



**Original Paper**

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

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

## Modélisation mathématique du séchage artificiel (sous air chaud) de la pomme de cajou (*Anacardium occidentale* L.)

Yevi Delphine N'GUESSAN<sup>1\*</sup>, N'guessan Verdier ABOUO<sup>1,2</sup>, Essoh Eric AKPA<sup>1</sup>,  
Yacouba KAMARA<sup>1</sup> et Nogbou Emmanuel ASSIDJO<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Laboratoire 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 : [delphineyevi@yahoo.fr](mailto:delphineyevi@yahoo.fr)

Received: 24-04-2023

Accepted: 23-06-2023

Published: 30-06-2023

### RESUME

Le séchage est une technique utilisée pour la conservation des produits agricole. Ce travail de recherche visait à étudier le séchage des pommes de cajou préalablement trempées dans des solutions (mélasse et saccharose) osmotiques afin d'optimiser le processus. Les expériences ont été menées à partir d'une matrice composite et le séchage s'est réalisé en suivant la méthode gravimétrique statique. Les valeurs expérimentales ont été ajustées à huit modèles empiriques à l'aide de la méthode du gradient (développée puis implémentée dans le logiciel MatlabR2016a) afin d'estimer les paramètres et coefficients. Les critères statistiques que sont le coefficient de corrélation  $r$ , l'erreur quadratique moyenne (EQM) et le  $\chi^2$  ont servi à justifier le choix du modèle d'ajustement idéal. Le séchage a duré en moyenne 34 heures pour l'ensemble des échantillons trempés dans les solutions (mélasse, saccharose). Le modèle de l'approche diffusion est retenu et présente les valeurs du  $r$  (0,9822 ; 0,9986 ; 0,9966) les plus élevées et les plus faibles valeurs de  $\chi^2$  (0,0013 ; 0,0035 et 0,0072) et EQM (0,0019 ; 0,0005 et 0,0003). Le coefficient de diffusion varie de 9,876 E-09 à 7,416 E-08 m<sup>2</sup>/s et dépend fortement de la température de séchage. L'énergie d'activation est estimée entre 18,548 – 21,430 KJ/mol.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

**Mots clés :** Séchage, pomme de cajou, modèles, coefficient de diffusion, énergie d'activation.

### ABSTRACT

Drying is a technique used to preserve agricultural products. The aim of this research was to study the drying of cashew apples previously soaked in osmotic solutions (molasses and sucrose) in order to optimize the process. The experiments were conducted using a composite matrix and the drying was carried out following the static gravimetric method. The experimental values were fitted to eight empirical models using the gradient method (developed and then implemented in MatlabR2016a software) to estimate the parameters and coefficients. The statistical criteria of correlation coefficient  $r$ , root mean square error (RMSE), and  $\chi^2$  were used

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v17i4.25>

9418-IJBSC

to justify the selection of the ideal fitting model. Drying time averaged was 34 hours for all samples soaked in the solutions (molasses, sucrose). The diffusion approach model is selected and has the highest values of  $r$  (0.9822; 0.9986; 0.9966) and the lowest values of  $\chi^2$  (0.0013; 0.0035 and 0.0072) and MSE (0.0019; 0.0005 and 0.0003). The diffusion coefficient varies from 9.876 E-09 to 7.416 E-08 m<sup>2</sup>/s and is strongly dependent on the drying temperature. The activation energy is estimated between 18.548 - 21.430 KJ / mol.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

