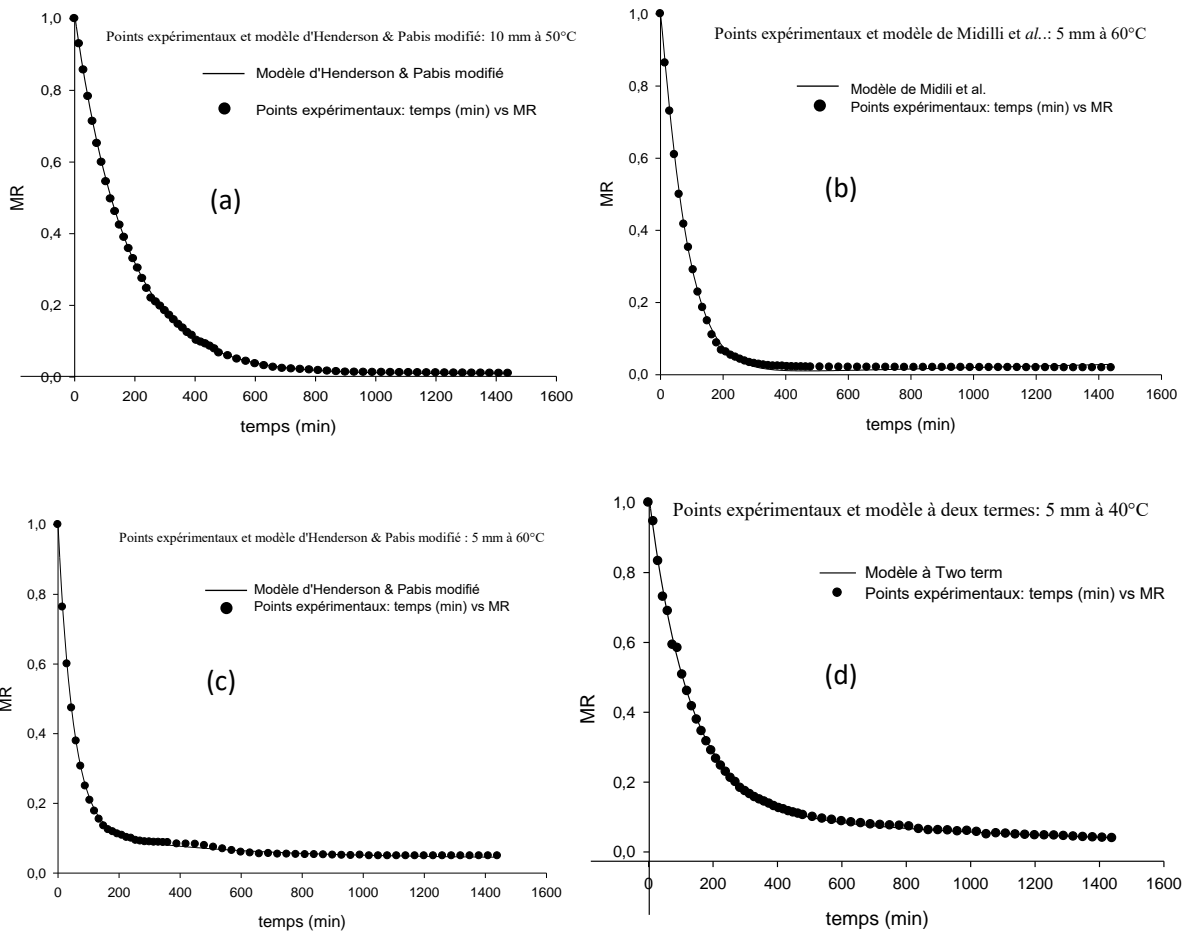


Figure 13 : Modélisation des cinétiques de séchage du gombo, les meilleurs modèles et les conditions opératoires correspondantes. (a) : 10 mm et 50 °C ; (b) : 5 mm et 60 °C ; (c) : 5 mm et 60 °C avec DII et (d) : 5 mm et 40 °C.

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des valeurs des constantes des différents modèles ayant le mieux respecté les critères de validation.

