



Full Length Research Paper

Séchage des fèves de cacao dans un séchoir solaire indirect à circulation forcée d'air

Kamenan Blaise Koua^{1,2*}, Ekoun Paul Magloire², Prosper Gbaha²

¹Université Félix Houphouët Boigny, UFR SSMT, Laboratoire d'Énergie Solaire- 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

²Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, UMRI 58, Laboratoire d'Énergie Nouvelle et Renouvelable- BP 581 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire.

Received April 2017 – Accepted November 2017



*Corresponding author. E-mail: kouakb@yahoo.fr

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

Résumé:

Le séchage est un processus principal utilisé pour la conservation des fèves de cacao. Il est donc essentiel de contrôler ses paramètres de séchage. Dans cette étude, les coefficients de retrait volumique, de diffusivité effective d'humidité ainsi que la cinétique de séchage des fèves de cacao ont été estimés au cours du séchage solaire indirect. Les isothermes de désorption expérimentales des fèves de cacao, pour différentes températures (30, 45 et 60 °C) ont une allure sigmoïdale. La cinétique de séchage a montré que le processus de séchage des fèves de cacao se déroule pendant la phase de séchage décroissante.

Mots-clés: Séchoir solaire indirect ; Isotherme de désorption ; Retrait volumique; Fèves de cacao.

Cite this article:

Kamenan Blaise Koua, Ekoun Paul Magloire Koffi, Prosper Gbaha (2017). Séchage des fèves de cacao dans un séchoir solaire indirect à circulation forcée d'air. Revue Cames – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol. 2(2), pp. 15-19. ISSN 2312-8712.

1. Introduction

La caractérisation du comportement hygroscopique d'un produit au cours du séchage présente deux aspects : un aspect statique qui consiste à déterminer la teneur en eau d'équilibre du produit, à évaluer l'énergie nécessaire pour atteindre cette teneur en eau d'équilibre et à caractériser les propriétés microscopiques de l'eau contenue dans le produit après l'équilibre ; et un deuxième aspect dynamique qui consiste à suivre l'évolution de la teneur en eau et de la vitesse de séchage du produit au cours de sa déshydratation afin d'identifier ses différentes phases de séchage. Ceci revient donc à déterminer expérimentalement les isothermes de désorption et les cinétiques de séchage du produit et à les modéliser afin de pouvoir prédire son comportement au cours du séchage. L'objectif de cette étude est donc de déterminer les isothermes de désorption et la cinétique de séchage des fèves de cacao.

2. Matériels et méthodes

2.1. Isothermes de désorption

Les isothermes de désorption des fèves de cacao ont été déterminées en utilisant la méthode gravimétrique statique, qui est basée sur l'utilisation de solutions salines saturées pour maintenir l'activité de l'eau des échantillons constante, une fois l'équilibre entre les conditions atmosphériques du bocal (Température et humidité relative) et l'échantillon est atteint. Les solutions salines utilisées couvrent un intervalle d'humidité relative compris entre 11% et 90% comme indiqué par Prette et al. [1] et Koua et al. [2].

Trois échantillons de fève de cacao fermentée ont été placés dans chaque bocal au-dessus des solutions salines, des une atmosphère stabilisée en température et en humidité relative. Les essais ont été effectués pour trois valeurs de température: 30 °C, 45 °C et 60 °C avec une précision de ± 1 °C.

La masse de chaque échantillon mesurée régulièrement jusqu'à l'équilibre thermodynamique, permet de déterminer la teneur en eau d'équilibre en utilisant la relation suivante :

$$X_{eq} = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad [\text{Eq.1}]$$

Où m_{eq} est la masse de l'échantillon à l'équilibre et m_s est la masse anhydre.

