

Étude expérimentale d'un grenier séchoir solaire à convection naturelle : Application au séchage du cacao et du manioc

Zokagon Aristide TIEU^{1*}, P. GBAHA² et K. A. DIBY¹

¹ Université Félix Houphouët Boigny, Laboratoire de Physique de la Matière Condensée et Technologie,
22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

² Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, Laboratoire d'Énergie Nouvelles et Renouvelables,
BP 581 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

* Correspondance, courriel : tieu_aristide@yahoo.fr

Résumé

Nous étudions la possibilité pour les africains d'utiliser les toitures de leurs maisons recouvertes de tôle d'aluminium pour le séchage des produits alimentaires. L'objectif de cette étude est d'examiner le comportement thermique du nouveau dispositif de séchage en fonction de l'ensoleillement ainsi que l'allure des courbes de séchage du manioc et du cacao dans le prototype dans le but d'apporter une optimisation. A cet effet, la variation de la température de l'air de la cheminée et de la chambre de séchage par rapport à la température ambiante est étudiée. Le lissage des courbes de séchage est effectué sous Matlab avec treize équations caractéristiques semi-empiriques. On constate que ces écarts de température croissent linéairement avec l'ensoleillement. L'élévation de température dans les cheminées varie de 13°C à 16°C. Quant à la chambre de séchage, sa température varie de 0°C à 20°C par rapport à la température ambiante. La modélisation des cinétiques de séchage du manioc et du cacao dans le prototype nous montre que l'équation caractéristique de Henderson & Pabis décrit le mieux l'allure du séchage du manioc avec un coefficient de détermination de 994. L'allure du séchage du cacao quant à elle est décrite par l'équation caractéristique Midilli Kucuk avec un coefficient de détermination de 999.

Mots-clés : grenier séchoir, élévation de température, équation caractéristiques.

Abstract

Experimental study of a solar dryer attic with natural convection. Application to the drying of cocoa and cassava

We study the possibility for Africans to use the roofs of their houses covered with aluminum sheet for the drying of food products. The aim of this study is to examine the thermal behavior of the new drying device as a function of sunshine, as well as the drying curves of cassava and cocoa in the prototype, with the aim of providing optimization of the dryer. For this purpose, the variation of the air temperature of the chimney and the drying chamber with respect to the ambient temperature is studied. The smoothing of the drying curves is carried out under Matlab with thirteen semi-empirical characteristic equations. It can be seen that these temperature differences grow linearly with sunshine. The temperature rise in the chimneys varies from 13°C to 16°C. As for the drying chamber, its temperature varies from 0°C to 20°C relative to the ambient

temperature. Modeling the drying kinetics of cassava and cocoa in the prototype shows us that the Henderson & Pabis characteristic equation best describes cassava drying curve with a coefficient of determination of 994. The cocoa drying curve to it is described by the Midilli Kucuk characteristic equation with a coefficient of determination of 999.

Keywords : *attic dryer, temperature rise, characteristic equations.*

1. Introduction

Plusieurs travaux sur les séchoirs ont été étudié afin d'améliorer les pratiques traditionnelles. Les travaux tant théoriques qu'expérimentaux ont été entrepris au niveau microscopique et au niveau macroscopique [1 - 9]. Par exemple, [9] fait une classification de 66 types de séchoir, leurs configurations, leurs capacités de séchage ainsi que les coûts. Le sujet fait encore l'objet de beaucoup de recherche car il pourrait à court-terme constituer une solution au problème de pénurie alimentaire dans les zones rurales des pays en voie de développement. Cette pénurie alimentaire est essentiellement liée aux pertes en produits agricoles après la récolte. Ces pertes sont estimées à plus de 30 à 40 % de la production [3 - 10]. Les agriculteurs sont donc confrontés à la recherche de solution pour améliorer la quantité et la qualité de leurs produits. Ce travail entre dans le cadre de la contribution à la réduction des difficultés de ces populations, à l'amélioration de leurs conditions de vie et à la lutte contre la famine qui prévaut souvent dans les zones rurales en Afrique. La conservation des aliments au grenier est une pratique assez courante dans les villages africains. Les produits de la récolte sont en général conservés dans les greniers des cases avec des toitures en pailles, sous l'influence du feu de bois ou après séchage au soleil. La FAO, a même soutenu certains pays dans l'introduction de grenier séchoir auprès des paysans [11]. Les méthodes traditionnelles de séchage au grenier citées plus haut nécessitent soit un séchage préalable au soleil ou un chauffage avec le feu de bois. Il faut donc un travail supplémentaire et lorsque ce n'est pas le cas, la fumée de bois affecte la qualité et le goût des produits séchés. Le prototype de grenier séchoir construit et étudié ici est à convection naturelle et utilise trois tuyaux en PVC comme cheminées. Il assure la protection des produits contre les voleurs, la pluie, les animaux domestiques, les rongeurs et la saleté et ne nécessite aucun travail supplémentaire. Des études de variation de température de l'air des cheminées et de la chambre de séchage par rapport à la température ambiante ont été menées. Des expériences de séchage du manioc et du cacao ont été conduites. Les modélisations des courbes du séchage de ces produits sont ensuite présentées.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation du matériel