Tailles	Meilleurs Modèles	Constantes du modèle						
		<i>Modèles obtenus à la température de 40 °C sans prétraitement</i>						
		a (-)	b (-)	c (-)	d (min ⁻¹)			
5 mm	Deux termes	0,9030	0,0080	0,1216	0,0008			
10 mm	Deux termes	0,7548	0,0045	0,2369	0,0009			
15 mm	Deux termes	0,8031	0,0033	0,1868	0,0005			
		<i>Modèles obtenus à la température de 50 °C sans prétraitement</i>						
		a (-)	b (-)	c (-)	j (min ⁻¹)	k (min ⁻¹)	n (-)	q (min ⁻¹)
5 mm	Midilli et al	1,0071	4,172.10 ⁻⁶			0,0079	1,0237	
10 mm	Henderson & Pabis modifié	0,0973	0,0090	0,9040	4,363.10 ⁻¹²	0,0078		0,0057
15 mm	Midilli et al.	0,9979	2,068.10 ⁻⁵			0,0043	0,9968	
		<i>Modèles obtenus à la température de 60 °C</i>						
		a (-)	b (-)	c (-)	j (min ⁻¹)	k (min ⁻¹)	n (-)	q (min ⁻¹)
5 mm	Midilli et al	1,0010	1,985.10 ⁻⁵			0,0073	1,112	
5 mm avec DII	Henderson & Pabis modifié	0,8760	0,0419	0,0831	9,897.10 ⁻¹⁴	0,0203		0,0022
10 mm	Midilli et al	1,0030	2,474.10 ⁻⁵			0,0039	1,1234	
15 mm	Midilli et al.	1,0227	1,751.10 ⁻⁵			0,0048	1,0546	

3.5. Evolution de l'énergie d'activation en fonction de la température

Pour une épaisseur donnée, la détermination de l'énergie d'activation nécessite le calcul du coefficient de diffusion à diverses températures. Compte tenu des solutions de Crank (1975) sous la forme linéarisée présentées dans le tableau 2, qui fixent la valeur de la pente à l'origine ($\ln 8/\pi^2 = -0,498$) pour les coordonnées sphériques et ($\ln 8/\pi^2 = -0,21$) pour les coordonnées cartésiennes), compte tenu du fait que la valeur initiale expérimentale de $\ln(MR)$ est égale à 0 pour toutes les expériences (car à l'instant initial, le chemin à parcourir est entier et $MR=1$), on constate que la solution de Fick en coordonnées sphérique sous-estime le coefficient de diffusion et fournit des paramètres statistiques de mauvaise qualité. La solution en coordonnées cartésiennes apporte une meilleure description et a été considérée pour la détermination des coefficients de diffusion effectif. Les résultats obtenus à l'issue de la régression non linéaire sur MATLAB R2015b sont présentés dans le Tableau 7. La plupart des courbes de $-\ln(MR)$ en fonction du temps ont présenté une rupture de pente, avec une pente plus élevée dans la première période de ralentissement, comme illustré sur la figure 14 pour le cas des rondelles de 10 mm d'épaisseur. On constate sur cette figure, que la durée de la première phase de ralentissement est d'autant plus courte que la température est élevée. En effet, la vitesse de transfert d'eau étant plus grande à haute température, le temps nécessaire pour atteindre l'eau plus fortement liée est plus court. La diminution du coefficient de diffusion dans le temps et plus particulièrement entre la première et la deuxième phase pourrait être lié à la modification de la structure des gombos au cours du temps et aux propriétés de l'eau qui diffuse. Certains travaux présentent des résultats contraires, tels que ceux de Velić et al. (2004) qui, lors du séchage des pommes, obtiennent un coefficient de diffusion dans la deuxième phase de ralentissement 1,6 fois plus grand que celui obtenu en première phase. Ils déduisent que le coefficient de diffusion serait proportionnel à la température de l'échantillon pendant le séchage.