Le modèle de GAB (Guggenheim-Anderson-de-Boer) qui est une extension du modèle BET à 3 paramètres est de loin le plus utilisé pour la modélisation des isothermes de sorption des produits agroalimentaire [3, 4]. Les avantages de ce modèle par rapport aux autres sont sa simplicité mathématique et surtout la signification physiques des paramètres qui interviennent dans ce modèle [5].

$$X_{eq} = \frac{X_m G K a_w}{(1 - K a_w)(1 + (G - 1) K a_w)} \quad [\text{Eq.2}]$$

Où X_m est la teneur en eau de la monocouche moléculaire, G est une constante liée à la chaleur de sorption de la première couche sur les sites primaires et K est un facteur de correction des propriétés des molécules multicouches par rapport au liquide en vrac. Ces paramètres peuvent être exprimés par des relations de type Arrhenius [6]:

$$G = G_0 \exp\left(\frac{\Delta H_G}{RT}\right) \text{ et } \Delta H_G = H_m - H_n \quad [\text{Eq.3}]$$

$$K = K_0 \exp\left(\frac{\Delta H_K}{RT}\right) \text{ et } \Delta H_K = H_L - H_n \quad [\text{Eq.4}]$$

Où G_0 et K_0 sont les facteurs pré-exponentiels, H_L la chaleur de condensation de la vapeur d'eau, H_m la chaleur de sorption totale de la monocouche, H_n la chaleur de sorption totale de la multicouche, R la constante des gaz parfaits et T est la température absolue.

2.2. Cinétiques de séchage

Les fèves de cacao, après fermentation, sont placées sur une grille en nylon en couche mince dans la chambre de séchage en position horizontale.

Le système étudié est un séchoir solaire indirect (Figure 1) fonctionnant en convection forcée qui, par un mode autonome de fonctionnement, conduit à un bon rendement ainsi qu'à une bonne qualité du produit séché. Il s'agit d'un système sans stockage ni recyclage d'air, dont les éléments constitutifs sont:

- Un générateur d'air chaud (capteur à air)
- Une unité de séchage (chambre de séchage)
- Deux extracteurs d'air (ventilateurs) alimentés par des photopiles, qui permettent d'assurer le fonctionnement autonome du système.



Figure 1. Photo du séchoir solaire indirect

2.2.1. Flux masse

Le flux masse (F_m) déduit de la perte de masse peut être calculé comme suit [7]:

$$F_m = -\left(\frac{\rho_d}{\beta}\right) \frac{dX}{dt} = -\left(\frac{m_d}{A}\right) \frac{dX}{dt} \quad [\text{Eq.5}]$$

où ρ_d est la densité apparente du produit sec et m_d sa masse sèche.

La variation de la teneur en eau, entre deux prises de mesures de masse du produit $m(t)$, est estimée par les expressions suivantes:

$$\frac{dX}{dt} = \left(\frac{X_1 - X_0}{t_1 - t_0}\right) \text{ à instant initial } t_0 \quad [\text{Eq.6}]$$

$$\frac{dX}{dt} = \left(\frac{X_n - X_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}\right) \text{ à instant } t_n \text{ de fin de séchage}$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{X_i - X_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} + \frac{X_{i+1} - X_i}{t_{i+1} - t_i}\right) \text{ à instant } t_i, 1 \leq i \leq n-1$$

Où X_0 désigne la teneur en eau initiale à l'instant t_0 , X_1 la teneur en eau à l'instant t_1 , X_i la teneur en eau du produit à un instant t_i du séchage, X_n la teneur en eau de fin de séchage et n le nombre de points de mesures.

2.2.2 Retrait volumique

Le retrait volumique macroscopique est couramment désigné par le rapport entre le volume du produit à un temps de séchage donné et son volume initial. Sur la base de la conservation de la masse et de l'additivité volumique des différentes phases du produit (solide sec, eau et air), la variation du volume du produit en fonction de la teneur en eau est donnée par [8]:

$$\frac{V}{V_0} = 1 - \beta(X_0 - X) \quad [\text{Eq.7}]$$

Où β est le coefficient de rétrécissement

2.2.3. Diffusivité effective de l'humidité

La deuxième loi de Fick sur la diffusion a été fréquemment utilisée pour décrire le transfert d'humidité interne, en particulier pour les produits biologiques pendant la période de vitesse de séchage décroissante. La forme des fèves de cacao étant supposée sphérique, la deuxième loi de diffusion de Fick est définie comme suit [9]:

$$\frac{\partial X_r}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 X_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial X_r}{\partial r} \right) \quad [\text{Eq.8}]$$

où r représente la coordonnée radiale, D_{eff} est la diffusivité effective de l'humidité et X_r est la teneur en eau réduite donnée par:

$$X_r = \frac{X - X_{\text{eq}}}{X_0 - X_{\text{eq}}} \quad [\text{Eq.9}]$$

Où X_{eq} représente la teneur en eau d'équilibre.

