



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Modélisation mathématique du séchage dans un four (air chaud) de tranches de mangue (*Mangifera indica* L.)

N'guessan Verdier ABOUO^{1,3*}, Alhassane FOFANA², Yevi Delphine N'GUESSAN¹ et Nogbou Emmanuel ASSIDJO³

¹Laboratoire de Biotechnologie, Agriculture et Valorisation des Ressources Biologiques (LBAVRB), UFHB, UFR Biosciences, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

²Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides (LAPAMF), UFHB, UFR Sciences et Structure de la Matière et de la Technologie (SSMT), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

³Laboratoire des Procédés Industriels de Synthèse de l'Environnement et des Energies Nouvelles (LAPISEN), INPHB, DFR GCAA, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire.

*Auteur correspondant, E-mail: v.abouo@gmail.com; Tél : (+225) 01409000

RESUME

Ce travail vise à étudier le séchage de la mangue à différentes épaisseurs et températures en vue de valorisation. Les expériences ont été menées à partir d'une matrice factorielle par la méthode gravimétrique statique. Les valeurs expérimentales ont été ajustées à huit modèles empiriques par la méthode du gradient afin d'estimer les paramètres et coefficients des modèles. Les critères statistiques que sont le R^2 , l'erreur quadratique moyenne (EQM) et le χ^2 ont servi à justifier le choix du modèle de séchage. Le séchage a duré 16-18 ; 23-27 et 29-33 minutes respectivement aux températures 60, 50 et 40°C pour les épaisseurs 1,5 et 1 cm. Le modèle logarithmique est retenu et présente les valeurs du R^2 (0,9984 ; 0,9984 ; 0,9981 ; 0,9987 ; 0,9988 ; 0,9985) les plus élevées et les plus faibles valeurs de χ^2 (2,43 e-07 ; 1,58 e-07 ; 1,25 e-06 ; 2,02 e-07 ; 4,56 e-06 et 1,37 e-06) et EQM (2,42 e-04 ; 1,95 e-07 ; 5,47 e-04 ; 2,20 e-04 ; 0,0010 et 5,69 e-04). Le coefficient de diffusion varie de 8,615 e-09 à 9,155 e-09 m² / s et dépend fortement de la température de séchage. L'énergie d'activation est estimée entre 22,430 – 25,358 KJ / mol.

© 2020 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Séchage, mangue, modèle, coefficient de diffusion, énergie d'activation.

Mathematical modeling of the drying in an oven (hot air) of slices of mango (*Mangifera indica* L.)

ABSTRACT

This work aims to study the drying of mango at different thicknesses and temperatures a view to valorization. The experiments were carried out from a factor matrix by the static gravimetric method. The experimental values were fitted to eight empirical models by the gradient method in order to estimate the parameters and coefficients of the models. The statistical criteria of R^2 , mean square error (MSE) and χ^2 were used to justify the choice of the drying model. Drying lasted 16-18; 23-27 and 29-33 minutes respectively at temperatures 60, 50 and 40 °C for thicknesses 1.5 and 1 cm. The logarithmic model is retained and presents the highest values of R^2 (0.9984; 0.9984; 0.9981; 0.9987; 0.9988; 0.9985) and the lowest values of χ^2 (2.43 e-07;

1.58 e-07; 1.25 e-06; 2.02 e-07; 4.56 e-06 and 1.37 e-06) and MSE (2.42 e-04; 1.95 e-07; 5.47 e-04; 2.20 e-04; 0.0010 and 5.69 e-04). The diffusion coefficient varies from 8.615 e-09 to 9.155 e-09 m²/s and strongly depends on the drying temperature. The activation energy is estimated to be 22.430 - 25.358 KJ/mol.

© 2020 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords : Drying, mango, models, diffusion coefficient, activation energy.

INTRODUCTION

L'économie de la Côte d'Ivoire repose sur l'agriculture, qui est favorisée par un climat chaud et humide (Kakou et al., 2015). Elle est dominée par l'exportation de produits dit de rente, en particulier le cacao, le café, le palmier à huile, l'hévéa etc... (Akmel et al., 2008). La Côte d'Ivoire exporte également des fruits et légumes aux nombres desquels les plus importants (quantitativement) sont respectivement l'ananas, la banane et la mangue (CBI-MFA, 2019).

Ces trois produits contribuent pour près de 4 % à la formation du produit intérieur brut (PIB) (Nouar et al., 2013). Avec une production avoisinant 160 000 tonnes dont plus de 33 000 tonnes exportées en Europe, la production ivoirienne s'est hissée au troisième rang des fournisseurs de mangues du marché européen après le Brésil et le Pérou (CBI-MFA, 2019). La vente de la mangue rapporte au pays plus de 6,5 à 7 milliards de FCFA aux producteurs (Assovie, 2012). Le niveau d'exportation de la mangue est estimé à environ 30% de sa production et près de 30-60% de pertes post-récoltes enregistrées du fait des difficultés d'écoulement liées à l'étroitesse du marché intérieur, la courte durée de conservation de la mangue et les maladies des fruits (CBI-MFA, 2019).

La presque quasi-totalité des pertes post-récoltes de produits agricoles trouvent une solution par la transformation en d'autres sous-produits ou par la réduction de la biodisponibilité en eau notamment le séchage. C'est une technique ancienne de conservation des produits agricoles (Akmel et al., 2008). Il consiste à réduire, suivre et contrôler la disponibilité en eau dans un produit (Nogbou et al., 2015). Cette biodisponibilité en eau dans le produit entraîne des réactions biochimiques complémentaires (Afoakwa et al., 2008). A cet effet, le séchage constitue une étape cruciale du