Le Tableau 7 montre que, pour une épaisseur donnée, le coefficient de diffusion augmente avec la température de séchage, conformément à la figure 15 et aux équations (17), (18) et (19). Des résultats similaires ont été trouvés par Doymaz (2005). En outre, pour une température de séchage donnée, le coefficient de diffusion augmente avec l'épaisseur des rondelles, selon les équations (20), (21) et (22). Dans le domaine expérimental étudié, les coefficients de diffusion des rondelles de gombo varient entre $1,2501.10^{-08}$ et $11,857.10^{-08} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Les coefficients de diffusion obtenus dans la littérature lors du séchage du gombo prétraité ou non, avec des gammes de températures comprises entre 40 et 70 °C, varient entre $(2,941 \text{ et } 4,662)10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (Kuitche et al., 2007), entre $(4,27 \text{ et } 13)10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ (Doymaz, 2005), entre $(4,56 \text{ et } 8,05)10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (Adededji et al., 2008) et de $2,81.10^{-10}$ (Ouoba et al., 2010) pour un séchage à 70 °C.

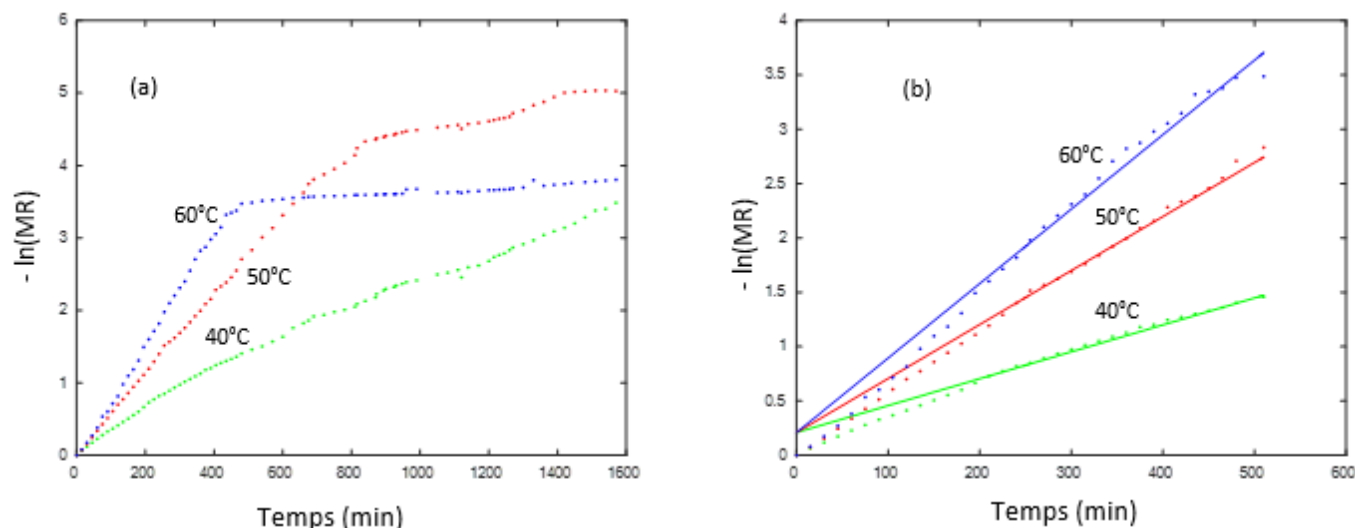


Figure 14 : Détermination du coefficient de diffusion. (a) : première phase et deuxième phase de ralentissement pour les rondelles d'épaisseur 10 mm à 40, 50 et 60 °C. (b) : Modélisation de la première phase par la solution de Crank (1975) en coordonnées cartésiennes.