En utilisant des conditions initiales et limites appropriées, Crank (1975) a donné la solution analytique pour la géométrie sphérique comme suit:

$$X_r = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-D_{\text{eff}} \left(\frac{n\pi}{R_p} \right)^2 t \right] \quad [\text{Eq.10}]$$

où R_p est le rayon de la fève de cacao.

Seul le premier terme de cette équation peut être utilisé pour estimer la diffusivité effective d'humidité pour des temps de séchage longs:

$$X_r \cong \frac{6}{\pi^2} \exp \left(-D_{\text{eff}} \left(\frac{\pi}{R_p} \right)^2 t \right) \quad [\text{Eq.11}]$$

En traçant $\ln(X_r)$ en fonction du temps, la pente de la droite sera la constante de l'équation linéaire ci-dessus.

3. Résultats et discussions

3.1. Isotherme de désorption

Les isothermes de désorption expérimentales des fèves de cacao, pour différentes températures (30, 45 et 60 °C) sont représentées sur la Figure 2. Elles ont une allure sigmoïdale (isotherme de type II). Ceci est en concordance avec le comportement de divers produits agroalimentaires, plantes médicinales et aromatiques [5]. Les courbes expérimentales obtenues montrent que pour une activité de l'eau donnée, la teneur en eau d'équilibre diminue quand la température augmente, ce qui corrobore les résultats obtenus par beaucoup d'auteurs pour les produits agroalimentaires [5]. Ce comportement peut être expliqué par le fait que la température affecte la mobilité des molécules d'eau et

l'équilibre dynamique entre la vapeur d'eau et la phase adsorbée. La teneur en eau d'équilibre augmente également quand l'activité de l'eau augmente, pour toutes les températures. Ce comportement peut être attribué aux états d'excitation des molécules d'eau.

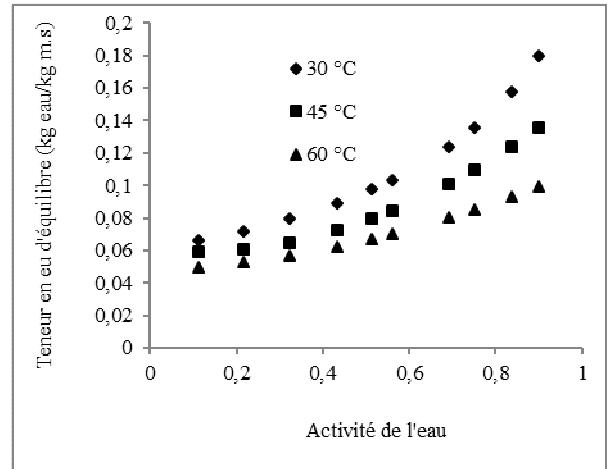


Figure 2. Isothermes de désorption expérimentales des fèves de cacao pour différentes températures.

3-2. Modélisation des isothermes de désorption

Les valeurs élevées du coefficient de corrélation r^2 indiquent que le modèle de GAB est le meilleur modèle pour décrire l'ensemble des isothermes de désorption des fèves de cacao (Tableau 1). La Figure 3 représente les isothermes de désorptions expérimentales des fèves de cacao à 30 °C, 45 °C et 60 °C et leur ajustement par le modèle de GAB.