**Keywords:** Drying, cashew apple, models, diffusion coefficient, activation energy.

## INTRODUCTION

L'agriculture contribue fortement aux recettes des pays à sol fertile, c'est le cas de la Côte d'Ivoire où elle représentait 19,9% du PIB (Banque mondiale, 2023). Elle prenait en compte les cultures d'exportation, comme le café, le cacao, et les cultures de diversification comme la mangue et l'anacarde (Ouattara, 2018). En ce qui concerne l'anacarde, la Côte d'Ivoire en était le 1er producteur mondial en 2021 avec plus de 968 676 tonnes (CCI France Côte d'Ivoire, 2022). Après récolte des fruits, seules les noix représentant 15% du fruit sont utilisées, tandis que les pommes sont laissées pour compte et pourrissent dans les champs (Kouadio et al., 2022). Ceci entraîne des pertes d'environ 6 millions de tonnes de pomme de cajou (CCI France Côte d'Ivoire, 2022). Cette énorme perte post-récolte est attribuée à plusieurs facteurs, notamment l'insuffisance de connaissances et de compétences post-récolte appropriées ainsi que les propriétés périssables de la pomme de cajou (Nwosu et al., 2016). Par ailleurs, la pomme de cajou est sujette à un pourrissement rapide dès sa récolte dû à sa forte teneur en eau (environ 85 %) qui favorise la prolifération de germes d'altération. Afin d'améliorer la durée de conservation, différentes méthodes ont été développées dont la déshydratation (Mohsenin, 1980). La déshydratation réduit le poids et le volume des produits pour les transports ce qui permettrait d'obtenir des coûts de stockage moins élevés. La déshydratation des aliments est réalisée par différentes techniques comme le séchage (Bonazzi et al., 2008). Elle permet de diminuer l'activité de l'eau d'un aliment (Abouo et al., 2021). Egalement, le prétraitement peut être utilisé pour réduire la teneur en eau initiale du fruit ou pour modifier la structure des tissus du

fruit de manière à accélérer le séchage (Fernandez et al., 2008). La déshydratation osmotique qui est une technique traditionnelle de conservation des aliments, a récemment fait l'objet d'une attention considérable comme méthode de prétraitement, en raison de ses faibles besoins en énergie et en capital par rapport aux autres méthodes conventionnelles (Falade et al., 2003). C'est un processus d'élimination de l'eau dans lequel les matériaux cellulaires, tels que les fruits et les légumes sont immergés dans une solution concentrée de sucre ou de sel (N'goran et al., 2012). Les travaux d'Azoubel et Murr (2003) ont amélioré considérablement le processus pour obtenir une perte d'eau maximale et une perméation minimale des solides en utilisant du saccharose et du sirop de maïs. Le processus de déshydratation osmotique pourrait être utilisé avec succès pour réduire le poids d'environ 50%. Le séchage quant à lui est une opération post-récolte très importante dans la transformation des produits agro-alimentaires (Abouo et al., 2015b). Il permet de diminuer la teneur en eau ; pour ces raisons, il est nécessaire de le maîtriser afin de l'optimiser (Abouo et al., 2020). La maîtrise du séchage implique nécessairement une aptitude à prédire, à tout instant, l'évolution des caractéristiques physiques de séchage tel que la teneur en eau du produit (Abouo et al., 2020). Cette aptitude peut être obtenue grâce à la modélisation (Nogbou et al., 2015). Plusieurs modèles mathématiques ont été proposés pour décrire le processus de séchage. Ils peuvent être classés en modèles théoriques, modèles semi empiriques et modèles empiriques (Prati, 1990). Les modèles théoriques selon leur complexité, détaillent finement les mécanismes de transfert. Malheureusement, la

difficulté d'obtention de certains paramètres limite parfois leur utilisation. Les modèles semi-empiriques et empiriques, ne permettent pas de distinguer l'ensemble des mécanismes internes de transfert de l'eau. Cependant, du fait de leur aptitude à faire de bons ajustements, ils sont largement employés dans des travaux de séchage, particulièrement dans la description du comportement de l'eau dans le produit (Dadali et al., 2007 ; Hii et al., 2008 ; Murthy et Manohar, 2012). Parmi les modèles de séchage, les modèles empiriques bénéficient depuis quelques années d'un intérêt particulier dans le domaine du séchage (Akpinar et al., 2003). Couplé séchage-osmose serait opportun pour la réduction de la teneur en eau tout en maintenant la presque totalité des éléments nutritifs dans le matériel végétal (Azoubel et Murr (2003). Face aux nombreuses pertes post-récolte enregistrées, 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 qui contribueront à apporter des solutions à la problématique des pertes post-récoltes des pommes de cajou permettant ainsi leur disponibilité afin d'ouvrir de nouvelles voies de valorisation. Ce travail a consisté à :

- Caractériser le séchage des pommes de cajou à travers l'établissement des courbes de séchage, la détermination de la vitesse et des courbes caractéristiques de séchage (CCS) ;
- Etudier la cinétique de séchage des pommes de cajou traitées à partir de huit (08) modèles empiriques décrites dans la littérature ;
- Quantifier l'énergie d'activation et le coefficient de diffusion de l'eau au cours du séchage des pommes de cajou.

