



## Étude des modèles de séchage en couche mince pour le séchage artificiel et solaire direct à convection naturelle du cacao

Karidioula Daouda<sup>1,3\*</sup>, Manouan W. Max Robin<sup>1</sup>, Kouakou L. Prisca Marie-Sandrine<sup>2</sup>, Assidjo Nogbou Emmanuel<sup>3</sup>, Trokourey Albert<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UFR Sciences et Technologies, Laboratoire de chimie, Université de Man, BP 20 Man, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>UFR SSMT, Laboratoire de Constitution et Réaction de la Matière, Université Félix Houphouët Boigny (UFHB) de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire

<sup>3</sup>UMRI Sciences des Procédés Alimentaires Chimiques et Environnementaux, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), BP 1313 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

Reçu: 11 Novembre 2021 / Reçu sous sa forme révisée: 22 Décembre 2021 / Accepté: 30 Décembre 2021

### Résumé:

La cinétique de séchage des fèves de cacao en couche mince a été étudiée pour différentes conditions de l'air asséchant. Les expériences sont effectuées sous serre et dans une étuve à différentes températures de l'air de séchage (42 °C, 50 °C et 60 °C). Les courbes d'évolution de la perte en eau, l'influence de la température de l'air asséchant et celle du mode de séchage sont étudiées afin de déterminer la courbe caractéristique de séchage (CCS) du cacao. Les courbes expérimentales présentées en teneurs en eau réduites en fonction du temps de séchage sont approchées par des modèles mathématiques existant dans la littérature. L'analyse statistique des résultats a permis de conclure que le modèle Logarithmique est le plus approprié pour la description des cinétiques de séchage convectif en couches minces de fèves de cacao. Les résultats ont permis de calculer le coefficient de diffusion effectif.

**Mots-clés:** Fèves de cacao ; Modèles mathématiques ; Courbe caractéristique de séchage ; Cinétique de séchage.

### Study of thin layer drying models for artificial and direct solar natural convection drying of cocoa

#### Abstract:

The drying kinetics of cocoa beans in thin layer was studied for different conditions of drying air. The experiments are carried out in a greenhouse and in an oven at different drying air temperatures (42°C, 50°C and 60°C). The water loss evolution curves, the influence of the drying air temperature and that of the drying mode are studied in order to determine the characteristic drying curve (CCS) of cocoa. The experimental curves presented in reduced water content as a function of drying time are approximated by mathematical models existing in the literature. The statistical analysis of the results led to the conclusion that the Logarithmic model is the most appropriate for describing the kinetics of convective drying in thin layers of cocoa beans. The results made it possible to calculate the effective diffusion coefficient.

**Keywords:** Cocoa beans; Mathematical models; Characteristic drying curve; Kinetics of drying.

\*Auteur correspondant:

Adresse e-mail: [karidioulad@yahoo.fr](mailto:karidioulad@yahoo.fr) (D. Karidioula)

## 1. Introduction

Le séchage est une opération post-récolte très importante dans la transformation des fèves de cacao. Après fermentation, les fèves de cacao sont ramenées de la teneur en eau initiale de 60% à 7% en base humide à travers cette opération. Le séchage permet une bonne conservation du produit en bloquant les réactions enzymatiques et en limitant les risques de développement des micro-organismes [1].

La majeure partie de la production cacaoyère est séchée au soleil, à l'air libre. Les fèves sont disposées sur des claies, en couche mince. Ce séchage solaire naturel est pratiqué dans les plantations de petite taille. Mais cette pratique de séchage ne peut être envisagée à l'échelle industrielle. Elle implique en effet de grandes surfaces et une main d'œuvre abondante. Par ailleurs, elle est limitée lorsque les conditions atmosphériques sont défavorables, le produit reprenant de l'eau en atmosphère humide.

Le cacao insuffisamment sec se dégrade rapidement sous l'action des moisissures et des insectes. Des réactions enzymatiques dues aux lipases et aux lipoxygénases sont possibles.

Les séchoirs solaires et le séchage artificiel tendant à se développer, il est nécessaire d'en étudier les conséquences sur les transferts de masse, de chaleur et sur la qualité du produit obtenu.

Ce travail vise à :

- Etudier la cinétique de séchage du cacao pour différentes conditions de température de l'air asséchant.
- Comparer les caractéristiques (teneurs eau) du cacao obtenu par séchage artificiel au cacao témoin, de même origine et de même quantité, soumis à un séchage solaire sous serre.
- Déterminer la courbe caractéristique de séchage (CCS).
- Evaluer le coefficient de diffusion du produit.

## 2. Matériels et méthode

### 2.1. Description des systèmes de séchage

Deux systèmes de séchage ont été adoptés, le premier est une étuve de laboratoire à température variable, pour le séchage convectif artificiel (Figure 1a) et le second est un séchoir solaire type serre, pour le séchage solaire direct (Figure 1b). Ces deux systèmes sont utilisés comme des chambres de séchage à température constante.

Dans ces séchoirs, des échantillons de masse identique sont séchés à différentes températures : 50 °C et 70 °C pour l'étuve et 42 °C pour la serre.



a) Etuve de laboratoire



b) Séchoir solaire type serre

**Fig. 1.** Systèmes de séchage utilisés.

## 2.2 Protocole expérimental

Le protocole expérimental a consisté à sécher de manière discontinue, puis à peser à intervalle de temps régulier (une heure), des échantillons d'environ 2,4 kg de fèves de cacao mis en séchage dans l'étuve (50 °C et 70 °C) et la serre (42 °C) pendant quelques jours.

Le processus de séchage dans les deux dispositifs a duré neuf heures (9 h) par jour de 8 h à 17 h.