Tableau 1. Paramètres du modèle de GAB

Température (°C)	Paramètres			r^2
	X_m	G	K	
30	0,0606	3729,9748	0,7372	0,999
45	0,0535	279,5272	0,6970	0,990
60	0,0508	115,6945	0,5789	0,978

La teneur en eau de la monocouche diminue lorsque la température augmente (Tableau 1). Ceci peut être dû à une réduction du nombre total de sites actifs pour la liaison de l'eau par suite de modifications physiques et/ou chimiques du produit induites par la température. L'analyse de la Figure 3 montre que le modèle de GAB est plus adapté pour prédire les isothermes de désorption des fèves de cacao.

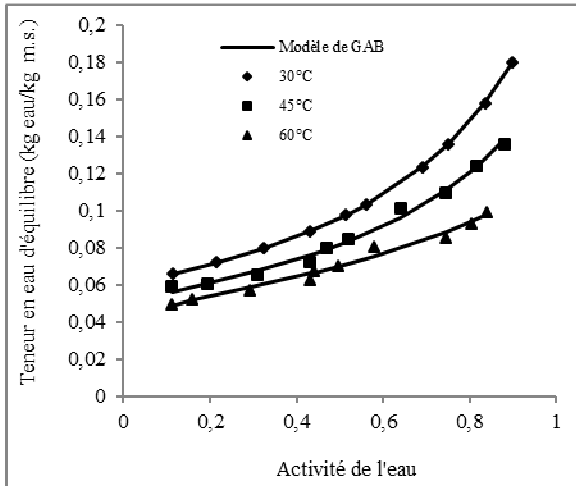


Figure 3. Valeurs expérimentales et modélisées des isothermes de désorption des fèves de cacao.

3.3 Cinétique de séchage des fèves de cacao

La Figure 4 montre l'évolution de la teneur en eau des fèves de cacao en fonction du temps de séchage. Il se dégage de cette courbe que le séchage des fèves de cacao s'effectue en deux phases. Initialement, une diminution rapide du séchage se produit jusqu'à ce que la teneur en eau soit proche de 0,23 kg eau/kg m.s. Après cette valeur de teneur en eau, la vitesse de séchage diminue lentement pour atteindre la teneur en eau d'équilibre.

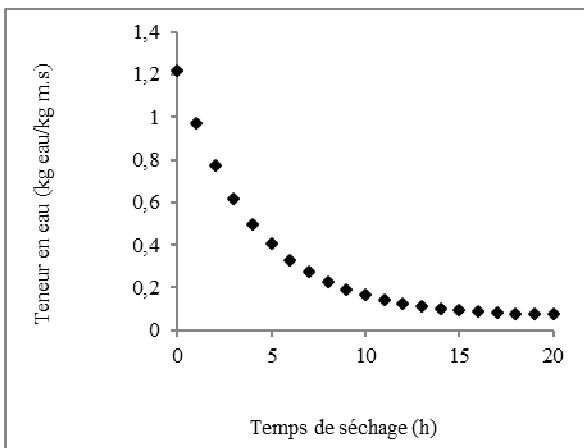


Figure 4. Variation de la teneur en eau des fèves de cacao

La Figure 5 montre l'évolution du flux masse en fonction du temps de séchage. Cette courbe révèle que le flux masse diminue de façon continue tout au long du séchage, ce qui indique que le processus de séchage des fèves de cacao a eu lieu pendant la phase de séchage à vitesse décroissante. Le flux masse des fèves de cacao au cours du séchage solaire indirect peut être estimé par la relation suivante ($r^2 = 0,998$) :

$$F_m = 0,317.(X_0 - X_{eq}).\exp(-0,23t) \quad [Eq.12]$$

Où F_m est en kg / m^2h et t est en heure (h).