## MATERIEL ET METHODES

### • Préparation de l'échantillon

Le matériel biologique était constitué de vingt-cinq (25) kilogramme de pomme de cajou récoltées dans des plantations de la ville de Yamoussoukro (6°49'13" N 5°16'36" W) (capital économique de la Côte d'Ivoire) courant février 2023 (Figure 1). Les échantillons ont été transportés au laboratoire pour la suite des travaux. Le faux fruit a été

séparé de la noix, lavé puis trempé dans les solutions de mélasse et de saccharose selon le domaine expérimental du plan central composite (Tableau 1).

### • Procédure de séchage de la pomme de cajou

Les pommes de cajou entières trempées ont été par la suite découpées en tranches (8 à 10 mm) et mise à sécher dans une étuve (MMM MEDCENTER Venticell, Berlin) à cinquante (50 °C) degré. Les essais de séchage ont été menés et la perte différentielle de masse des échantillons a été constatée 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., 1999). La Figure 2 présente les étapes clés du séchage. En fin de séchage, la teneur en eau résiduelle a été déterminée selon la méthode AOAC (2005). Le Tableau 2, présente les informations relatives aux essais d'expérimentations menées.

### • Modélisation mathématiques du séchage des tranches de pomme de cajou

Les teneurs en eau d'équilibre des échantillons séchés (tranches sèches de pomme de cajou) 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.

Le Tableau 3 présente des modèles empiriques décrits dans la littérature utilisés pour simuler la cinétique de séchage des produits végétaux et la nomenclature afférente aux modèles consignée au Tableau 4. Au nombre de huit, retenus pour cet exemple, 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 implémenté pour estimer les coefficients et paramètres à l'aide du logiciel MatLab R2016a (Griva, 2009 ; Abouo

et al., 2015a). Les critères statistiques d'appréciation du lissage des données expérimentales aux différents modèles empiriques décrites dans la littérature a été faite pour : le coefficient de détermination multiple  $R^2$  proche de l'unité (1) et pour de faibles valeurs de l'erreur quadratique moyen (EQM) et  $\chi^2$  proches de zéro (0) (Nogbou et al., 2015 ; Karidioula et al., 2018).

- **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). (Robert et al., 2008 ; Touati, 2008 ; Akmel et al., 2009)

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

Avec :

- $D_{eff}$  est le coefficient de diffusivité effectif (m<sup>2</sup>/s);
- L est la demi-épaisseur de la dalle (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 :

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

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

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

Où  $D_0$  est la constante dans l'équation d'Arrhenius (m<sup>2</sup> /s),  $E_a$  est l'énergie d'activation (kJ/mol), T est la température de séchage (°C) et R est la constante des gaz parfaits (kJ/mol. K)

- **Analyses statistiques**

Tous les essais de séchage ont été réalisés en triple selon le plan central composite, soit 39 (13 x 3) série de séchage sur la base du plan d'expérience et trois (03) essais pour l'échantillon témoin, soit un total de 42 séries d'essais 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 les paramètres statistiques de choix de modèles (Abou et al., 2020 ; Abou et al., 2021).



**Figure 1** : Echantillon de pomme de cajou récolté.

**Tableau 1** : Domaine expérimental du plan central composite.

Paramètres	Valeurs codées / réelles				
	-r	-1	0	1	+r
X <sub>1</sub> (Trempage)	3	6,074	13,5	20,93	24
X <sub>2</sub> (Concentration °B)	50	52,93	60	67,07	70

°Brix (matière sèche soluble)



A : échantillon dans une solution de saccharose ; B : échantillon dans une solution de mélasse C : étude contenant échantillon pour séchage ; D : échantillon sous forme tranche avant séchage E : échantillon séché prétraité avec le saccharose ; F : échantillon séché prétraité avec la mélasse.