Trois (03) essais de séchage pour chacune de ces températures ont été menés et la perte différentielle de masse des échantillons 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 n'excède pas la valeur de 0,001 [2]. En fin de séchage, la teneur en eau résiduelle a été déterminée en plaçant les échantillons dans une enceinte de dessiccation à 105 °C pendant 24 h [3].

## 2.3. Modélisation mathématique de la teneur en eau réduite

La complexité des phénomènes intervenant lors du processus de séchage d'un produit, a amené plusieurs auteurs [4-6] à proposer des modèles mathématiques sous forme de relations empiriques ou semi-empiriques pour décrire les courbes de séchage.

La modélisation mathématique de ces courbes de séchage consiste en général à élaborer des équations vérifiant la fonction :  $X^* = f(t)$ .

Les équations de ces modèles exprimant l'évolution de la teneur en eau réduite  $X^*$  en fonction du temps, contiennent des constantes qui sont ajustées pour faire concorder les résultats théoriques avec les résultats expérimentaux de séchage. Par conséquent, elles sont valables seulement dans le domaine d'investigation expérimentale pour lequel elles ont été établies.

Dix modèles de séchage ont été utilisés dans ce travail pour décrire la variation de la teneur en eau réduite  $X^*$  en fonction du temps. La teneur en eau réduite  $X^*$  est calculée comme suit:

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

Avec,  $X$  et  $X_0$  respectivement les teneurs en eau aux instant  $t$  et initial (% kg eau/ kg ms).

Le tableau 1 regroupe ces équations empiriques rapportées dans la littérature pour décrire la cinétique de séchage en couches minces du cacao.

**Tableau 1**

Modèles mathématiques de séchage testés

Modèles	Équations mathématiques	Références
Approche-Diffusion	$X^* = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	[7]
Deux-Termes	$X^* = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	[8]
Henderson et Pabis modifié	$X^* = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	[9]
Logarithmique	$X^* = a \exp(-kt) + c$	[10]
Newton	$X^* = \exp(-kt)$	[6]
Page	$X^* = \exp(-kt^n)$	[11]
Page modifié	$X^* = \exp(-k(t/L^2)^n)$	[12]
Equation simplifiée de diffusion de Fick	$X^* = a \exp(-c(\frac{t}{L^2}))$	[12]
Wang et Singh	$X^* = 1 + at + bt^2$	[13]
Verma	$X^* = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	[14]

Avec :  $a, b, c, g, h, k, k_0, k_1$  et  $n$  ; les paramètres et coefficients à déterminer.

Les paramètres liés au critère d'évaluation de la qualité du lissage, que nous avons choisis sont: le coefficient de corrélation  $r$  et les paramètres statistiques : Khi carré réduit,  $\chi^2$  (Eq. (3)) et l'erreur Quadratique Moyenne ( $EQM$ ) (Eq. (4)). En effet, plus les valeurs du coefficient  $r$  sont élevées et plus les valeurs des paramètres  $\chi^2$  et  $EQM$  sont basses, plus le modèle est meilleur [15].

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X^*_{exp,i} - \bar{X}^*_{exp})(X^*_{pre,i} - \bar{X}^*_{pre})/N}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (X^*_{exp,i} - \bar{X}^*_{exp})^2] * [\sum_{i=1}^N (X^*_{pre,i} - \bar{X}^*_{pre})^2]}} \quad (2)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X^*_{exp,i} - X^*_{pre,i})^2}{N-p} \quad (3)$$

$$EQM = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X^*_{exp,i} - X^*_{pre,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

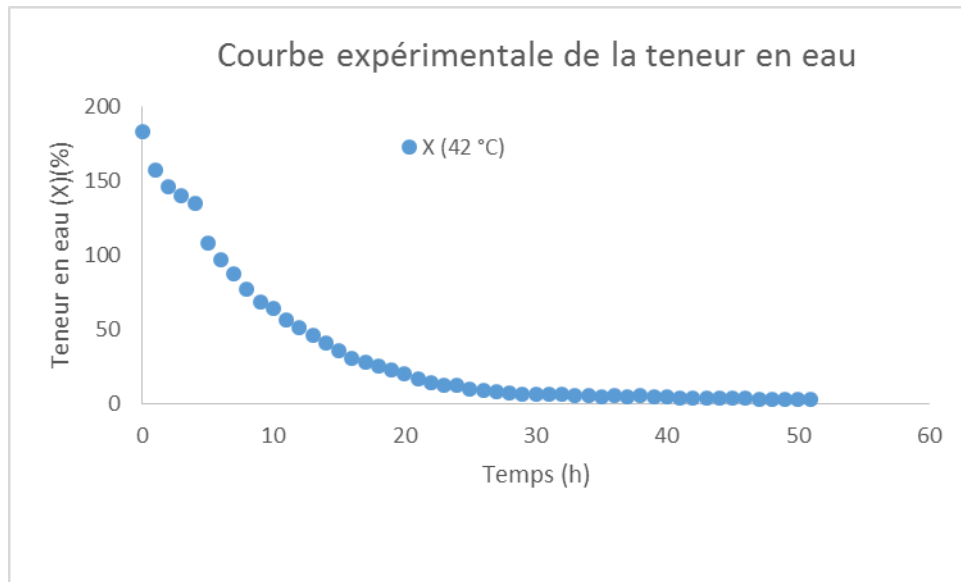
### 3. Résultats et discussion

Le transfert d'humidité entre l'air et les fèves de cacao, est représenté par une courbe décrivant l'évolution de la perte différentielle de la teneur en eau des échantillons au cours du séchage. Cette perte différentielle a été réalisée pour les températures : 42 °C (serre), 50 et 70 °C (étuve) (Figures 2 et 3).