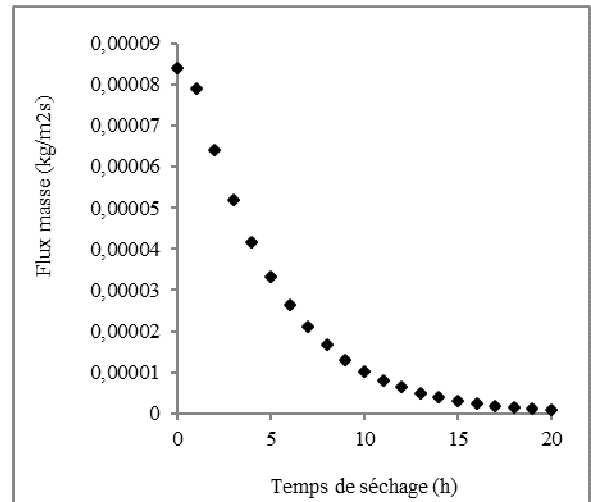


Figure 5. Variation du flux masse des fèves de cacao

3.4 Diffusivité effective de l'humidité

La diffusivité effective de l'humidité des fèves de cacao est représentée sur la Figure 6. Il se dégage de cette courbe que la diffusivité effective de l'humidité diminue lorsque la teneur en eau réduite diminue. En outre, comme indiqué dans la littérature sur le séchage, la diffusivité effective de l'humidité augmente lorsque la température de séchage augmente.

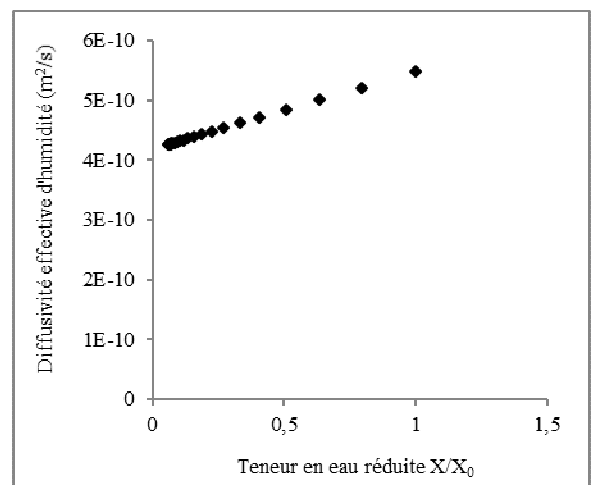


Figure 6. Diffusivité effective de l'humidité des fèves de cacao

Les valeurs de diffusivité effective de l'humidité des fèves de cacao sont comprises entre $5,49 \times 10^{-10}$ et $4,26 \times 10^{-10} m^2/s$. Ces valeurs se situent dans la plage des diffusivités effectives rapportées pour la plupart des produits agricoles. La diffusivité effective de l'humidité des fèves de cacao, en fonction de la teneur en eau réduite, peut être représentée par la relation suivante ($r^2 = 0,999$):

$$D_{eff} = 1,30 \times 10^{-10} \frac{X}{X_0} + 4,18 \times 10^{-10} \quad [Eq.13]$$

3.5 Retrait volumique

La Figure 7 montre l'évolution du coefficient de retrait volumique en fonction de la teneur en eau réduite des fèves de cacao. Comme le montre cette figure, le coefficient de retrait volumique augmente avec la diminution de la teneur en eau réduite des fèves de cacao. Les courbes de retrait volumique sont quasiment linéaires dans le processus de séchage des fèves de cacao.

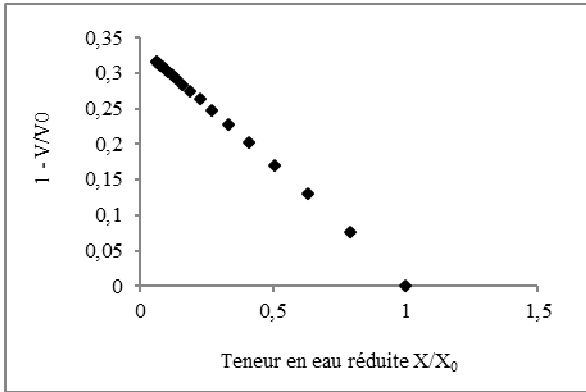


Figure 7. Coefficient de retrait volumique des fèves de cacao.