**Figure 2** : Etapes clés de la procédure de séchage.

**Tableau 2 :** Valeurs récapitulatives du tableau d'expérimentation.

N° d'Essai	Variables	
	X <sub>1</sub> (Trempage (H))	X <sub>2</sub> (Concentration °B)
1	6,074	52,93
2	6,074	67,07
3	20,93	52,93
4	20,93	67,07
5	3	60
6	24	60
7	13,5	50
8	13,5	70
9	13,5	60
10	13,5	60
11	13,5	60
12	13,5	60
13	13,5	60

°Brix (matière sèche soluble)

**Tableau 3 :** Modèles empiriques de séchage utilisés.

MODELES	EQUATIONS MATHEMATIQUES	REFERENCES
<b>Approche-Diffusion</b>	$X^* = aexp^{-kt} + (1 - a)exp^{-kbt}$	Gowen et al., 2003
<b>Deux-Terms</b>	$X^* = aexp^{-k_0t} + bexp^{-k_1t}$	Robert et al., 2008
<b>Henderson et Pabis modifié</b>	$X^* = aexp^{-kt} + bexp^{-gt} + cexp^{-ht}$	Abouo et al., 2015b
<b>Logarithmique</b>	$X^* = aexp^{-kt} + c$	Togrul et Pehlivan, 2004
<b>Middili &amp; Kucuk</b>	$X^* = aexp^{-kt^n} + bt$	Midilli & Kucuk, 2003
<b>Newton</b>	$X^* = exp^{-kt}$	Nogbou et al., 2015
<b>Page</b>	$X^* = exp^{-kt^n}$	Akmel et al., 2009
<b>Verma et al.,</b>	$X^* = aexp^{-kt} + (1 - a)exp^{-gt}$	Verma et al., 1985

Avec : a, b, c, g, h, k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub> paramètres et coefficients à déterminer.

Les critères statistiques de choix des modèles ont été :

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

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

$$\text{Erreur Quadratique Moyenne : } EQM = \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (X^*_{exp,i} - X^*_{pre,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

(Sorour et El-Mesery, 2014 ; Kakou et al., 2015)

**Tableau 4** : Nomenclature.

<b>Classification</b>	
a,b,c	Coefficient de séchage
EQM	Erreur quadratique moyen
k, g, n, h	Constantes de séchage
N	Nombre d'observation
R <sup>2</sup>	Coefficient de détermination
X*	Teneur en eau réduite
MS	matière sèche
<b>Greek symbols</b>	
$\chi^2$	Chi carré réduit
<b>Subscript</b>	
<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

Pour la suite des analyses statistiques, un ajustement moyen à partir des nuages de points qui ont servi à l'établissement des courbes de séchage, les CCS, le calcul des vitesses de séchage, de la modélisation et la détermination des paramètres physiques (coefficient de diffusion et énergie d'activation). L'évolution de la perte différentielle de la masse des échantillons au cours du séchage est illustrée par la figure 2. Cette perte de masse présente une allure générale décroissante. Trois (03) phases de séchage se dégagent. La première (01) qualifié de mise en température s'observe pendant les deux (02) premières heures de séchage pour tous les échantillons. La seconde phase se constate de la 2<sup>ème</sup> heure de séchage à la 18<sup>ème</sup> heure. C'est la phase de séchage à vitesse constante. La phase de ralentissement juste après la fin de la seconde phase et ce jusqu'en fin de séchage intervenant autour de la 34 heure

cumulée de séchage (Figure 3). De façon générale, la vitesse de séchage des tranches est fonction du couple temps/température comme l'ont indiqué les travaux de Chekroune (2009) lors du séchage des dattes. Les vitesses de séchage sont relativement plus fortes pour les échantillons non traités par les solutions (mélasse et saccharose du fait de l'abondance de la quantité en eau libre dans le produit comparé à ceux traité de plus faible quantité. Les vitesses moyennes de séchage déterminées sont exprimées en g H<sub>2</sub>O/g.MS/h et sont les suivantes :

- 0,1429 pour l'échantillon témoin (non-traité)
- 0,0921 pour les échantillons issus du traitement avec la mélasse
- 0,0972 pour les échantillons issus du traitement avec le saccharose

Les courbes caractéristiques de séchage (CCS) correspondantes ont été établies en représentant les vitesses de séchage normées en

fonction des teneurs en eau réduites pour les différents types d'échantillons. 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 (0,9693 ; 0,9713 et 0,9773) et proches de l'unité (1). Des résultats similaires sont rapportés dans la littérature sur le séchage des menthes et du cacao (Touati, 2008 ; Abouo et al., 2015a). Les expressions mathématiques obtenues sont les suivantes :