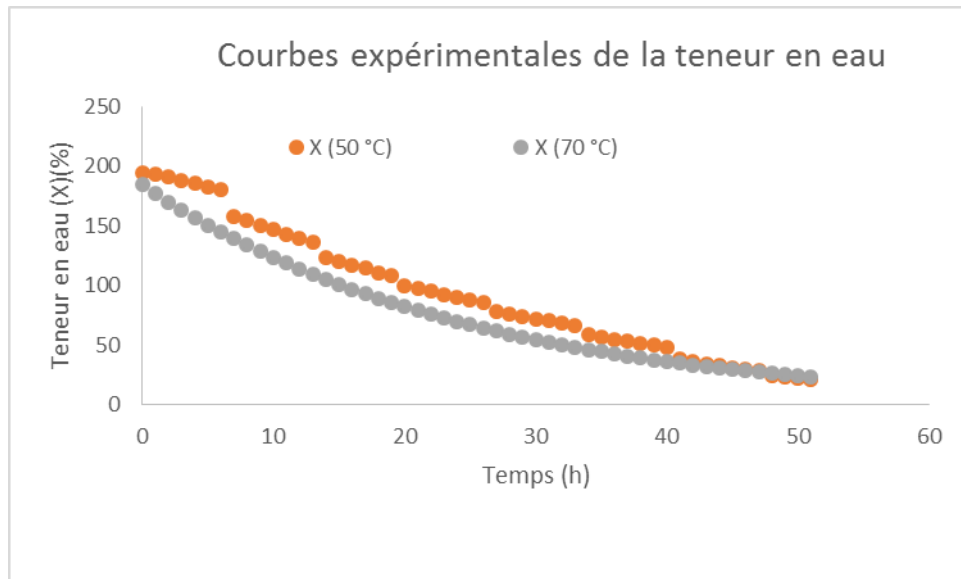
Les courbes sont marquées par une baisse de plus en plus faible de la teneur en eau du produit et cela jusqu'à la fin du séchage. Elles mettent en évidence la phase de séchage à vitesse décroissante qui traduit l'évaporation de l'eau liée plus ou moins fortement à la matière sèche du produit. Dans le cas des produits biologiques, plusieurs auteurs révèlent qu'il est difficile de localiser la première phase de séchage [16-18].

On remarque à travers ces courbes, que la température n'a une influence sur la cinétique de séchage en régime discontinu du cacao, que pour les mêmes conditions de séchage. C'est le cas du séchage à l'étuve où la teneur en eau décroît un peu plus vite à 70 °C qu'à 50 °C.

Cette décroissance est beaucoup plus rapide au niveau de la serre avec une température de 42 °C, bien qu'elle soit inférieure à 50 et 70 °C. Cela laisse entrevoir que l'augmentation de la vitesse de séchage du cacao, n'est pas seulement liée à une élévation de la température. En effet, le séchage sous serre se fait dans des conditions beaucoup plus aérées que le séchage dans l'étuve. La vitesse de l'air de séchage peut donc être un facteur important dans le processus de séchage d'un produit [19, 20].



**Fig. 2.** Evolution de la teneur en eau expérimentale des fèves en fonction du temps de séchage pour  $T= 42\text{ °C}$ .



**Fig. 3.** Evolution de la teneur en eau expérimentale des fèves en fonction du temps de séchage pour  $T= 50\text{ °C}$  et  $70\text{ °C}$ .

### 3.1. Modélisation des courbes de séchage

Modéliser le comportement au séchage de différents produits agricoles exige souvent d'utiliser les méthodes statistiques d'analyse de régression et de corrélation.

L'analyse de la régression a été exécutée en utilisant les logiciels Matlab, R2009b et Microsoft Excel 2013. Le coefficient de corrélation ( $r$ ) a été le premier critère de

sélection de la meilleure équation pour décrire la courbe de séchage [21].

En plus du coefficient  $r$ , les valeurs des paramètres  $\chi^2$  et  $EQM$  ont été utilisées pour affiner la validation du choix du meilleur modèle.

Le tableau 2 présente les modèles et leurs différents coefficients pour les différentes températures.

L'analyse de ce tableau montre que le modèle Logarithmique présente le meilleur accord avec les données expérimentales. Il a présenté les

meilleurs résultats pour le séchage des fèves de cacao tant sous serre que dans l'étuve.

Le tableau 3 présente les valeurs des coefficients de ce modèle.