traitement post-récolte (Afoakwa et al., 2013 ; Kouadio et al., 2015). Il s'effectue généralement au soleil (séchage naturel), moins onéreux et par des techniques de séchage artificiel (Abouo et al., 2015a). Comme technique de séchage artificiel, il y a la conduction qui s'effectue généralement dans des fours (conduction et rayonnement) à des températures et/ou puissances spécifiques (Koné, 2011 ; Abouo et al., 2015b). Lors du séchage, la perte en eau du produit peut s'effectuer par pesée gravimétrique statique (Akmel et al., 2008). Cette technique permet de déterminer la durée du séchage, la quantité totale d'eau libre à enlever du produit afin de la rendre très peu ou pas disponible dans le produit (Akmel et al., 2009). De ce fait, elle permet d'établir les courbes caractéristiques de séchage (CCS) qui expriment l'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur réduite en eau du produit et d'en déduire les modèles mathématiques susceptibles d'être lissés aux courbes de séchage dudit produit (Hii et al., 2006). Les modèles mathématiques définis empiriquement dans la littérature sont nombreux et permettent de simuler expérimentalement le séchage (Hii et al., 2006). A partir des informations sur le transfert de l'humidité pendant le séchage qui est contrôlé par la diffusion interne (deuxième loi de Fick), le coefficient de diffusion et l'énergie d'activation peuvent en être déduits pour une connaissance parfaite d'importantes propriétés physiques et les conditions d'entreposage du produit en vue de conservation (Touati, 2008 ; Bonazzi et al., 2008 ; Koné, 2011, Krysiak et al., 2011).

Il existe des travaux de séchage de la mangue en Côte d'Ivoire, au Burkina Faso et au Ghana. Aussi, des travaux de recherche ont été réalisés sur les principaux microorganismes responsables de l'antracnose, maladie dévastatrice du mangoier (Yah, 2015 ;

Dembele et al., 2019) sans oublier ceux relatifs aux procédés de déshydratation osmotique (Floury et al., 2008 ; N’Goran et al., 2012). Concernant le séchage de la mangue, la littérature fait mention de l’usage de séchoir type solaire par convection forcée (Mamouda et al., 2019). Face aux nombreuses pertes post-récoltes enregistrées de la production, la très faible quantité de données scientifiques disponibles à ce sujet et les progrès scientifiques réalisés à partir du séchage de diverses matrices agricoles, il paraît opportun de mener des investigations afin de contribuer à apporter des solutions à la problématique des pertes post-récoltes de la mangue. Ces investigations consisteront à caractériser le séchage de la mangue par la modélisation (empirique), à quantifier les paramètres tels que l’énergie d’activation et le coefficient de diffusion de l’eau au cours du séchage des tranches de mangue.

MATERIEL ET METHODES

Préparation de l’échantillon

Le matériel biologique est constitué de dix (10) kilogrammes de mangue de variété ‘kent’, acheté au grand marché de la commune d’Abobo (Abidjan nord) dans la période d’Avril 2020 et transporté au laboratoire pour la suite des travaux. Les mangues ont été épluchées, tranchées en épaisseur de 1 et 1,5 cm. Des échantillons de tranches de mangue de 5 g ont été constitués.

Procédure de séchage de la mangue

Les tranches obtenues ont été mises à sécher dans un four à moufle (Thermoscientific) à trois (03) différentes températures selon un plan d’expérience de degré un comme indiqué dans le Tableau 1 (domaine expérimental) (Chekroune, 2009). Les essais de séchage ont été menés et la perte différentielle de masse de l’échantillon a été effectuée par pesée gravimétrique statique à l’aide d’une balance (Sartorius, A200S, France) jusqu’à ce que la différence entre trois (03) pesées successives (chaque heure) n’excède la valeur de 0,001 (Belhamidi et al., 1993). En fin de séchage, la teneur en eau résiduelle a été déterminée selon la méthode AOAC (2005).

Etablissement de courbes caractéristiques de séchage (CCS)

Les CCS ont été établies en représentant les vitesses de séchage normées en fonction des teneurs en eau réduites. Elles permettent d’obtenir les équations de vitesses de séchage sous la forme de polynômes de degré 3 (Abouo et al., 2015b). Les expressions mathématiques des différentes vitesses de séchage sont les suivantes :

$$f = \left[\frac{\left(\frac{-dX}{dt} \right)}{\left(\frac{-dX}{dt} \right)_n} \right] = A X^{*3} + B X^{*2} + C X^{*} + D$$

Avec : A, B, C, D des coefficients à déterminer

Modélisation mathématiques du séchage des tranches de mangue

Les teneurs en eau d’équilibre des échantillons séchés (tranches sèches de mangue) ont été déterminées à partir des équations suivantes :

$$X^* = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

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

Avec : X_t : teneur en eau en instant t ; X_e : teneur en eau d’équilibre ; X_0 : teneur en eau initiale (Tableau 2).

Le Tableau 3 présente des modèles empiriques décrits dans la littérature utilisées pour simuler la cinétique de séchage des produits végétaux. Au nombre de huit, retenus pour ce travail, ces modèles contiennent des paramètres et coefficients à déterminer à partir des données expérimentales du séchage (Akmel et al., 2009). La méthode du gradient a été développée sous un programme de calcul puis implémenté pour estimer les coefficients et paramètres à l’aide du logiciel MatLab R2016a (Abouo et al., 2015b). Les critères statistiques d’appréciation du lissage des données expérimentales aux différents modèles empiriques décrits dans la littérature ont été retenus pour le coefficient de détermination multiple R^2 proche de l’unité et pour de faibles valeurs de l’erreur quadratique moyen (EQM) et χ^2 proches de zéro (Nogbou et al., 2015 ; Karidioula et al., 2018).

Tableau 3 : Modèles de séchage utilisés.

MODELES	EQUATIONS MATHEMATIQUES	REFERENCES
Approche-Diffusion	$X^* = aexp^{(-kt)} + (1 - a)exp^{(-kbt)}$	Gowen et al., 2008
Deux-Terms	$X^* = aexp^{(-k_0t)} + bexp^{(-k_1t)}$	Roberts et al., 2008
Henderson et Pabis modifié	$X^* = aexp^{(-kt)} + bexp^{(-gt)} + cexp^{(-ht)}$	Abouo et al., 2015b
Logarithmique	$X^* = aexp^{(-kt)} + c$	Togrul et Pehlivan, 2004
Middili et Kucuk	$X^* = aexp^{(-kt^n)} + bt$	Midilli et Kucuk, 2003
Newton	$X^* = exp^{(-kt)}$	Yaldiz et al., 2001
Page	$X^* = exp^{(-kt^n)}$	Jurendic, 2012
Verma et al.,	$X^* = aexp^{(-kt)} + (1 - a)exp^{(-gt)}$	Verma et al., 1985

Avec : a, b, c, g, h, k, k₀, k₁ paramètres et coefficients à déterminer.