- $Y_T = 0,0004X^3 - 0,0102X^2 + 0,0803X - 0,0565$
- $Y_{E. \text{mél}} = 0,0002X^3 - 0,0077X^2 + 0,0707X - 0,0263$
- $Y_{E. \text{sac}} = 0,0002X^3 - 0,0084X^2 + 0,0726X - 0,0264$

Le Tableau 5 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 corrélation (r), le Chi carré ( $\chi^2$ ) réduit, l'erreur quadratique moyenne (EQM). L'analyse du tableau 5 révèle que les valeurs du paramètre r évoluent de 0,9822-0,9986 ; 0,6355-0,9146 ; 0,6059-0,8566 ; 0,5729-0,9552 ; 0,9687-0,9698 ; 0,7256-0,9887 ; 0,9586-0,9694 et 0,9098-0,9698 respectivement pour les huit modèles (Approche diffusion, Deux-termes, Henderson et Pabis Modifié, Logarithmique, Middili & Kucuk, Newton, Page et Verma et al.). Toutes les valeurs obtenues sont supérieures à 0,80 en ce qui concerne les échantillons ayant subi l'effet de l'osmose. 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., 2019). Aussi, les valeurs de  $\chi^2$  réduit fluctuent de 0,0013-0,0072 pour le modèle de l'Approche de diffusion ; de 0,0673-0,1104 au niveau du modèle Deux-termes ; de

0,0837-0,1471 avec le modèle d'Henderson et Pabis Modifié ; de 0,1425-2,2620 pour le modèle Logarithmique. En ce qui concerne le modèle de Middili & Kucuk, les valeurs de 0,1237-0,1735 ont été obtenues. Les modèles Newton, Page et Verma et al., ont permis d'obtenir les valeurs du  $\chi^2$  réduit respectivement de 0,0764-0,1328 ; 0,1810-0,7412 et 0,0791-0,1356. Les valeurs des EQM enregistrées sont de : 0,0003-0,0019 ; 0,4341-0,5779 ; 0,5458-0,7486 ; 0,4900-3,0203 ; 0,1704-0,6112 ; 0,3527-0,4747 ; 0,1105-0,3106 et 0,0015-0,4969. 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 corrélation (r), premier critère de choix et de basses valeurs de  $\chi^2$  réduit, EQM, le modèle de l'Approche de diffusion est retenu pour le phénomène d'osmose- séchage des tranches de pomme de cajou préalablement trempées dans de la mélasse et du saccharose.

L'estimation du coefficient de diffusion et l'énergie de diffusion lors du séchage des tranches de mangues sont consignés dans le Tableau 6. Les valeurs des coefficients de diffusion calculés sont de l'ordre de  $10^{-7}$ - $10^{-9}$ , valeur généralement rencontrées dans le cadre des produits végétaux -tropicaux (Hii et al., 2008 ; 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 m<sup>2</sup>/s. Les valeurs des coefficients de détermination multiple varient de 0,9763-0,9987 sont élevés indiquant une bonne adéquation entre le coefficient de diffusion et les différentes températures de séchage (Akmel et al., 2009 ; Mamouda et al., 2019 ; Abouo et al., 2020, respectivement lors du séchage des fèves de cacao, et tranche de mangue).



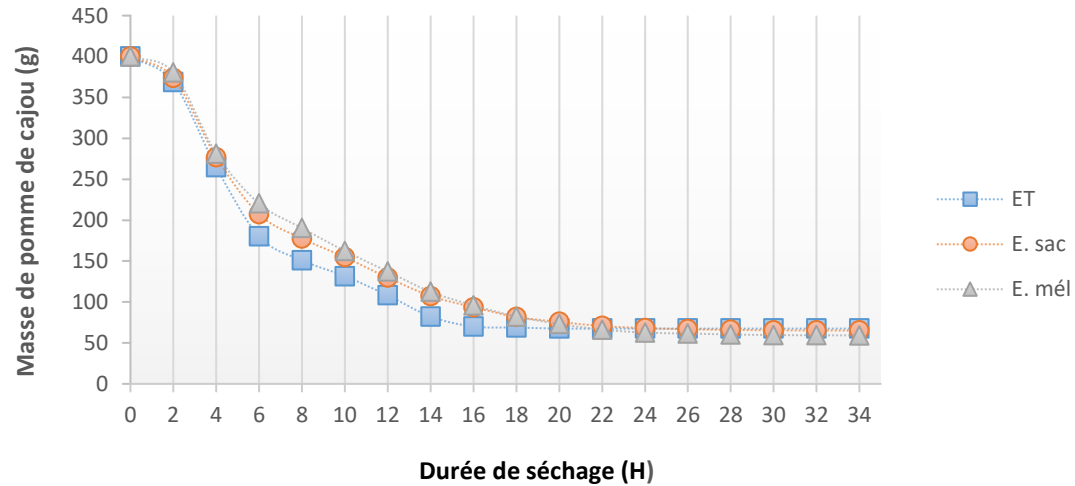
**Tableau 5** : Valeurs des coefficients, paramètres et critères statistiques issus de la modélisation.