**Tableau 2**  
Analyse statistique de corrélation des modèles

Modèles	Corrélation	42 °C (Serre)	50 °C (Etuve)	70 °C (Etuve)
	<b>r</b>	0,9015	0,9970	0,9954
Approche diffusion	$\chi^2$	6,699.10 <sup>-4</sup>	4,9512.10 <sup>-5</sup>	1,0067.10 <sup>-5</sup>
	EQM	0,0035	9,4722.10 <sup>-4</sup>	4,2712.10 <sup>-4</sup>
	r	0,9763	0,9942	0,9886
Deux- Termes	$\chi^2$	3,110.10 <sup>-5</sup>	5,8062.10 <sup>-5</sup>	5,5166.10 <sup>-6</sup>
	EQM	7,507.10 <sup>-4</sup>	0,001	3,1293.10 <sup>-4</sup>
	r	0,9885	0,9942	0,9900
Henderson et Pabis modifié	$\chi^2$	6,605.10 <sup>-6</sup>	6,0589.10 <sup>-5</sup>	8,0945.10 <sup>-6</sup>
	EQM	3,459.10 <sup>-4</sup>	0,001	3,7108.10 <sup>-4</sup>
	<b>r</b>	<b>0,9968</b>	<b>0,9977</b>	<b>0,9998</b>
<b>Logarithmique</b>	$\chi^2$	<b>1,071.10<sup>-7</sup></b>	<b>7,335.10<sup>-12</sup></b>	<b>3,3704.10<sup>-8</sup></b>
	<b>EQM</b>	<b>4,405.10<sup>-5</sup></b>	<b>3,6459.10<sup>-7</sup></b>	<b>2,4713.10<sup>-5</sup></b>
	r	0,9015	0,9957	0,9932
Newton	$\chi^2$	6,701.10 <sup>-4</sup>	9,3598.10 <sup>-5</sup>	1,8419.10 <sup>-5</sup>
	EQM	0,0035	0,0013	5,8940.10 <sup>-4</sup>
	r	0,9967	0,9971	0,9996
Page	$\chi^2$	0,0027	1,0855.10 <sup>-5</sup>	1,1071.10 <sup>-9</sup>
	EQM	0,0071	4,4801.10 <sup>-4</sup>	4,5245.10 <sup>-6</sup>
	r	0,9967	0,9971	0,9996
Page modifié	$\chi^2$	0,0028	1,1074.10 <sup>-5</sup>	1,1291.10 <sup>-9</sup>
	EQM	0,0071	4,4796.10 <sup>-4</sup>	4,5233.10 <sup>-6</sup>
	r	0,9966	0,9941	0,9900
Equation simplifiée de diffusion de Fick	$\chi^2$	0,0028	5,6873.10 <sup>-5</sup>	7,5969.10 <sup>-6</sup>
	EQM	0,0071	0,001	3,7103.10 <sup>-4</sup>
	r	0,9620	0,9971	0,9977
Wang et Singh	$\chi^2$	6,768.10 <sup>-4</sup>	9,0777.10 <sup>-9</sup>	1,8502.10 <sup>-6</sup>
	EQM	0,0035	1,2956.10 <sup>-5</sup>	1,8496.10 <sup>-4</sup>
	r	0,9472	0,2649	0,9949
Verma	$\chi^2$	1,834.10 <sup>-4</sup>	2,3783.10 <sup>-4</sup>	5,5289.10 <sup>-7</sup>
	EQM	0,0018	0,00207	1,001.10 <sup>-4</sup>

**Tableau 3**

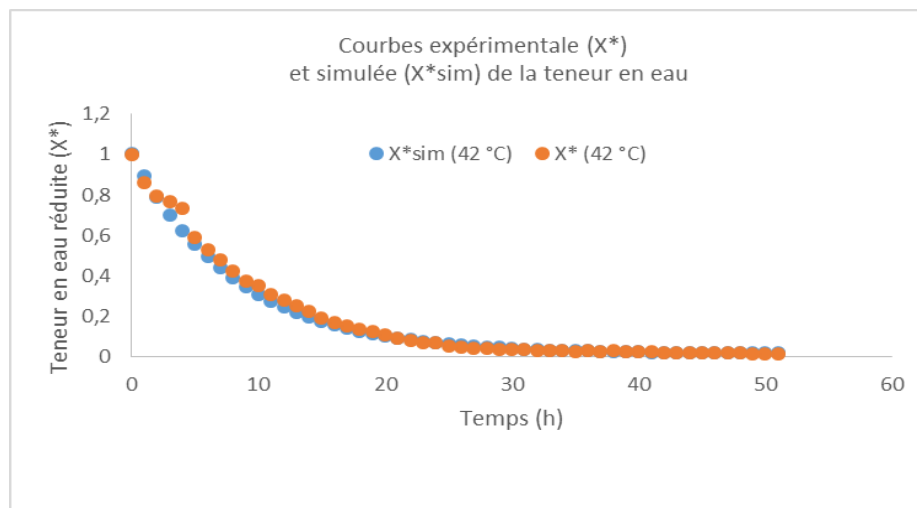
Valeurs des constantes de séchage et des coefficients du modèle Logarithmique

Modèle	Température	a	c	k
Logarithmique	42 °C (Serre)	0,9871	0,017	0,1214
	50 °C (Etuve)	1,3226	-2,803.10 <sup>-1</sup>	2,4032.10 <sup>-2</sup>
	70 °C (Etuve)	1,0062	-0,0077	3,981.10 <sup>-2</sup>

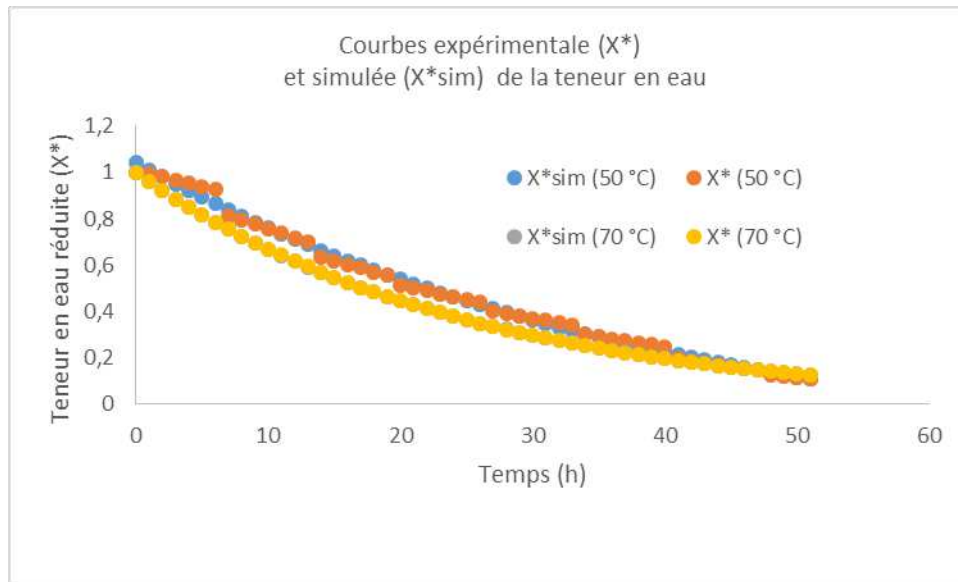
Les teneurs en eau expérimentales et prédites par le modèle Logarithmique sont présentées aux figures 4 et 5. L'analyse des courbes expérimentales des figures 4 et 5 montre qu'à  $t = 30$  h,  $X^* \approx 0,036$  pour le séchage solaire (42 °C) et  $X^* \approx 0,38$  puis  $X^* \approx 0,3$  pour le séchage artificiel respectivement à 50 et 70 °C. Les teneurs en eau réduite des échantillons de l'étuve restent encore élevées par rapport à celles de la serre ; alors qu'on devrait s'attendre au phénomène inverse vu que les températures sont plus élevées au niveau de l'étuve. Cette situation peut s'expliquer dans un premier temps par la faible aération de l'intérieur de l'étuve par rapport à la serre ; car la vitesse de l'air de séchage est également un facteur important dans le processus de séchage d'un produit [19, 20]. En effet, lors du séchage