Les critères statistiques de choix des modèles ont été :

Coefficient de détermination $R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X^*_{exp,i} - X^*_{pre,i})^2}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (X^*_{exp,i} - X^*_{pre,i})^2] * [\sum_{i=1}^N (X^*_{exp,i} - X^*_{pre,i})^2]}}$ (3)

Khi carré réduit : $\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X^*_{exp,i} - X^*_{pre,i})^2}{N - z}$ (4)

Erreur Quadratique Moyenne : $EQM = [\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (X^*_{exp,i} - X^*_{pre,i})^2]^{\frac{1}{2}}$ (5)
(Sorour et El-Mesery, 2014 ; Kakou et al., 2015)

Estimation de la diffusivité massique et de l'énergie d'activation

Le transfert de l'humidité pendant le séchage est contrôlé par la diffusion interne. La deuxième loi de Fick de diffusion a été largement utilisée pour décrire le processus de séchage pour la plupart des produits biologiques liant la teneur en eau du produit (M), la diffusivité massique (D), le temps (t) et la direction (z) (Touati, 2008 ; Akmel et al., 2009).

$MR = \frac{M}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} Exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$ (6)

Avec : MR est la teneur en eau réduite, D_{eff} est le coefficient de diffusivité effectif (m/s); L est la demi-épaisseur de la tranche (m) et n, un entier positif.

Pour une longue période de séchage, l'équation ci-dessus peut être simplifiée, en prenant le logarithme naturel des deux côtés. La précédente équation devient :

$Ln MR = Ln \frac{8}{\pi^2} - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$ (7)

Le coefficient de diffusion dépend de la température et est décrit par la loi d'Arrhenius selon l'équation suivante :

$D_{eff} = D_0 Exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ (8)

D_0 est la constante de l'équation d'Arrhenius (m^2/s); E_a est l'énergie d'activation (kJ/mol); T est la température de l'air de séchage (K) et R est la constante de gaz universelle ($kJ/mol.K$).

Analyses statistiques

Tous les essais de séchage ont été réalisés en triple, soit un total de 18 (6 x 3)

séries de séchage. Par la suite, un programme de calcul informatique basé sur la méthode du gradient a été développé et implémenté dans le logiciel MatLab R2016a pour le calcul des coefficients, paramètres des modèles empiriques et des paramètres statistiques de choix de modèles.

Tableau 1 : Domaine expérimental.

Paramètres	Valeurs codées / réelles	
	-1	+1
X_1 (épaisseur cm)	1	1,5
X_2 (Température °C)	40	
	50	
	60	

Tableau 2 : Nomenclature.

Classification	
Y	Vitesse normée
a, b, c	Coefficient de séchage
EQM	Erreur quadratique moyen
k, g, n, h	Constantes de séchage
N	Nombre d'observation
R^2	Coefficient de détermination
X^*	Teneur en eau réduite
MS	matière sèche
Symboles Grecs	
χ^2	Chi carré réduit
Indice	
<i>i</i>	Au temps <i>i</i>
<i>e</i>	Équilibre
<i>0</i>	Initiale
<i>exp</i>	Expérimentale
<i>pre</i>	prédictive

RESULTATS

L'évolution de la perte différentielle de la masse des échantillons au cours du séchage est illustrée par la Figure 1. Cette perte de masse présente une allure générale décroissante tout au long du séchage des tranches de mangues. Trois (03) phases de séchage sont observées. La première (01) qualifiée de mise en température s'observe pendant les trois (03) premières heures de séchage pour toutes les épaisseurs (1 et 1,5 cm) et températures (40, 50 et 60 °C). La seconde phase se constate de la 3^{ème} à la 9^{ème} heure de séchage à T = 60 °C pour les épaisseurs 1 et 1,5 cm ; à la 14^{ème} heure pour les épaisseurs 1 et 1,5 cm à T = 50 °C et jusqu' à la 17^{ème} heure pour les épaisseurs 1 et 1,5 cm à T= 40 °C. C'est la phase de séchage à vitesse constante. La phase de ralentissement commence après la fin de la seconde phase et ce jusqu'en fin de séchage. Elle intervient entre : 16h et 18h, 23h et 27h et 29h et 33h de séchage pour les températures 60, 50 et 40 °C et par niveau d'épaisseur. Les vitesses de séchage sont plus importantes pour les températures élevées et pour la petite épaisseur. Les vitesses moyennes de séchage déterminées sont exprimées en g H₂O/g.MS/h et sont les suivantes :

- 0,333 et 0,294 respectivement pour les épaisseurs 1 et 1,5 cm au cours du séchage à T = 60 °C.
- 0,217 et 0,185 respectivement pour les épaisseurs 1 et 1,5 cm au cours du séchage à T= 50 °C.
- 0,172 et 0,152 respectivement pour les épaisseurs 1 et 1,5 cm au cours du séchage à T= 40 °C.

Les courbes caractéristiques de séchage (CCS) correspondantes ont été établies en représentant les vitesses de séchage normées (Y) en fonction des teneurs en eau réduites (X*). Les CCS permettent d'obtenir les équations de vitesses de séchage sous la forme de polynômes de degré 3. Avec des coefficients de déterminations supérieurs à 0,95 (0,982 ;

0,993 ; 0,984 ; 0,985 ; 0,987 et 0,982) et proches de l'unité (1).