Modèles Utilisés	Ech. Solut <sup>o</sup> .	Paramètres et coefficients des modèles de la présente étude									Critères statistiques			
		a/A1	b	c	g	h	k	k0	k1	n	r	$\chi^2$	EQM	
<b>Approche</b>	<b>ET</b>	0,2400	0,3946				0,1367					0,9822	0,0013	0,0019
<b>Diffusion</b>	<b>E. mél</b>	0,2111	0,2890				0,2266					0,9986	0,0035	0,0005
	<b>E. sac</b>	0,2124	0,2886				0,2291					0,9966	0,0072	0,0003
<b>Deux-Terms</b>	<b>ET</b>	0,9712	0,6355					0,0084	0,0357			0,6355	0,0988	0,5779
	<b>E. mél</b>	0,8526	0,3590					0,0095	0,0471			0,9146	0,1104	0,5215
	<b>E. sac</b>	0,8533	0,3601					0,0095	0,0471			0,9008	0,0673	0,4341
<b>Henderson</b>	<b>ET</b>	0,9846	0,6192	0,3715	0,0089	0,0089	0,0083					0,6059	0,1471	0,7486
<b>Pabis M.</b>	<b>E. mél</b>	0,8663	0,5419	0,3251	0,0096	0,0096	0,0094					0,8566	0,1101	0,6038
	<b>E. sac</b>	0,8670	0,5423	0,3254	0,0096	0,0096	0,0094					0,8394	0,0837	0,5458
<b>Logarithmique</b>	<b>ET</b>	-3,295		0,4787					4,9 E-04			0,5729	2,2620	3,0203
	<b>E. mél</b>	0,0524		0,2236					0,1651			0,9453	0,2142	0,6128
	<b>E. sac</b>	0,0183		0,2292					0,1653			0,9552	0,1425	0,4900
<b>Middili &amp; Kucu</b>	<b>ET</b>	0,0601	0,0177				0,2842			0,7192		0,9695	0,1237	0,1704
	<b>E. mél</b>	0,0678	0,0181				0,2824			0,7228		0,9698	0,1536	0,6004
	<b>E. sac</b>	0,0589	0,0148				0,2745			0,7541		0,9687	0,1745	0,6112
<b>Newton</b>	<b>ET</b>						0,0390					0,7256	0,0870	0,3994
	<b>E. mél</b>						0,0852					0,9820	0,1328	0,4747
	<b>E. sac</b>						0,0848					0,9887	0,0764	0,3527

	<b>ET</b>				0,1518	0,2286	0,9690	0,1810	0,1105
<b>Page</b>	<b>E. mél</b>				0,1443	0,2571	0,9694	0,7122	0,3106
	<b>E. sac</b>				0,1452	0,2456	0,9586	0,7412	0,1452
<b>Verma et al.,</b>	<b>E.T</b>	0,7212		0,2659			0,9098	0,0804	0,0015
	<b>E. mél</b>	0,5691		0,2629			0,9692	0,1356	0,4969
	<b>E. sac</b>	0,5702		0,2663			0,9698	0,0791	0,3826

Avec :

- ET : échantillon témoin
- E. mél : échantillon trempé dans de la mélasse
- E. sac : échantillon trempé dans le saccharose



ET : échantillon témoin, E.sac : échantillon saccharose, E.mél : échantillon mélasse

**Figure 3** : Evolution de la perte différentielle de masse des tranches de pomme au cours du séchage.

**Tableau 6 :** Estimation de coefficient de diffusion ( $m^2s^{-1}$ ) et de l'énergie d'activation ( $E_a$ ) des tranches de pommes de cajou séchées.