convectif d'un produit, l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau du produit est apportée par l'air asséchant. L'eau évaporée devrait à son tour être évacuée hors de l'enceinte de séchage afin d'éviter le processus de reprise d'eau par le produit ; d'où l'importance d'une très bonne aération du séchoir. Cette situation peut être également due au phénomène de 'croûtage'. Ce phénomène est aussi un facteur important dans le séchage des produits solides. Il se produit lors du séchage à température élevée et sous faible humidité relative quand l'évaporation d'eau en surface est beaucoup plus importante que la diffusion interne d'eau.

En fait, ce phénomène réduit considérablement le séchage des produits et cela, suite à la formation d'une couche imperméable et dure en surface [22, 23].

**Fig. 4.** Evolution de la teneur en eau réduite ( $X^*$ ) en fonction du temps de séchage pour  $T= 42$  °C.





**Fig. 5.** Evolution de la teneur en eau réduite ( $X^*$ ) en fonction du temps de séchage pour  $T= 50\text{ °C}$  et  $70\text{ °C}$ .

### 3.2. Courbe caractéristique de séchage (CCS)

La courbe caractéristique de séchage (C.C.S) est importante pour décrire la cinétique de séchage dans n’importe quelles conditions de l’air asséchant, connaissant la valeur de la teneur en eau initiale et celle de la teneur en eau d’équilibre [24].

Le principe de la courbe caractéristique de séchage est de réduire l’ensemble des données expérimentales de manière à pouvoir les mettre sous une forme utilisable non seulement par l’expérimentateur lui-même, mais aussi par l’ensemble de la communauté scientifique [15].

La démarche suivie est de représenter les vitesses de séchage normées ou réduite ( $V_r$ ) en fonction des teneurs en eau réduites ( $X^*$ ) (Figure 6). On obtient généralement un polynôme de degré 3 dont l’expression mathématique est la suivante :

$$V_r = \left[ \frac{\left(\frac{-dX}{dt}\right)}{\left(\frac{-dX}{dt}\right)_1} \right] = A X^* + B X^{*2} + C X^{*3} \quad (5)$$

Avec : A, B, C, D des coefficients à déterminer et  $\left(\frac{-dX}{dt}\right)$ ,  $\left(\frac{-dX}{dt}\right)_1$  respectivement la vitesse de séchage et la vitesse de la première phase de séchage exprimées en % kg eau/ kg ms.h.

Cette fonction doit vérifier les propriétés suivantes [25-28]:

$$V_r = 0 \text{ pour } X^* = 0 \text{ et } V_r = 1 \text{ pour } X^* = 1 \quad ;$$

$$0 \leq V_r \leq 1 \text{ pour } 0 \leq X^* \leq 1.$$

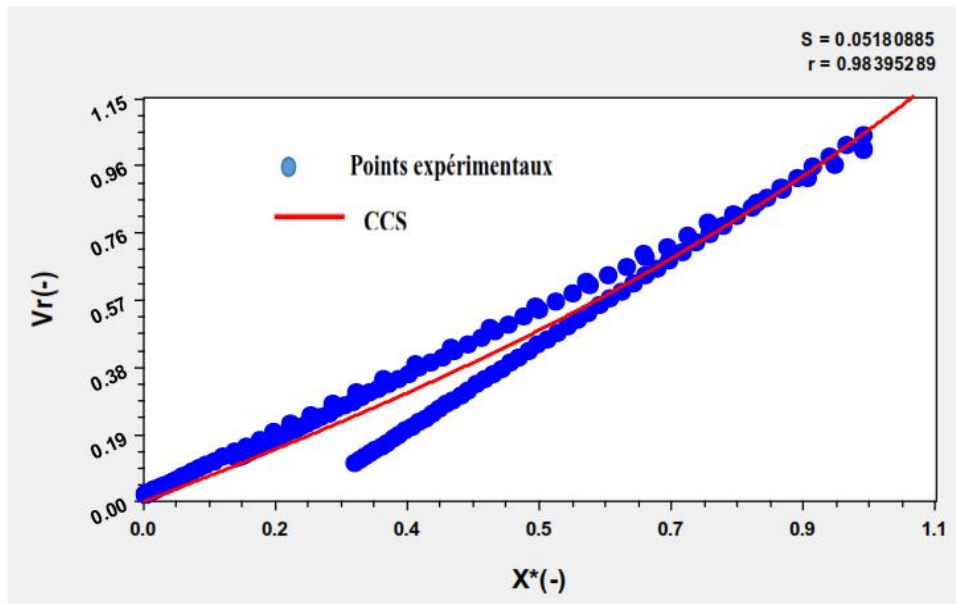


Fig. 6. Courbe caractéristique de séchage du cacao.