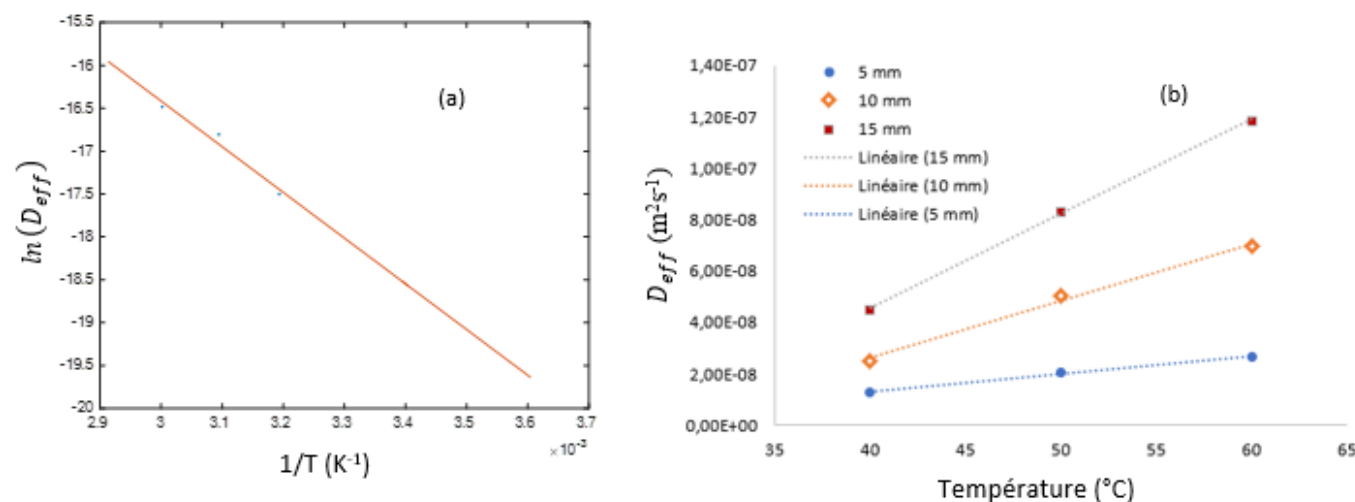


Figure 15 : Modélisation de l'évolution du coefficient de diffusion pour les rondelles d'épaisseur 10 mm (Figure 15-a) et pour les épaisseurs 5, 10 et 15 mm (Figure 15-b).

Les équations de l'évolution du coefficient de diffusion en fonction de la température.

$$D_{eff_{5mm}} = 6,9400 \cdot 10^{-10} \cdot T - 1,4953 \cdot 10^{-8} \quad R^2 = 0,9942 \quad (17)$$

$$D_{eff_{10mm}} = 2,2173 \cdot 10^{-9} \cdot T - 6,2581 \cdot 10^{-8} \quad R^2 = 0,9936 \quad (18)$$

$$D_{eff_{15mm}} = 3,6748 \cdot 10^{-9} \cdot T - 1,0154 \cdot 10^{-7} \quad R^2 = 0,9997 \quad (19)$$

Les équations de l'évolution du coefficient de diffusion en fonction de l'épaisseur.

$$D_{eff_{40°C}} = 3,2573 \cdot 10^{-9} \cdot x - 5,0210 \cdot 10^{-9} \quad R^2 = 0,9830 \quad (20)$$

$$D_{eff_{50°C}} = 6,2607 \cdot 10^{-9} \cdot x - 1,1385 \cdot 10^{-8} \quad R^2 = 0,9994 \quad (21)$$

$$D_{eff_{60°C}} = 9,2189 \cdot 10^{-9} \cdot x - 2,0730 \cdot 10^{-8} \quad R^2 = 0,9985 \quad (22)$$

Tableau 7 : Coefficients de diffusion en fonction de la température de séchage et de la taille des gombos et détermination des énergies d'activation : rondelles non prétraitées

Épaisseur	5 mm				10 mm				15 mm			
	Deff (m ² s ⁻¹)	R ²	χ ²	RMSE	Deff (m ² s ⁻¹)	R ²	χ ²	RMSE	Deff (m ² s ⁻¹)	R ²	χ ²	RMSE
40 °C	1,2501E-08	0,9773	0,0098	0,0973	2,5081E-08	0,9653	0,0066	0,0798	4,5074E-08	0,9661	0,0072	0,0840
50 °C	2,0360E-08	0,9867	0,0159	0,1238	5,0338E-08	0,9851	0,0103	0,0999	8,2967E-08	0,9810	0,0127	0,1112
60 °C	2,6381E-08	0,9540	0,0771	0,2727	6,9426E-08	0,9836	0,0210	0,1429	11,857E-08	0,9781	0,0250	0,1560
Energie d'activation (J.mol⁻¹)	3,2466E+04 avec un R ² de 0,9755				4,4288E+04 avec un R ² de 0,9637				4,2027E+04 avec un R ² de 0,9827			
Do (m²s⁻¹)	0,0034				0,6526				0,4824			