Les expressions mathématiques obtenues sont:

- $Y_{40/1} = -15,462X^{*3} + 12,757X^{*2} - 1,1619X^* + 0,1822$
- $Y_{40/1,5} = -25,251X^{*3} + 19,182X^{*2} - 1,9836X^* + 0,1982$
- $Y_{50/1} = -19,643X^{*3} + 17,388X^{*2} - 2,753X^* + 0,1851$
- $Y_{50/1,5} = -15,978X^{*3} + 13,875X^{*2} - 1,9005X^* + 0,1736$
- $Y_{60/1} = -8,4012X^{*3} + 10,32X^{*2} - 2,5938X^* + 0,2934$
- $Y_{60/1,5} = -7,4725X^{*3} + 8,9453X^{*2} - 2,0555X^* + 0,2667$

Le Tableau 4 présente les coefficients, paramètres des huit (08) modèles de séchage en couche mince ainsi que les paramètres statistiques de précision du lissage des modèles que sont : le coefficient de détermination (R²), le Chi carré (χ²) réduit, l'erreur quadratique moyenne (EQM). L'analyse du Tableau 4 révèle que les valeurs du paramètre R² évoluent de 0,9570 à 0,9922 ; 0,8189 à 0,9424 ; 0,8905 à 0,9428 ; 0,9904 à 0,9984 ; 0,9843 à 0,9965 ; 0,9879 à 0,9977, 0,9181 à 0,9963 et 0,8052 à 0,9908 respectivement pour les huit modèles (approche diffusion, deux-termes, Henderson et Pabis Modifié, Logarithmique, Middili-Kucuk, Newton, Page et Verma et al.). Aussi, les valeurs de χ² réduit fluctuent entre 7,42 e-05 et 5,89 e-04 pour le modèle de l'approche de diffusion ; entre 0,0536 et 0,1328 au niveau du modèle deux-terme; de 0,0887 à 0,3108 avec le modèle d'Henderson et Pabis Modifié ; entre 1,58e-07 et 4,56e-06 pour le modèle Logarithmique. En ce qui concerne le modèle de Middili-Kucuk, les valeurs sont entre 1,238 e-07 et 1,53 e-06. Les modèles Newton, Page et Verma et al., ont permis d'obtenir les valeurs du χ² réduit respectivement entre 3,42e-07 et 1,24e-05 ; 7,12 e-12 et 1,08e-07. Les valeurs des EQM enregistrées sont de : 0,0032 à 0,0118; 0,1139- 0,1768; 0,1466 à 0,2704;

1,95e-07 à 0,0010 ; 1,71e-04 à 0,0016; 2,33e-04 à 0,0017 ; 1,31e-04 à 1,59e-04 et 0,0051 à 0,0217 respectivement pour ces modèles.

Ces valeurs obtenues sont assez faibles dans l'ensemble. Sur la base de ce que le modèle qui décrit le mieux la cinétique de séchage sur couche mince est celui qui présente la valeur la plus élevée du coefficient de détermination (R^2), premier critère de choix ; avec de faibles valeurs de χ^2 réduit et EQM pour le second critère. Le modèle

logarithmique est retenu pour le séchage conductif des tranches de mangue tel qu'illustré sur la Figure 2. L'estimation du coefficient de diffusion et de l'énergie d'activation lors du séchage des tranches de mangues sont consignés dans le Tableau 5. Les valeurs des coefficients de diffusions calculés sont comprises entre 8,615 e-09 et 9,155 e-09 m^2s^{-1} . L'énergie d'activation a évolué de 22,430 à 25,358 KJ/mol.

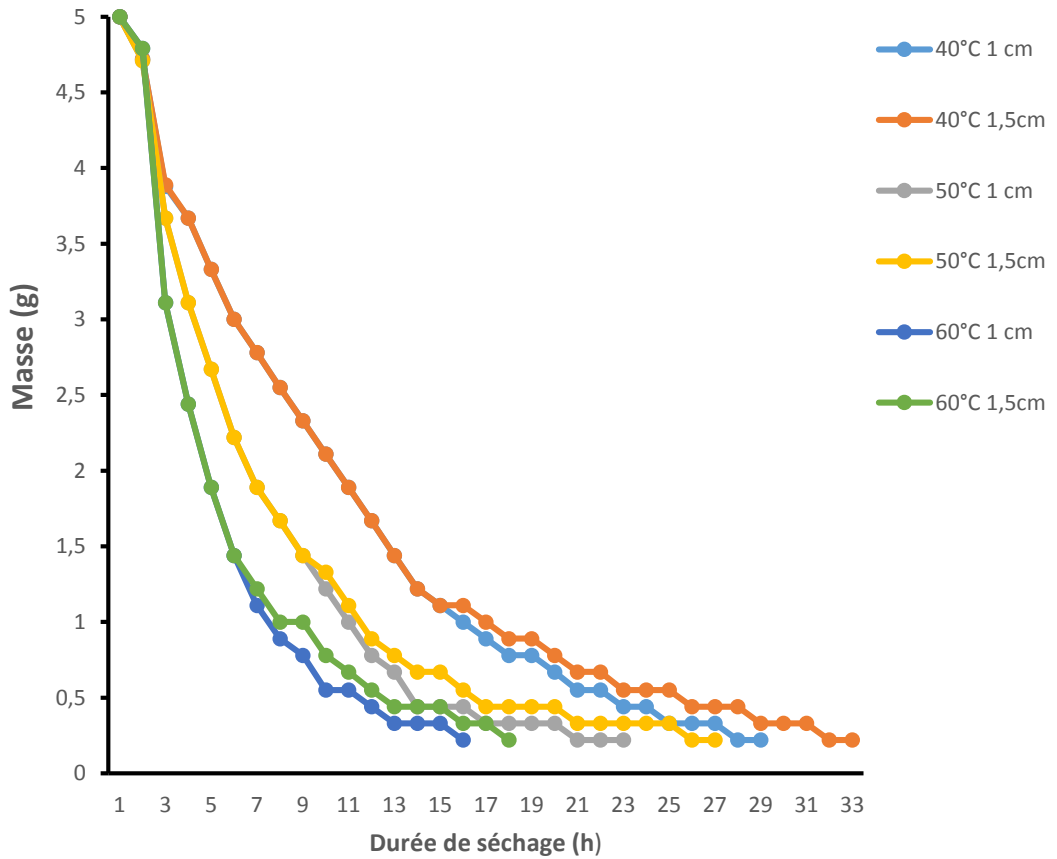


Figure 1 : Evolution de la perte différentielle de masse des tranches de mangue au cours du séchage à différentes températures.

Tableau 4 : Valeurs des coefficients, paramètres et critères statistiques issus de la modélisation.