Le lissage de la courbe caractéristique de séchage du cacao a permis de déterminer l'équation de la vitesse réduite de séchage sous la forme du polynôme de degré 3:

$$Vr = 0,7939 X^* + 0,0688 X^{*2} + 0,183 X^{*3} \quad (6)$$

Avec un coefficient de corrélation ( $r$ ) de 0,98 et une erreur standard ( $S$ ) de 0,0518.

Cette figure montre un bon regroupement des courbes de séchage entre [0,65 – 1,1] en dépit des différentes conditions de séchage. Le faible regroupement entre [0,0 – 0,65] pourrait s'expliquer par le fait que les vitesses de séchage se confondent à ce niveau-là et que les vitesses initiales de séchage ne sont pas les mêmes pour tous les essais [29].

### 3.3. Coefficient de diffusion

Les résultats expérimentaux peuvent être traités par l'équation de la diffusion de Fick.

En supposant que :

- la distribution initiale d'humidité est uniforme,
- le mouvement d'humidité se fait par diffusion,
- le rétrécissement est négligeable,
- et que le coefficient de diffusion est constant à une température ;

la solution analytique de la deuxième loi de Fick dans la géométrie du produit, peut être exprimée par:

$$X^* = \frac{X}{X_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (7)$$

Avec :

- $D_{eff}$ , le coefficient de diffusivité effectif (m/s);
- L, la demi-épaisseur des échantillons (m) ;
- n, un entier positif.

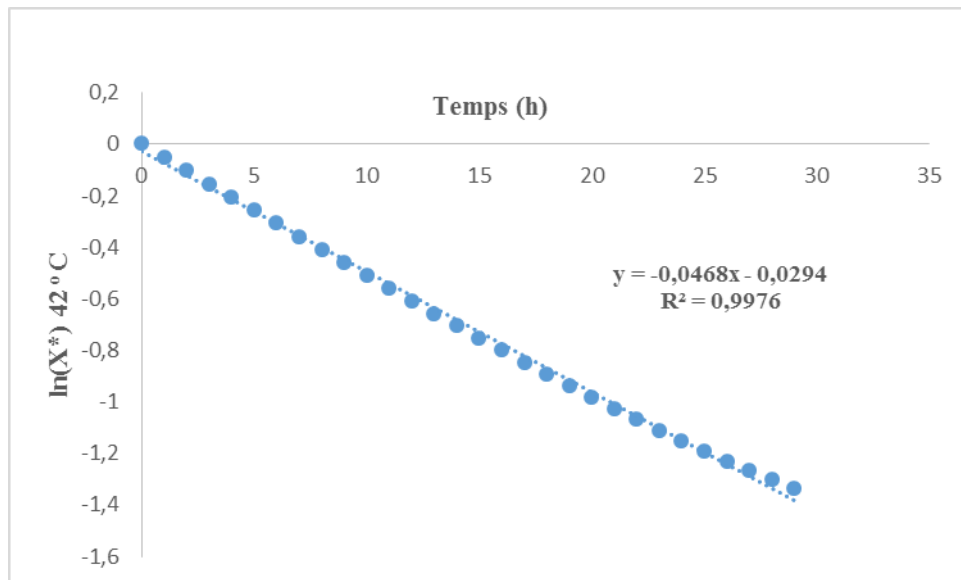
Pour les longues périodes de séchage ( $X^* < 0,6$ ), l'équation (7) peut être simplifiée au premier terme de la série [30]. Ainsi, la prise du logarithme népérien dans les deux membres de l'équation (7) donne la relation suivante:

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

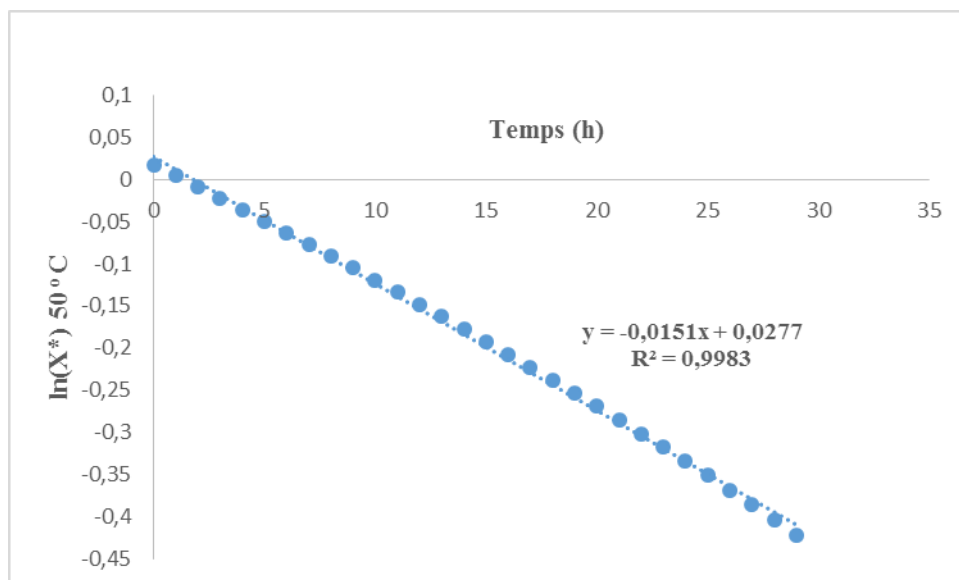
Le coefficient effectif de diffusion est déterminé graphiquement, grâce aux données expérimentales de séchage, en traçant la courbe :  $\ln(X^*)$  en fonction du temps. C'est une droite de pente k telle que :