Les énergies d'activation des gombos ont tendance à augmenter avec l'épaisseur des rondelles et varient entre 32,5 et 44,3 kJ.mol⁻¹, avec une moyenne de 39,60 ± 0,63 kJ.mol⁻¹. Nos valeurs sont comparables aux résultats de Doymaz (2005) qui trouve une énergie d'activation de 51,26 kJ mol⁻¹ lors du séchage du gombo. Toutefois, nos résultats sont en moyenne vingt fois plus petites que celles obtenues sur le gombo par Kuitche et al. (2007). Quant à la constante pré-exponentielle, elle varie entre 0,0034 et 0,6526 m².s⁻¹ avec une moyenne de 0,379 ± 0,337 m².s⁻¹. Cette valeur est très grande comparée à celle obtenue par Kuitche et al. (2007) qui est de 1,812.10⁻⁵ m².s⁻¹. De même, Kuitche et al. (2007) ont trouvé une valeur de la constante préexponentielle Do de 1,812 10⁻⁵ m².s⁻¹ bien plus faible comparée à notre valeur moyenne de Do de 0,379 ± 0,337 m².s⁻¹.

Le coefficient de diffusion des rondelles de gombos prétraitées par DII dans une solution de saccharose à 60 °B puis séchées à 60 °C, présente dans les premières heures de séchage, un coefficient de diffusion pratiquement identique à celui obtenu avec des rondelles de gombo de même dimension non prétraités. En effet, les valeurs de coefficients de diffusion obtenues pour les échantillons prétraités et ceux non prétraités sont de 2,8879E-07 m²/s et 2,6293E-07 m²/s avec un R² de 0,9517 et 0,9584 et un chi² de 0,0266 et 0,0356 et un RMSE de 0,1577 et 0,1823 respectivement. Donc, malgré le départ d'eau des produits pendant la DII, le coefficient de diffusion reste élevé dans la première phase de séchage. Ce résultat serait lié au gradient de concentration en sucre dans le produit prétraité par DII. La présence plus importante de saccharose en surface faciliterait la migration de l'eau de l'intérieur vers la surface. La même tendance est observée lors du séchage de gombos de diverses variétés prétraités par DII dans une solution contenant des solutés différents. En effet, le Tableau 8 présente les coefficients de diffusion obtenus, en fonction du mode de prétraitement et de la variété de gombo. Ces résultats sont obtenus à partir du traitement des données de Jiokap Nono et al. (2015). Il ressort de ce tableau que le blanchiment et la DII-blanchiment ont un effet notable sur l'augmentation du coefficient de diffusion.

Tableau 8 : Coefficients de diffusion lors du séchage à 40 °C, de quatre variétés de gombos prétraités ou non. Traitement des données de Jiokap Nono et al. (2015), en fonction de la variété. La variété 2 correspond au gombo « Bamoun ».

Echantillon*	Deff (m ² /s)	R ²	χ ²	RMSE
Variété 1 non traité	6,5611E-10	0,9162	0,0329	0,1791
Variété 2 non traité	6,9390E-10	0,9241	0,0593	0,2405
Variété 3 non traité	3,2708E-10	0,9605	0,0604	0,2427
Variété 4 non traité	1,8211E-10	0,9403	0,0493	0,2192
Variété 1 Blanchi	1,2856E-09	0,9667	0,0422	0,2029
Variété 2 Blanchi	8,4623E-10	0,9748	0,0249	0,1597
Variété 3 Blanchi	3,9204E-10	0,9040	0,2093	0,4519
Variété 4 Blanchi	3,0288E-10	0,9512	0,0907	0,2975
Variété 1 DII/Blanchi	8,1898E-10	0,9592	0,0218	0,1495
Variété 2 DII/Blanchi	6,4317E-10	0,9711	0,0164	0,1298
Variété 3 DII/Blanchi	2,1485E-10	0,8922	0,0720	0,2717
Variété 4 DII/Blanchi	1,5359E-10	0,8847	0,0527	0,2324

*blanchiment : 100 °C / 10 s et DII / Blanchiment selon le protocole décrit par Jiokap nono et al (2015), sur des gombos entiers.