Modèles Utilisés	°C	Paramètres et coefficients des modèles de la présente étude									Critères statistiques		
	cm	a/A1	b	c	g	h	k	k0	k1	n	R ²	χ^2	EQM
Approche Diffusion	40/1	0,1855	0,2981	-	-	-	0,1416	-	-	-	0,9922	5,32 e-04	0,0036
	40/1,5	0,1857	0,298	-	-	-	0,1441	-	-	-	0,9896	4,35 e-04	0,0032
	50/1	0,1877	0,2978	-	-	-	0,1419	-	-	-	0,9759	1,63 e-04	0,0063
	50/1,5	0,1887	0,2973	-	-	-	0,1494	-	-	-	0,9673	7,42 e-05	0,0042
	60/1	0,1929	0,2968	-	-	-	0,1469	-	-	-	0,9635	5,89 e-04	0,0118
	60/1,5	0,194	0,2964	-	-	-	0,1524	-	-	-	0,9570	3,63 e-04	0,0093
Deux-Terms	40/1	3,0175	4,2668	-	-	-	-	0,0011	9,38 e-04	-	0,9424	0,0536	0,1139
	40/1,5	3,1407	4,4103	-	-	-	-	9,59 e-04	8,12 e-04	-	0,9378	0,0544	0,1147
	50/1	2,6915	3,9054	-	-	-	-	0,0015	0,0013	-	0,9194	0,0737	0,1329
	50/1,5	3,0568	4,3442	-	-	-	-	0,001	8,68 e-04	-	0,9174	0,0687	0,1287
	60/1	2,4941	3,6858	-	-	-	-	0,0018	0,0017	-	0,9159	0,1328	0,1768
	60/1,5	2,7122	3,9715	-	-	-	-	0,0015	0,0013	-	0,8189	0,1241	0,1714
Henderson Pabis modifié	40/1	7,4492	1,8569	0,0657	0,0021	0,0021	6,21 e-04	-	-	-	0,9428	0,0892	0,1469
	40/1,5	7,5686	1,9906	0,0707	0,0018	0,0018	5,50 e-04	-	-	-	0,9321	0,0887	0,1466
	50/1	7,3486	1,6626	0,0584	0,0026	0,0026	6,89 e-04	-	-	-	0,9196	0,1418	0,1843
	50/1,5	7,7188	2,053	0,0729	0,0017	0,0017	4,72 e-04	-	-	-	0,8905	0,123	0,1722
	60/1	7,5699	1,7075	0,0598	0,0024	0,0024	5,51 e-04	-	-	-	0,9152	0,3108	0,2704

	60/1,5	7,7724	1,9344	0,0683	0,0019	0,0019	4,48 e-04	-	-	-	0,898	0,2715	0,2536
Logarith- mique	40/1	0,708	-	0,1298	-	-	-	-	0,1284	-	0,9984	2,43 e-07	2,42 e-04
	40/1,5	0,6953	-	0,1312	-	-	-	-	0,1296	-	0,9984	1,58 e-07	1,95 e-07
	50/1	0,6121	-	0,1411	-	-	-	-	0,137	-	0,9981	1,25 e-06	5,47 e-04
	50/1,5	0,5597	-	0,1476	-	-	-	-	0,1414	-	0,9987	2,02 e-07	2,20 e-04
	60/1	0,4026	-	0,1684	-	-	-	-	0,1532	-	0,9988	4,56 e-06	0,001
	60/1,5	0,3541	-	0,1753	-	-	-	-	0,1563	-	0,9985	1,37 e-06	5,69 e-04
	Middili & Kucuk	40/1	1,0567	0,0143	-	-	-	0,1286	-	-	0,71 65	0,9882	1,23 e-06
40/1,5		1,0591	0,0143	-	-	-	0,1286	-	-	0,71 75	0,9906	1,48 e-06	5,99 e-04
50/1		1,0601	0,0177	-	-	-	0,1284	-	-	0,71 92	0,9965	1,23 e-07	1,71 e-04
50/1,5		1,0678	0,0181	-	-	-	0,1282	-	-	0,72 28	0,9968	1,53 e-06	6,08 e-04
60/1		1,0725	0,0244	-	-	-	0,1276	-	-	0,72 81	0,9866	1,06 e-05	0,0016
60/1,5		1,0787	0,025	-	-	-	0,1274	-	-	0,73 13	0,9843	1,38 e-06	5,72 e-04
Newton	40/1	-	-	-	-	-	0,1299	-	-	-	0,9879	3,42 e-07	2,87 e-04
	40/1,5	-	-	-	-	-	0,1313	-	-	-	0,9897	2,25 e-07	2,33 e-04
	50/1	-	-	-	-	-	0,1411	-	-	-	0,997	2,07 e-06	7,05 e-04
	50/1,5	-	-	-	-	-	0,1474	-	-	-	0,9977	3,44 e-07	2,88 e-04
	60/1	-	-	-	-	-	0,1672	-	-	-	0,9936	1,24 e-05	0,0017

	60/1,5	-	-	-	-	-	0,1734	-	-	-	0,994	4,01 e-06	9,75 e-04
Page	40/1	-	-	-	-	-	-	-	0,1751	1,13 19	0,9181	4,14 e-11	3,16 e-06
	40/1,5	-	-	-	-	-	-	-	0,1744	1,13 49	0,9235	1,84 e-11	2,11 e-06
	50/1	-	-	-	-	-	-	-	0,1518	1,22 86	0,969	5,18 e-10	1,11 e-05
	50/1,5	-	-	-	-	-	-	-	0,1443	1,25 71	0,9694	7,12 e-12	1,31 e-06
	60/1	-	-	-	-	-	-	-	0,0466	1,66 5	0,9963	1,08 e-07	1,59 e-04
	60/1,5	-	-	-	-	-	-	-	0,0331	1,73 65	0,9863	4,89 e-08	1,07 e-04
Verma <i>et al.</i>,	40/1	0,7212	-	-	0,2659	-	0,0265	-	-	-	0,9908	1,08 e-04	0,0051
	40/1,5	0,7422	-	-	0,2658	-	0,0258	-	-	-	0,9886	1,06 e-04	0,0051
	50/1	7080	-	-	0,2958	-	0,0193	-	-	-	0,9873	3,59 e-04	0,0093
	50/1,5	0,7579	-	-	0,2994	-	0,017	-	-	-	0,9763	2,92 e-04	0,0084
	60/1	0,6225	-	-	0,3898	-	-0,0098	-	-	-	0,8635	0,002	0,0217
	60/1,5	0,6265	-	-	0,3946	-	-0,0121	-	-	-	0,8052	0,0018	0,0207