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (9)$$

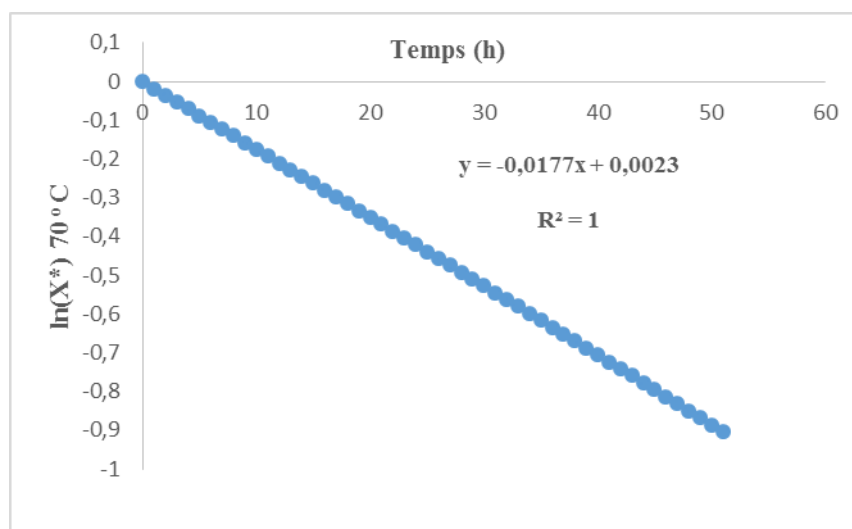
Par inversion, cette pente permet de calculer la valeur du coefficient effectif de diffusion. Les figures 7, 8 et 9 montrent les portions de droite représentant  $\ln(X^*)$  en fonction du temps de séchage pour chaque température.



**Fig. 7.** Evolution de  $\ln(X^*)$  au cours du temps pour 42 °C.



**Fig. 8.** Evolution de  $\ln(X^*)$  au cours du temps pour 50 °C.



**Fig. 9.** Evolution de  $\ln(X^*)$  au cours du temps pour 70 °C.

Les valeurs de  $D_{eff}$  pour les différentes températures sont consignées dans le tableau 4.

L'analyse du tableau 4 montre que le coefficient de diffusion augmente avec la température dans les mêmes conditions de séchage. Cette augmentation du coefficient de diffusion avec la température a été remarquée par plusieurs auteurs notamment ; Varadharaju et al. [31] pour le séchage du café, Taheri-Garavanda et al. [32]

pour la tomate et Ahrne et al. [33] concernant la pomme de terre. La valeur du coefficient de diffusion est plus élevée dans le cas du séchage convectif solaire direct (42 °C) bien que cette température soit inférieure à 50 et 70 °C pour le séchage convectif artificiel. Cela peut s'expliquer par une assez bonne aération au niveau de la serre. Plusieurs auteurs ont montré que le coefficient de diffusion augmente

également avec la vitesse de l'air de séchage ; c'est le cas de Sana et Slah [19] et, Dissa et al. [20] lors du séchage respectif de la tomate et de la mangue. Les valeurs du coefficient de diffusion obtenues sont dans la gamme de celle

obtenue par Jacquet et al. [1] lors du séchage artificiel de fèves de cacao ; en effet ils ont obtenu des valeurs comprises entre  $0,48.10^{-6}$  et  $1,36.10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.

#### Tableau 4

Valeurs de  $D_{eff}$  du cacao pour les différentes températures

T (°C)	42	50	70
$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)	$3,72.10^{-6}$	$1,2.10^{-6}$	$1,8.10^{-6}$

#### 4. Conclusion

Ce travail avait pour objectif l'étude des cinétiques de séchage de fèves de cacao pour différentes conditions de l'air asséchant.

Les expériences de séchage convectif ont été effectuées dans deux types de dispositif (serre et étuve) à différentes températures : 42 °C concernant la serre puis 50 et 70°C pour l'étuve. Dix (10) modèles mathématiques de séchage ont été testés pour simuler la cinétique de séchage en couches minces du cacao.

Le modèle logarithmique a présenté les valeurs du coefficient de corrélation ( $r$ ) les plus élevées et les plus faibles valeurs des coefficients  $\chi^2$  et EQM pour les différentes températures d'essais. Il décrit donc au mieux le séchage convectif des fèves de cacao dans les deux dispositifs.

Le lissage de la courbe caractéristique de séchage du cacao montre bien que la vitesse réduite de séchage est décrite par un polynôme de 3<sup>ème</sup> degré.

Cette courbe donne des informations précieuses permettant de prévoir la cinétique de séchage du cacao pour d'autres conditions expérimentales autres que celles adoptées dans le cadre de nos essais.

La détermination des coefficients de diffusion des fèves de cacao a montré qu'ils dépendent à la fois, de la température et du type de dispositif de séchage.

#### Références bibliographiques

- [1] M. Jacquet, J. Hahn, R. Lotodé, J.C. Vincent, Le séchage artificiel des fèves de cacao, *Café, Cacao, Thé* 24(1) (1980) 43-56.
- [2] M. Belahmidi, A. Belghit, A. Mrani, A. Mir, M. Kaoua, Approche expérimentale de la cinétique de séchage des produits agro-alimentaires, *Rev. Gen. Therm.* 380-381 (1993) 444-453.
- [3] F. Augier, Transport d'eau et d'acide en milieu complexe - Application au séchage de la fève de cacao, Thèse de doctorat, Université Montpellier II, France (1999).