Ce tableau fournit un coefficient de diffusion effectif moyen de (9,20 ± 3,27).10⁻¹⁰ m²/s pour la variété 1, (7,28 ± 1,06).10⁻¹⁰ m².s⁻¹ pour la variété 2, (3,11 ± 0,90) .10⁻¹⁰ m².s⁻¹ pour la variété 3 et (2,13 ± 0,79).10⁻¹⁰ m².s⁻¹ pour la variété 4. Cette dernière variété présente des plus faibles valeurs de coefficients de diffusion. La valeur moyenne du coefficient de diffusion sur toutes les variétés est de (5,43 ± 3,41).10⁻¹⁰ m².s⁻¹. Ces résultats, obtenus sur des gombos entiers, sont bien plus faibles par rapport à ceux obtenus plus haut sur des gombos découpés, lesquels varient entre 125 et 1185,7.10⁻¹⁰ m².s⁻¹. Par conséquent, la forme de découpe des gombos a une forte influence sur la diffusion d'eau lors du séchage. Les travaux de Ouoba et al. (2010) Présentent une valeur de coefficient de diffusion moyenne pour les gombos entiers de 2 à 4 jours de maturité, de (0,704 ± 0,634).10⁻¹⁰ m².s⁻¹, valeur plus faible que ceux obtenus dans le présent travail.

4. CONCLUSION

Il était question dans cette étude d'une part de modéliser les cinétiques de séchage des gombos prétraité ou non, et d'autre part, d'étudier l'influence de la taille des échantillons, de la température de l'air et de la variété de gombo, sur le coefficient de diffusion de l'eau au cours du séchage. Il ressort de ce travail que le séchage est influencé à la fois par la taille des échantillons et la température de l'air de séchage. Nous montrons que le coefficient de diffusion effectif évolue linéairement en fonction de la température et en fonction de la taille avec une pente positive. Toute modélisation devrait donc tenir compte au moins de ces deux facteurs les plus maîtrisables au cours du procédé. Les énergies d'activation des gombos ont tendance à augmenter avec l'épaisseur des rondelles et ont une valeur moyenne de $39,60 \pm 0,63 \text{ kJ.mol}^{-1}$. Nous avons montré qu'à des températures faibles, le modèle des cinétiques à deux termes permet de décrire le comportement en séchage des gombos. Par contre, pour des températures un peu plus élevées, c'est le modèle de Midilli et al. qui décrit le mieux toutes les cinétiques obtenues. Ce travail montre que la DII permet d'accélérer l'élimination de l'eau moyennement liée et liée, avec une cinétique comparable à celle de l'eau libre, mais aussi, de réduire le temps de séchage. Pour des conditions de température et d'épaisseur identiques, les cinétiques de séchage des gombos prétraités et non prétraités ne sont pas les mêmes, et sont décrites par des modèles différents. Ces travaux ouvrent des perspectives dans la mise en œuvre de la DII-séchage dans la production de gombos présentant de nouvelles propriétés organoleptiques. La suite de ce travail sera consacrée à une étude d'acceptabilité générale du gombo produit par ce procédé, en appuyant sur les caractéristiques organoleptiques telles que la couleur et la texture d'une part et d'autre part sur ses propriétés nutritionnelles.

5. NOMENCLATURE

a, b, c, d, k, j, q, n : constantes dans les modèles de séchage

bh Base humide

B_n est la racine de l'équation de Bessel de premier, d'ordre zéro : $J_0(B_n) = 0$

B.S. Base sèche

D_{eff} Coefficient de diffusion effectif (m^2s^{-1})

D_0 facteur pré-exponentiel d'Arrhenius (m^2s^{-1})

MR Teneur en eau réduite (-)

r Rayon du cylindre ou de la sphère (m)

R Constante des gaz parfaits ($\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$)

RH Humidité Relative

R^2 Coefficient de détermination (-)

RMSE Erreur quadratique moyenne ($\text{kg.kg}^{-1} \text{ bh}$)

t Temps (min)