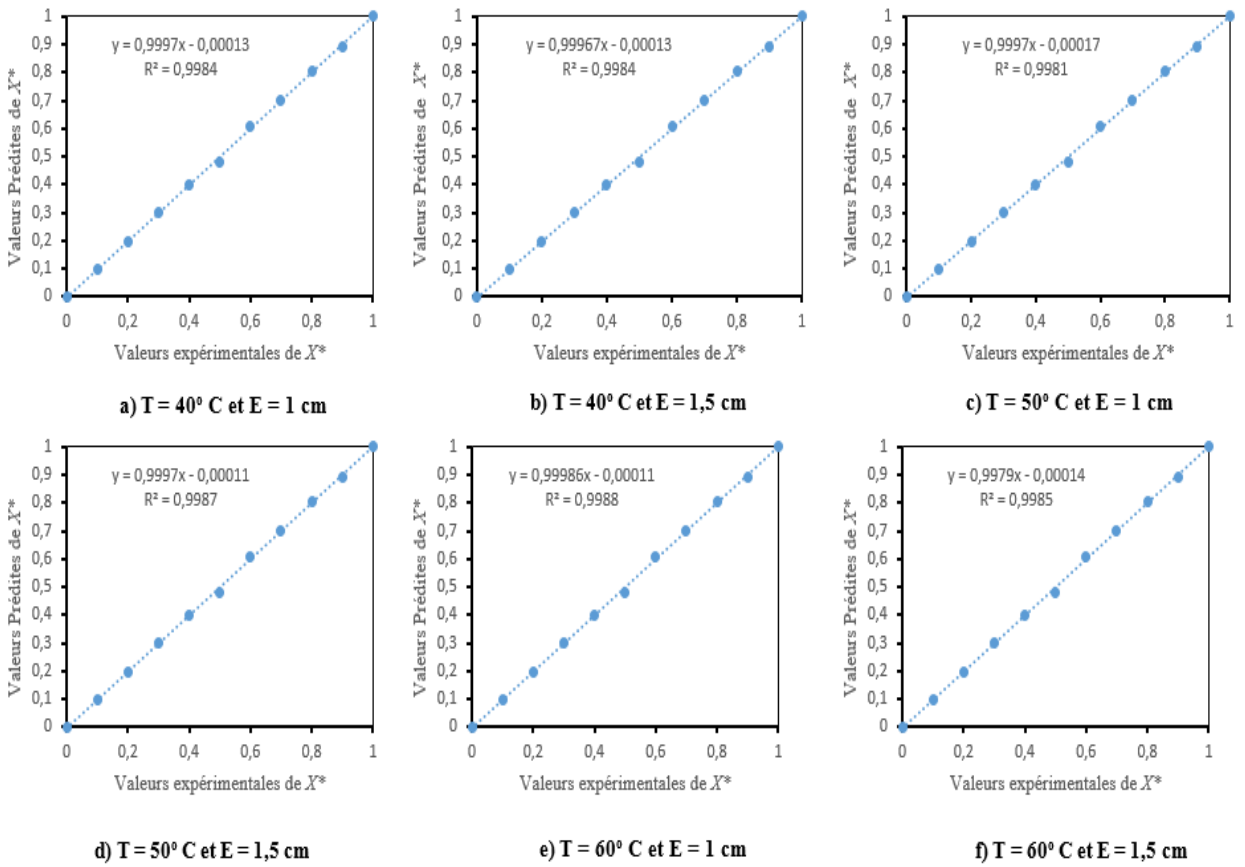


Figure 2 : Représentation graphique du R^2 du modèle Logarithmique pour les températures (40, 50, 60°C) et épaisseurs (1 et 1,5 cm).

Tableau 5 : Estimation de coefficient de diffusion ($Deff$) et de l'énergie d'activation (Ea) des tranches de mangues séchées.

Température ($^\circ\text{C}$)	Épaisseur (cm)	$Deff$ (m^2s^{-1})	Ea (KJmol^{-1})
40	1	8,687 e-09	22,430
40	1,5	8,615 e-09	22,618
50	1	9,026 e-09	23,931
50	1,5	8,907 e-09	24,251
60	1	9,155 e-09	25,325
60	1,5	9,143 e-09	25,358

DISCUSSION

La courbe de séchage des tranches de mangue présente une allure générale décroissante avec trois (03) phases qui se dégagent. La phase de mise en température, la première s'observe pendant les trois (03) premières heures de séchage. La seconde se constate de la 3^{ème} à la 9^{ème} heure à 60 °C, 14^{ème} heure à 50 °C et 17^{ème} heure à 40 °C. La vitesse de séchage des tranches est fonction du couple temps/température comme l'ont indiqué les travaux de Touati (2008), Chekroune (2009), Abouo et al. (2015b) respectivement lors du séchage des feuilles de menthes, de dattes et fèves de cacao. Les vitesses de séchage sont plus importantes pour les températures élevées et pour la faible épaisseur dans tous les cas de figures.

Les courbes caractéristiques de séchage (CCS) correspondantes établies sont des polynômes de degré 3 avec des coefficients de détermination multiple élevés (0,982 ; 0,993 ; 0,984 ; 0,985 ; 0,987 et 0,982).