La Figure 8 montre la réduction du volume de la fève de cacao en fonction du volume d'eau évaporée. Sur cette figure, des écarts significatifs sont observés entre la courbe représentant la réduction du volume de la fève de cacao et la bissectrice représentant une situation de rétrécissement idéal où le volume d'eau évaporée est exactement égal à la réduction de volume de la fève de cacao [7]. Le volume d'eau évaporée est supérieur à la réduction de volume de la fève de cacao pendant tout le séchage. La rigidité de la fève de cacao entraîne un ralentissement de la vitesse de réduction du volume et une formation de pores. Comme le montre la Figure 8, cet écart représente le développement de la porosité des fèves de cacao pendant le séchage. La majeure partie de l'eau évaporée de la fève de cacao a donc été remplacée par du gaz [7]. La fève de cacao séché est donc un produit poreux constitué de gaz et de matière sèche.

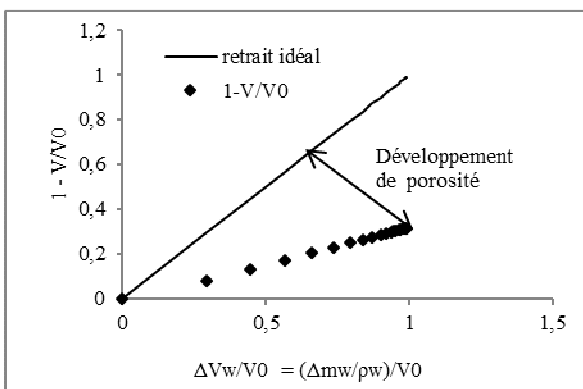


Figure 8. Réduction du volume des fèves de cacao en fonction du volume d'eau évaporée.

4. Conclusion

La caractérisation du comportement hygroscopique des fèves de cacao au du séchage à permis de déterminer les isothermes de désorption, d'étudier l'évolution des coefficients de retrait volumique et de la diffusivité effective de l'humidité. Les conclusions suivantes sont tirées de cette étude:

- Les isothermes de désorption des fèves de cacao ont une allure sigmoïde.
- Le séchage des fèves de cacao se déroule en deux phases.
- La diffusivité effective de l'humidité diminue lorsque la teneur en eau diminue.
- Le retrait volumique diminue linéairement avec la diminution de la teneur en eau.

Références

- [1] Prette, A.P., F.A.C. Almeida and A. Villa-Vélez, Thermodynamic properties of water sorption of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) as a function of moisture content. *Food Sci. Technol.*, 2013; 33(1), 199-208.
- [2] Koua, K.B., E.P.M. Koffi, P. Gbaha and S. Toure, Thermodynamic analysis of sorption isotherms of cassava (*Manihot esculenta*). *J. Food Sci. Technol.*, 2014, 51(9), 1711-1723.
- [3] Singh, K.P., H.N. Mishra and S. Saha, Sorption isotherms of barnyard millet grain and kernel. *Food and Bioprocess Technol.* 2011, 4(5), 788-796.
- [4] Vigano, J., E. Azuara, V.R.N. Telis, C.I. Beristain, M. Jimenez and J. Telis-Romero. Role of enthalpy and entropy in moisture sorption behavior of pineapple pulp powder produced by different drying methods. *Thermochim. Acta*, 2012, 528, 63-71.
- [5] Oliveira, G.H.H., P.C. Corrêa, E.S. Santos, P.C. Treto and M.D.M.S. Diniz, Evaluation of Thermodynamic properties using GAB model to describe the desorption process of cocoa beans. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 2011, 46, 2077-2084.
- [6] Goneli, A.L.D., P.C. Corrêa, G.H.H. Oliveira and P.C. Afonso Junior, Water sorption properties of coffee fruits, pulped and green coffee. *LWT- Food Sci. Technol.*, 2013, 50, 386-391.
- [7] Dissa, A.O., H. Desmorieux, P.W. Savadogo, B.G. Segda and J. Koulidiati, Shrinkage, porosity and density during convective drying of spirulina. *J. Food Eng.*, 2010, 97, 410-418.
- [8] De Lima A.G.B., M.R. Queiroz and S.A. Nebra, Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying solids with ellipsoidal configuration. *Chem. Eng. J.*, 2002, 86, 83-85.
- [9] Hii, C.L., C.L. Law and M. Cloke, Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *J. Food Eng.*, 2009, 90, 191-198.