T Température ($^{\circ}\text{C}$)

X_e Teneur en eau d'équilibre du produit ($\text{kg.kg}^{-1} \text{ bh}$)

$X_{i,exp}$ Teneur en eau d'équilibre du $i^{\text{ème}}$ point, mesurée expérimentalement ($\text{kg.kg}^{-1} \text{ bh}$)

$X_{i,pre}$ Teneur en eau d'équilibre du $i^{\text{ème}}$ point, prédite par le modèle ($\text{kg.kg}^{-1} \text{ bh}$)

X_0 Teneur en eau critique ($\text{kg.kg}^{-1} \text{ bh}$)

X_0 Teneur en eau initiale ($\text{kg.kg}^{-1} \text{ bh}$)

$X(t)$ Teneur en eau à l'instant t ($\text{kg.kg}^{-1} \text{ bh}$)

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Ministère de l'Enseignement Supérieur de la République du Cameroun pour son soutien financier à travers le Compte du Fonds Spécial pour la modernisation de la recherche dans les Universités d'Etat (Décret Présidentiel N_2009/121 du 8 avril 2009).

7. CONFLITS D'INTÉRÊT

Les auteurs n'ont déclaré aucun conflit d'intérêt.

8. RÉFÉRENCES

- Acquistucci Rita, Francisci Roberta, 2002. Effect of okra (*Hibiscus esculentus*L.) addition on the technological properties of a wheat flour. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, **53**, 375–379.
- Adededi A.A., Gachovska T.K., Ngadi M.O., & Raghavan G.S.V., 2008. Effect of Pretreatments on Drying Characteristics of Okra. *Drying Technology*, **26**(10), 1251–1256. doi:10.1080/07373930802307209
- Ahouannou Clément, Jannot Yves, Lips Bernard et LallemandAndré, 2000. Caractérisation et modélisation du séchage de trois produits tropicaux : manioc, gingembre et gombo. *Science des Aliments*, 414–432.
- Akpinar E. Kavak, Bicer Y. et Cetinkaya F., 2006. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *Journal of Food Engineering*, **75**, 308–315.
- Bchir Brahim, BesbesSouhail, GietJean-Michel, AttiaHamadi, 2011. Synthèse des connaissances sur la déshydratation osmotique. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **15**(1), 129–142.
- Camciuc M., Deplagne M., Vilarem G. and Gaset A., 1998. Oca (*Abelmoschus esculentus* L. Moench.) a Crop with Economic Potential for Set Aside Acreage in Frances Industrial. *Crops and Products*, **7**, 257–264. [http://dx.doi.org/10.1016/S0926-6690\(97\)00056-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-6690(97)00056-3).
- Crank J., 1975. *The Mathematics of Diffusion*. 2nd Edition, Oxford University Press, UK, London, 69–88.
- Doymaz I., 2004. Convective air-drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, **61**, 359–364. DOI:10.1016/S0260-8774(03)00142-0
- Doymaz I., 2005. Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of food engineering*, **69**, 275–279.
- FAO, 2021. FaoStat Database. <http://www.fao.org/faostat>
- Hamon S. et Charrier A., 1997. Les gombos. In : Charrier A. (ed.), Jacquot M. (ed.), Nicolas D. (ed.). *L'amélioration des plantes tropicales*, Col. *Repères*, CIRAD, ORSTOM, Montpellier (FRA), 313–333.
- Hamon S., 1988. Organisation évolutive du genre *Abelmoschus*(gombo). Coadaptation et évolution de deux espèces de gombo cultivées en Afrique de l'Ouest, *A. esculentus* et *A. caillei*. Paris, France, ORSTOM, Collection : Travaux et documents microédités, *TDM46*, 191p.
- Hii L., Law C.L. et Cloke M., 2009. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal of Food Engineering*, **90**, 191–198.
- Huang Zhiliang, Wang Baowu, Eaves Doris H., Shikany James M. & Pace Ralphenia D., 2009. Total phenolics and antioxidant capacity of indigenous vegetables in the southeast United States: Alabama Collaboration for Cardiovascular equality Project. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, **60**(2), 100–108.
- Inyang U.E. & Ike C.I., 1998. Effect of blanching, dehydration method and temperature on the ascorbic acid, colour, sliminess and other constituents of okra fruit. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, **49** (2), 125–130.
- Jiokap Nono Y., Aseaku Jude Nkengbeza, Desmorieux H., Degraeve P., Kamga R., 2015. Okras (*Abelmoschus Esculentus* L. Moench) Drying Behaviour After Undergoing Blanching or Combined Dewatering-Impregnation-Soaking Process (DISP)/Blanching. *International Journal of Science, Technology and Society*, **3**(5), 243–253. doi: 10.11648/j.ijsts.20150305.14