- [4] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam, A. Jamali, Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*), *Energy* 29 (2004) 211-224.
- [5] A. Midilli, H. Kucuk, Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy, *Energy Conversion and Management* 44 (2003) 1111-1122.
- [6] O. Yaldiz, C. Ertekin, H. Uzun, Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes, *Energy* 26 (2001) 457-465. DOI: 10.1016/S03605442(01)00018-4.
- [7] A. Gowen, N. Abu-ghannam, J. Oliviera, Modelling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave-hot air drying, *Innov. Food Sci. Emerg.* 9 (2008) 129-137. DOI: 10.1016/j.ifset.2007.06.009
- [8] J. Roberts, D. Kidd, O. Padilla-Zakour, Drying kinetics of grape seeds, *J. Food Eng.* 89 (2008) 460-465. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.05.030.
- [9] N. Abouo, D. Akmel, K. Kakou, N. Assidjo, N. Amani, K. Yao, Modelling of thin layer drying kinetics of cocoa bean in microwave oven and sun, *Food Environ. Saf.* XIV(2) (2015) 127-137.
- [10] I. Togrul, D. Pehlivan, Modeling of thin layer drying of some fruits under open-air sun drying process, *J. Food Eng.* 65 (2004) 413-425. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.02.001.
- [11] T. Jurendic, Determination of controlling resistance to moisture transfer during drying, *J. Food Sci. Technol.* 4 (1) (2012) 34-45.
- [12] L.M. Diamante, P.A. Munro, Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices, *International Journal of Food Science and Technology* 26 (1991) 99.
- [13] C.Y. Wang, R.P. Singh, A single layer drying equation for rough rice, *ASAE Paper No: 3001* (1978).
- [14] L.R. Verma, R.A. Bucklin, J.B. Endan, F.T. Wratten, Effects of drying air parameters on rice drying models, *Transactions of the ASAE* 28 (1985) 296-301.
- [15] D. Akmel, N. Assidjo, P. Kouame, K. Yao, Mathematical Modelling of Sun Drying Kinetics of Thin Layer Cocoa (*Theobroma Cacao*) Beans, *J. Appli. Sci. Res.* 5(9) (2009) 1110-1116.
- [16] A. Talla, Y. Jannot, C. Kapseu, J. Nganhou, Etude expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage de fruits tropicaux. Application à la banane et à la mangue, *Sciences des Aliments* 21 (2001) 499-518.
- [17] E. Belahmidi, A. Belghit, A. Mrani, M. Kaoua, Approche expérimentale de la cinétique des produits agro-alimentaires : Application aux peaux d'orange et à la pulpe de betterave, *Revue Générale de Thermique* 380 - 381 (1993) 444-453.
- [18] C. Ahouanou, Y. Jannot, B. Lips, A. Lallemand, Caractérisation et modélisation du séchage de trois produits tropicaux : manioc, gingembre et gombo, *Sciences des aliments* 20 (2000) 4-5.
- [19] B.M. Sana, B.M. Slah, Cinétique de séchage et Courbe caractéristique de séchage d'une couche mince de tomate, 18<sup>ème</sup> journées internationales de Thermique (JITH) Monastir (Tunisie) (2017).
- [20] A.O. Dissa, H. Desmorieux, D.J. Bathiebo, J. Koulidiati, Estimation analytique et modélisation de la diffusivité d'eau au cours du séchage convectif de la mangue en considérant deux zones de diffusion, *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.* 031 (2011) 21-34.
- [21] T. Inci, P. Dursun, Modelling of drying kinetics of single apricot, *Journal of Food Engineering* 58 (2003) 23-32.
- [22] C. Bonazzi, J.J. Bimbenet, Séchage des produits alimentaires – Principes, *Technique de l'ingénieur F3000* (2003).

- [23] M. Al Haddad, Contribution théorique et modélisation des phénomènes instantanés dans les opérations d'autovaporisation et de déshydratation, Thèse de Doctorat, Université de la Rochelle, France (2007).
- [24] G.B. Noumi, E. Ngameni, C. Kapseu, M. Permentier, Variation de la composition en acide gras et en triglycérides de l'huile des fruits de l'aïélé en fonction des conditions d'extraction et de la couleur du fruit, *La rivista italiana delle sostanze grasse* 79 (2002) 315-318.
- [25] M. Kouhila, Etude expérimentale et théorique des cinétiques de séchage convectif partiellement solaire des plantes médicinales et aromatiques de la région de Marrakech, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc (2001).
- [26] C. Ahouannou, Etude du séchage de produits agroalimentaires tropicaux : Cas du manioc, du gingembre, du gombo et du piment, Thèse de doctorat, Université Nationale du Bénin (2001).
- [27] A. Haoua, Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur- Strasbourg I, France (2007).
- [28] B. Touati, Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*), Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (2008).
- [29] S. Simal, A. Mulet, J. Tarrazo, C. Rosello, Drying Models for Green Peas, *Food Chemistry* 55(2) (1996) 121-128.
- [30] A. Aghfir, S. Akkad, M. Rhazi, C.S.E. Kane, M. Kouhila, Détermination du coefficient de diffusion et de l'énergie d'activation de la menthe lors d'un séchage conductif en régime continu, *Revue des Energies Renouvelables* 11(3) (2008) 385-394.
- [31] N. Varadharaju, C. Karunanidhi, R. Kailappan, Coffee cherry drying: a two layers model, *Drying Technology* 19 (2001) 709-715.
- [32] A. Taheri-Garavanda, S. Rafieea, A. Keyhania, Effective Moisture Diffusivity and Activation Energy of Tomato in Thin Layer Dryer during Hot Air Drying, *International Transaction: Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies* 2(2) (2011) 239-248.
- [33] L. Ahrne, F. Prothon, T. Funebo, Comparison of drying kinetics and texture effects of two calcium pretreatments before microwave-assisted dehydration of apple and potato, *International Journal of Food Science and Technology* 38 (2003) 411-420.