Des résultats similaires sont rapportés dans la littérature sur le séchage des menthes et du cacao (Touati, 2008 ; Abouo et al., 2015b). Les paramètres et coefficients de séchage des huit modèles retenus ont permis le lissage des données expérimentales aux données prédites. L'analyse des valeurs du paramètre R^2 indique qu'il a évolué de 0,9570 à 0,9922 ; 0,8189-0,9424 ; 0,8905-0,9428 ; 0,9904-0,9984 ; 0,9843-0,9965 ; 0,9879-0,9977, 0,9181-0,9963 et 0,8052-0,9908 respectivement pour les huit modèles (approche diffusion, deux-termes, Henderson et Pabis Modifié, Logarithmique, Middili-Kucuk, Newton, Page et Verma et al.,). L'analyse des valeurs du paramètre R^2 a révélé des valeurs supérieures à 0,80. Cela traduit ainsi un assez bon ajustement des distributions expérimentales et prédites par les modèles testés dans la présente étude (Karidioula et al., 2018 ; Koko et al., 2018). Aussi, les valeurs de χ^2 réduit fluctuent entre 7,42 e-05 et 5,89 e-04 pour le modèle de l'approche de diffusion ; entre 0,0536 et 0,1328 au niveau du modèle

Deux-terme; entre 0,0887 et 0,3108 avec le modèle d'Henderson et Pabis Modifié ; entre 1,58 e-07 et 4,56 e-06 pour le modèle Logarithmique. En ce qui concerne le modèle de Middili-Kucuk, elles sont entre 1,238 e-07 et 1,53 e-06. Les modèles Newton, Page et Verma et al., ont permis d'obtenir les valeurs du χ^2 réduit respectivement de 3,42 e-07 à 1,24 e-05 ; 7,12 e-12 à 1,08 e-07. Les valeurs des EQM enregistrées sont de : 0,0032 à 0,0118 ; 0,1139 à 0,1768 ; 0,1466 à 0,2704 ; 1,95 e-07 à 0,0010 ; 1,71 e-04 à 0,0016 ; 2,33 e-04 à 0,0017 ; 1,31 e-04 à 1,59 e-04 et 0,0051 à 0,0217. Ces valeurs obtenues sont assez faibles dans l'ensemble. Sur la base de ce que le modèle qui décrit le mieux la cinétique de séchage sur couche mince est celui qui présente la valeur la plus élevée du coefficient de détermination (R^2), premier critère de choix; avec de faibles valeurs de χ^2 réduit et EQM, le modèle logarithmique a été retenu pour le séchage conductif des tranches de mangue. Ce modèle a été retenu pour le séchage solaire des fèves de cacao (Akmel et al., 2009). Les valeurs des coefficients de diffusion calculés sont de l'ordre de 10^{-9} , valeur généralement rencontrée dans le cadre des produits végétaux (Hii et al., 2006; Akmel et al., 2009). Les valeurs obtenues sont proches de ceux rapportés par Mamouda et al. (2019), lors du séchage de la mangue dans un séchoir type solaire par convection forcée. La valeur moyenne du coefficient de diffusion rapportée est de 8,866 e-09 m²/s.

Conclusion

Au terme de cette étude, il ressort que le séchage des tranches de mangues dure entre 16h et 18h, 23h et 27h et enfin entre 29h et 33h selon les températures (60, 50 et 40 °C) et épaisseurs (1,5 ; 1 cm) respectives. Les vitesses de séchage sont plus importantes pour les températures élevées et pour la petite épaisseur. Le modèle logarithmique a présenté la valeur du R^2 (0,9984 ; 0,9984 ; 0,9981 ; 0,9987 ; 0,9988 ; 0,9985) les plus élevées et les plus

faibles valeurs de χ^2 (2,43 e-07 ; 1,58 e-07 ; 1,25 e-06 ; 2,02 e-07 ; 4,56 e-06 et 1,37 e-06) et EQM (2,42 e-04 ; 1,95 e-07 ; 5,47 e-04 ; 2,20 e-04 ; 0,0010 et 5,69 e-04) pour les températures et épaisseurs correspondantes. Il décrit donc le mieux le séchage conductif des tranches de mangues. Le coefficient de diffusion (8,615 e-09 à 9,155 e-09 m² / s) dépend fortement de la température de séchage. L'énergie d'activation moyenne est estimée entre 22,430 et 25,358 KJ / mol.

CONFLIT D'INTERETS

Les auteurs attestent qu'il n'y a aucun conflit d'intérêts.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

NVA est le principal investigateur de l'étude et a participé à toutes les phases du travail. AF et YDN ont contribué à la réalisation de l'expérimentation et à la correction du manuscrit. NEA a assuré la supervision générale des travaux et l'interprétation approfondie des résultats.

REFERENCES

Abouo NV, Kassi AB, Soro D, Assidjo NE, Amani NG, Yao KB. 2015a. Impact de sechage solaire et microonde sur la qualité du beurre de cacao (*Theobroma L.*). *Eur. Sci. J.*, **11**(12): 263-273. DOI : <http://eujournal.org/index.php/esj/article/view/5480>

Abouo NV, Akmel DC, Kakou KE, Assidjo NE, Amani NG, Yao KB. 2015b. Modelling of thin layer drying kinetics of cocoa bean in microwave oven and sun. *Food Environ. Saf.*, **XIV**(2) :127-137. DOI : <http://fia-old.usv.ro/fiajournal/index.php/FENS/article/view/24>

Afoakwa E, Kongor J, Takrama J, Budu A. 2013. Changes and nib acidification and biochemical composition during fermentation of pulp pre-conditioned cocoa (*Theobroma cocoa*) beans. *Int.*

Food Res. J., **20**(4): 1843-1853. DOI : <https://www.researchgate.net/publication/270272202>

Afoakwa E. 2008. Cocoa and chocolate consumption- Are there aphrodisiac and other benefits for human health? *Afri. J. Clinic Nutri.*, **21**(3): 107-113. DOI: 10.1080/16070658.2008.11734163

Akmel D, Assidjo N, Yao B. 2008. Effet des dispositifs de séchage à l'air libre sur la qualité des fèves de cacao bord champ, *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, **11** : 45-58. DOI : https://revist.net/REVIST_11/REVIST_11_3.pdf

Akmel DC, Assidjo NE, Kouame P, Yao KB. 2009. Mathematical Modelling of Sun Drying Kinetics of Thin Layer Cocoa (*Theobroma Cacao*) Beans. *J. Appli. Sci. Res.*, **5**(9): 1110-1116. DOI : <https://www.researchgate.net/publication/228508629>

AOAC. 2005. *Official Methods of Analysis* (18th edn). Association of Official Analytical Chemists: Washington, DC, Moisture Content in Plants, 1: 949.

Assovie KO. 2012. Revue nationale pour identifier les initiatives de valorisation non alimentaire de la mangue en Côte d'ivoire. N°12/Coleacp Paepard-01/BNA-12, 43 p.