- Kemmene Dapabko S., Jiokap N.Y. Arebga W.A., Kapseu C. and Puiggali J.R., 2021. Determination and modeling isotherms of okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench) and sweet Green Pepper (*Capsicum annum* L. Moench). *Journal of Biosystems Engineering*, **46**, 60–80.
- Kolawole O. Falade & Bukola. S. Omojola, 2008. Effect of Processing Methods on Physical, Chemical, Rheological, and Sensory Properties of Okra (*Abelmoschus esculentus*). *Food Bioprocess Technology*, **3**, Springer Science + Business Media, 388–394.
- Kuitche A., Edoun M. et Takamte G., 2007. Influence of pre-treatment on drying kinetic of local Okro (*Hibiscus esculentus*) variety. *World Journal of Dairy & Food Sciences*, **2** (2): 83–88.
- McMinn W.A.M., 2006. Thin-layer modelling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum. *Journal of Food Engineering*, **72**, 113–123.
- Medjoudj H., et Zidoune M.N., 2008. Etude du comportement au séchage du cardon. *Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger*, 285–300.
- Minader., 2012. Agri-stat N°17, Annuaire des Statistiques du Secteur Agricole Campagnes 2009 et 2010, Direction des Enquêtes et des Statistiques Agricoles, MINADER / DESA / 19–59.
- Mohammadpour V., Hamed Mosavian M.T., Etemadi A., 2008. Determination of effective diffusivity coefficient and activation energy of shelled pistachio by using fluidized bed dryer. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, **3**(2), 1–12.
- Mujumdar A.S. and Menon, A.S., 1995. Drying of solids, in Mujumdar A.S. (Ed.). Handbook of industrial drying; 2nd Edition, Marcel, Dekker, New York. 1–46.
- Njike Nya Pierre, 1997. L'art culinaire camerounaise « 200 recettes de cuisine camerounaise modernes et anciennes ». Ed L'Harmattan, 7–9.
- Ouoba K.H., Desmorieux H., Zougmore F. et Naon B., 2010. Caractérisation du séchage convectif du gombo, influence de la découpe et de ses constituants. *Afrique Science*, **06**(2), 37–48.
- Ouoba Kondia H., Zougmore F., Raguilignaba S., Toguyeni Aboubacar, Desmorieux H., 2014. Characterization of Okra Convective Drying, Influence of Maturity. *Food and Nutrition Sciences*, **5**, 590–597. <http://dx.doi.org/10.4236/fns.2014.56069>.
- Sawadogo Mahamadou, Zombre Gérard, Balma Didier, 2006. Expression de différents écotypes de gombo (*Abelmoschus esculentus* L.) au déficit hydrique intervenant pendant la boutonnisation et la floraison. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **10**, 43–54.
- Sharma sangita, Mbanya Jean C., Cruickshank Kennedy, Cadej anet, Tanya Agatha K. N., Caoxia, Hurbos Margit & Wong Matthew R.K.M., 2007. Nutritional composition of commonly consumed composite dishes from the Central Province of Cameroon. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, **58**(6), 475–485.
- Simal S., Femenia A., Garau M.C. et Rosselo C., 2005. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*, **66**, 323–328.
- Vega Antonio, Uribe Elsa, Lemus Roberto, Miranda Margarita, 2007. Hot-air drying characteristics of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. *LWT*, **40**, 1698–1707.
- Velić D., Planinić M., Tomas S., & Bilić M., 2004. Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, **64**(1), 97–102. doi:10.1016/j.jfoodeng.2003.09.016.