Echantillon	$D$ ( $m^2s^{-1}$ )	$r$	$E_a$ ( $KJmol^{-1}$ )
ET	9,876 E-09	0,9763	21,430
E. mél	7,322 E-08	0,9975	18,968
E. sac	7,416 E-08	0,9987	18,548

### Conclusion

Au terme de cette étude, il ressort que le séchage à 50°C des tranches de pommes de cajou ayant subi l'osmose (mélasse et saccharose) s'effectue en 34 heures. Les vitesses de séchage sont plus fortes pour les échantillons n'ayant pas subi d'osmose. Le modèle de l'Approche de diffusion est retenu et présente les valeurs du  $r$  (0,9822 ; 0,9986 ; 0,9966) les plus élevées et les plus faibles valeurs de  $\chi^2$  (0,0013 ; 0,0035 et 0,0072) et EQM (0,0019 ; 0,0005 et 0,0003). Le coefficient de diffusion varie de 9,876 E-09 à 7,416 E-08  $m^2 / s$  et dépend fortement de la température de séchage. L'énergie d'activation moyenne est estimée entre 18,548 – 21,430 KJ/mol.

### CONFLIT D'INTERETS

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

### CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

YDN est le principal investigateur de l'étude et a participé à toutes les phases du travail. NVA, EEA et YK 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, Akmel DC, Kakou KE, Assidjo NE, Amani NG, Yao KB. 2015. 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>

Abouo NV, Kassi AB, Soro D, Assidjo NE, Amani NG, Yao KB. 2015. Impact de séchage solaire et microonde sur la qualité du beurre de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Eur. Sci. J.*, **11** (12): 263-273. DOI :

<http://eujournal.org/index.php/esj/article/view/5480>

Abouo NV, Fofana A, N'guessan YD, Assidjo NE, 2020. Modélisation mathématique du séchage dans un four (air chaud) de tranches de mangue (*Mangifera indica* L.). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **14**(7): 2476-2490. DOI: 10.4314/ijbcs.v14i7.9

Abouo NV, Fofana A, N'guessan YD, Chatigre KO, Assidjo NE. 2021. Mathematical modeling of water adsorption isotherm in corn (*Zea mays* L.) dry grain. *Asian J. Appl. Sci. Technol.* **12**(01) : 11452-1146. DOI : 8290.pdf (journalajst.com)

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

Akpinar EK, Bicer Y, Yildiz C. 2003. Thin layer drying of red pepper. *J. Food Eng.*, **59**(1): 99-104. DOI: 10.1016/s0260-8774(02)00425-9

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

Azoubel PM, Murr FEX. 2003. Optimisation of osmotic dehydration of cashew apple (*Anacardium Occidentale* L.) in sugar solutions. *Food Sci. Technol. Int.*, **9**(6): 427-433. DOI : OPB1342.pdf (embrapa.br)