Belahmidi M, Belghit A, Mrani A, MIR A, Kaoua M. 1993. Approche expérimentale de la cinétique de séchage des produits agro-alimentaires. *Rev. Gen. Therm.*, **380-381**: 444-453. DOI : <https://www.yumpu.com/fr/document/view/50138514>

CBI-Ministry OF Foreign Affairs. 2019. Analyse de la chaine de valeur des fruits transformés au Burkina Faso, Ghana et en Côte d'Ivoire, 178p.

Chekroune M. 2009. Etude comparative de deux types de séchage (convection et microonde) par application des plans d'expériences : Cas des fruits de datte.

- Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, Algérie, 127 p.
- Dembele DD, Amari Ler-N'ogn D, Camara B, Grechi I, Rey J-Y, Kone D. 2019. Pre and postharvest assessment of mango anthracnose incidence and severity in the north of Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **13**(6): 2726-2738. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v13i6.24>
- Floury J, Le bail A, Pham QT. 2008. A three-dimensional numerical simulation of the osmotic dehydration of mango and effect of freezing on the mass transfer rates. *J. Food Eng.*, **85**: 1-11. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.06.011
- Gowen A, Abu-gannam N, Oliviera J. 2008. Modelling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave-hot air drying. *Innov. Food Sci. Emerg.*, **9**: 129-137. DOI: 10.1016/j.ifset.2007.06.009
- Griva I, Nash G, Sofer A. 2009. *Linear and Nonlinear Optimization*. Edition SIAM.
- Hii CL, Law CL, Cloke M. 2006. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *JESTEC.*, **3**(1): 192-198. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.06.022
- Jurendic T. 2012. Determination of controlling resistance to moisture transfer during drying. *J. Food Sci. Technol.*, **4**(1): 34-45. DOI: <https://hrcak.srce.hr/84718>
- Kakou KE, Akmel DC, Abouo NV, Assidjo NE, Niamke LS. 2015. Isotherme d'adsorption d'eau des fèves de cacao (*Theobroma cacao L.*) marchand. *Eur. Sci. J.*, **11**(12): 355-370. DOI: <http://eujournal.org/index.php/esj/article/view/5489>
- Karidioula D, Akmel DC, Assidjo NE, Trokourey A. 2018. Modélisation du séchage solaire de fèves de cacao par le réseau de neurones artificiel. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **12**(1): 195-202. DOI: 10.4314/ijbcs.v12i1.15
- Koko AC, Diomande M, Kouame KB, Assidjo NE. 2018. Détermination expérimentale et modélisation des isothermes d'adsorption d'eau des amandes d'*Irvingia gabonensis* de la région du Haut-Sassandra (Côte d'Ivoire). *IOSR-JESTFT.*, **12**(2): 50-66. DOI: 10.9790/2402-1202025066
- Kone K. 2011. Amélioration de la qualité de la tomate séchée par microondes assisté par air chaud avec pilotage de la puissance spécifique. Thèse de Doctorat, Paris Tech, France, p.1.
- Kouadio A, Aw S, Assidjo N, Kouamé P. 2015. Etude de la qualité physico-chimique et mycologique du cacao (*Theobroma cacao L.*) produit dans les zones de Yamoussoukro et Soubré (Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **13**(1): 330-340.
- Krysiak W. 2011. Effects of convective and microwave roasting on the physicochemical properties of cocoa beans and cocoa butter extracted from this material. *Grasas Y. Aceites*, **62**(4): 467-478. DOI: 10.3989/gya.114910
- Mamouda MA, Saidou M, Makinta B. 2019. Drying kinetics of tomato, Okra, Potato and Mango in a forced convective solar tunnel dryer. *Int. J. Green. Energy*, **8**(2): 34-44. DOI: 10.11648/j.ijrse.20190802.12
- Midilli A, Kucuk H. 2003. Mathematical modelling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Convers. Manag.*, **44**(7): 1111-1122. DOI: 10.1016/S0196-8904(02)00099-7
- N'goran ZE, Aw S, Assidjo NE, Kouame LP. 2012. Influence des paramètres de l'osmotique déshydratation sur la perte d'eau dans la papaye et la mangue. *J. Appl. Biosci.*, **59**: 4330-4339. DOI: <http://www.m.elewa.org/JABS/2012/59/6.pdf>

- Nogbou ALI, Akmel DC, Brou KD, Assidjo NE. 2015. Modélisation de la cinétique de séchage des fèves de cacao par des modèles semi-empiriques et par un réseau de neurones artificiels récurrent: cas du séchage microonde par intermittence. *Eur. Sci. J.*, **11**(9): 118-133. DOI: <https://ejournal.org/index.php/esj/article/view/5283>
- Nouar M, Decreux Y, Marty O. 2013. Evaluation du potentiel à l'exportation des fruits tropicaux Côte d'Ivoire. Programme d'Appui au Commerce et à l'Intégration Régionale (PACIR), 170 p.
- Roberts J, Kidd D, Padilla-Zakour O. 2008. Drying kinetics of grape seeds, *J. Food Eng.*, **89**: 460-465. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.05.030
- Sorour H, EL-Mesery H. 2014. Effect of microwave and infrared radiation on drying of onion slices. *IJRANSS.*, **2**(5): 119-130. DOI: <http://oaji.net/articles/2014/491-1404713441.pdf>
- Togrul I, Pehlivan D. 2004. Modeling of thin layer drying of some fruits under open-air sun drying process. *J. Food Eng.*, **65**: 413-425. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.02.001
- Touati B. 2008. Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*). Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, p. 73.
- Verma L, Bucklin R, Endan J, Wratten F. 1985. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, **28**: 296-301. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.32245>
- Yah NM. 2015. Anthracnose de la mangue (*Mangifera indica* L.) en Côte d'Ivoire: Caractérisation de l'agent pathogène et efficacité in vitro et in vivo de deux fongicides chimiques. Thèse de Doctorat Unique, Université Nanguy Abrogoua, Côte d'Ivoire, p. 3.
- Yaldiz O, Ertekin C, Uzun HB. 2001. Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, **26**: 457-465. DOI: 10.1016/S0360-5442(01)00018-4.