- Banque mondiale, 2022. Agriculture, valeur ajoutée (% du PIB). Données des comptes nationaux de la Banque mondiale et fichiers de données des comptes nationaux de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques). [En ligne] (page consulté le 27/07/2022 à 12h <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NV>. AGR.TOTL.ZS?end=2020&locations=C I&start=1960&view=chart
- 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>
- Bonazzi C, Dumoulin E, Bimbenet J. 2008. Le séchage des produits alimentaire. *Industrie Alimentaire Agricole*, **125** (03-04): 12-22.
- CCI (Chambre de Commerce et d'Industrie) France Côte d'Ivoire, 2022. Agriculture : la noix de cajou 2eme produit d'exportation agricole après le cacao. [En ligne] (page consulté le 26/07/2022 à 9h). <https://www.ccifci.org/actualites/n/news/agriculture-la-noix-de-cajou-2eme-produit-dexportation-agricole-apres-le-cacao-premier-ministre.html>
- Chekroune M. 2009. Etude comparative de deux types de séchage (convection et microonde) par application des plans d'expériences : Cas des fruits de datte, Master, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, Algérie, 127p. <http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/811/1/Chekroune%20Malika.pdf>
- Dadali G, Demirhan E, Ozbek B. 2007 Microwave Heat Treatment of Spinach: Drying Kinetics and Effective Moisture Diffusivity. *Drying Technol.*, **25** : 1703-1712. DOI:10.1080/07373930701590954
- Falade KO, Akinwal TO, Adedokun OO. 2003. Effect of drying methods on osmotically dehydrated cashew apples. *Euro Food Res. Technol.*, **216**(6): 500-504. DOI:10.1007/s00217-003-0673-8
- Fernandes FAN, Izabel GM, Rodrigues S. 2008. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pretreatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT*, **41**: 604-610. DOI:10.1016/j.lwt.2007.05.007
- 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
- Fonteles TV, Akf L, Ara S, Carneiro APG, Miguel EC, Cavada BS, Fernandes FAN, Rodrigues S. 2016. Ultrasound processing to enhance drying of cashew apple bagasse puree: Influence on antioxidant properties and *in vitro* bioaccessibility of bioactive compounds. *Ultrason. Sonochem.*, **31**: 237-249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.003>
- Gowen A, Abu-Ghannam N, Oliviera J. 2008. Modelling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave-hot air drying. *Innov Food Sci Emerg Technol.*, **9**: 129-137. DOI: 10.1016/j.ifset.2007.06.009
- Griva I, Nash G, Sofer A. 2009. Linear and Nonlinear Optimization, Edition SIAM, 581p. DOI: [Linear-and-Nonlinear-Optimization-Second-Edition.pdf](https://www.wordpress.com/Linear-and-Nonlinear-Optimization-Second-Edition.pdf) (wordpress.com)
- Hii CL, Law CL, Cloke M. 2008. Modelling of thin layer drying kinetics of coca beans during artificial and natural drying. *J. Eng. Sci. Technol.*, **3**(1) : 1-10. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.06.022
- Kakou K, Akmel D, Abouo N, Assidjo N, Niamke S. 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). *J. Environ. Sci., Toxicol. Food Technol.*, **12**(2): 50-66. DOI: 10.9790/2402-1202025066
- Kouadio KE, Kreman K, Kouadja GS, Bamba LK. 2022. Effet de la poudre de pomme de cajou dans l'aliment sur les performances zootechniques et économiques du poulet de chair en phase finition. *Int. J. Innovation Appl. Stud.*, **36**: 545-552. DOI: IJIAS-22-074-18.pdf
- Mamouda MA, Saidou M, Makinta B. 2019. Drying kinetics of tomato, Okra, Potato and Mango in a forced convective solar tunnel dryer. *Int. J. Sustain. 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
- Mohsenin NN. 1980. Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials (1st Edn). CRC Press : London. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003062332>
- Murthy TPK, Manohar B. 2012. Microwave drying of mango ginger (*Curcuma amada Roxb*): prediction of drying kinetics by mathematical modelling and artificial neural network. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **47** : 1229-1236. DOI:10.1111/j.1365-2621.2012.02963.x
- N'goran ZE, Aw S, Assidjo NE, Kouame LP. 2012. Influence des paramètres de la déshydratation osmotique 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 A, Akmel D, Brou K, Assidjo N. 2015. Modélisation de la cinétique de séchage des fèves de cacao par des modèles semi-empiriques et par un réseau de neurones artificiels récurrents : cas du séchage microonde par intermittence. *Eur. Sci. J.*, **11**(9): 118-133. DOI : <https://ejournal.org/index.php/esj/article/view/5283>
- Nwosu C, Adejumo OA, Udoha WN. 2016. Cashew apple utilization in Nigeria: challenges and prospects. *J. Stored Prod. Postharvest Res.*, **7**: 29-31. DOI : <https://doi.org/10.5897/JSPPR2015.0190>
- Ouattara GM. 2018. Analyse de la dynamique de l'offre de noix brutes de cajou en Côte d'Ivoire : une application par l'approche autorégressif à retards échelonnés (ARDL). *Eur. Sci. J.*, **14**(34): 292-306. DOI: <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n34p292>
- Prati M. 1990. A theoretical model for thin layer grain drying. *Dry. Technol.*, **8** : 101-122.
- 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. *Int. J. Res. Sci.*, **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, p13.
- 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.
- 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