2-1-1. Présentation du prototype

Le prototype de grenier séchoir solaire étudié se présente comme ci-dessous, dans les **Figures 1 et 2**. Nous l'avons testé sous les conditions climatiques de la ville de Yamoussoukro. Il est constitué d'une chambre de séchage dont les dimensions sont : $\left(\frac{1773\text{mm} \times 313\text{mm}}{2}\right) * 860\text{mm}$. Elle est recouverte d'une feuille de tôle noircie et inclinée d'un angle de 10° [12] dans la direction Sud selon la trajectoire du soleil. L'énergie solaire reçue par un capteur est maximale lorsque l'inclinaison i de celui-ci est telle que $(\varphi - 10 < i < \varphi + 10)$, où φ est la latitude du lieu [13]. La ville de Yamoussoukro est à $6,83^\circ$ de latitude Nord. La face noircie de la tôle a un coefficient d'absorption $\alpha = 0,9$ et la face interne non noircie a une émissivité $\varepsilon = 0,8$. A l'arrière de la chambre de séchage sont fixées des coudes dans lesquels sont emboîtés les tuyaux en PVC. La hauteur de ceux-ci est de 1,5 m et le diamètre est de 50 mm. Ils servent de cheminées solaires. Le corps du dispositif,

c'est-à-dire les faces latérales, arrières et en dessous de la claie sont fait avec du contreplaqué d'épaisseur $e = 10$ mm. La surface de séchage est constituée d'une claie en nylon de 1753×840 mm². L'entrée de l'air est recouverte de grillage en fer pour empêcher les rongeurs d'avoir accès aux produits. Elle a une surface de 600×40 mm². Le prototype est placé sur support à environ 2,5 m du sol.



Figure 1 : *Prototype de grenier séchoir contenant des fèves de cacao*

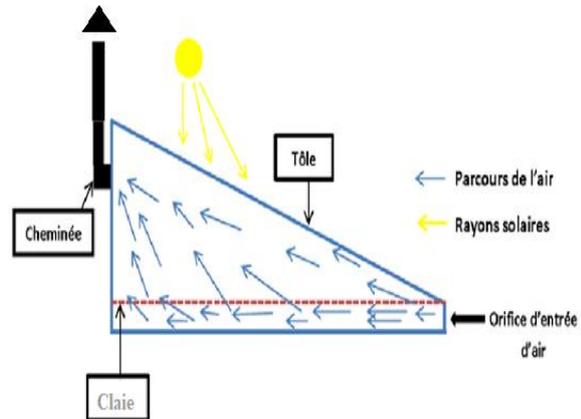


Figure 2 : *Vue de profile du prototype*

2-1-2. Fonctionnement

La tôle noircie reçoit les rayonnements solaires. Elle transmet une partie de l'énergie reçue au produit étalé sur la claie et à l'air entrant dans le dispositif. Pour le produit, cette chaleur reçu de la tôle permet à l'eau de migrer de l'intérieure vers sa surface afin d'être emporté par l'air. Cet air ainsi chargé d'humidité est aspiré par la cheminé pour être rejeté dans l'atmosphère. Plus la tôle est chauffée et plus la capacité d'extraction d'eau de l'air asséchant est grande.

2-1-3. Instruments de mesure

La mesure des températures est effectuée par des thermocouples de type Chromel / Alumel de précision 0.5 K. Ces instruments servent à repérer la température de l'air dans la chambre de séchage, la température du produit, la température de la tôle, des parois en contreplaqué ainsi que la température de l'air à la sortie des cheminées. Les mesures des pertes de masse, sont effectuées au moyen d'une balance de précision 0,001g placée en dessous de la claie. La température de l'air ambiant est mesurée à l'aide d'une station météo LACROSS Technologie.

2-2. Considérations théoriques

2-2-1. Au niveau des cheminées

Dans la cheminée, les pertes de charge sont dues principalement aux frottements de la paroi. En supposant un écoulement turbulent, avec un coefficient de friction de 0,03, les pertes de charge due à la friction peuvent s'exprimer de la manière suivante [14] :

$$\Delta P_a = 0,03 \bar{\rho} \left(\frac{v^2 H}{2D} \right) \tag{1}$$

$\bar{\rho}$ représente la densité moyenne de l'air dans les canaux cylindriques que représentent les cheminées, v la vitesse de l'air, H la hauteur de la cheminée et D son diamètre.

Les pertes de charges peuvent aussi être exprimées de la manière suivante [15] :

$$\Delta P_a = 0,00308gH(T_{ch} - T_a) = 0,00308gH\Delta T_{ch} \quad (2)$$

g est l'intensité de la pesanteur, T_{ch} , la température de l'air dans la cheminée et T_a , la température de l'air ambiant, ΔT_{ch} est l'élévation de la température de l'air dans la cheminée sur la température ambiante.

En combinant les relations (1) et (2), on aboutit à la relation suivante :

$$0,03\bar{\rho} \left(\frac{v^2}{2D} \right) = 0,00308g\Delta T_{ch} \quad (3)$$

$$\text{D'où : } v = 0,453 \left[\frac{Dg}{\bar{\rho}} \Delta T_{ch} \right]^{1/2} \quad (4)$$

La vitesse de l'air à l'intérieur de la cheminée est donc une fonction de ΔT_{ch} , d'où l'expression finale suivante :

$$v = f(\Delta T_{ch}) \quad (5)$$

2-2-2. Au niveau de la chambre de séchage

Le rayonnement solaire sur un capteur a une influence directe sur l'énergie qu'il produit. En effet, une partie de cette énergie thermique est absorbée par la tôle et communiquée à l'air et au produit [16]. D'autre part, nous sommes en zone tropicale où les variations de l'irradiation globale journalière en saison pluvieuse constituent un problème pour le fonctionnement des systèmes solaires [17]. Nous nous intéressons donc à la variation de la température de la chambre de séchage en fonction de l'ensoleillement. La puissance thermique utile de cette partie de notre prototype est donnée comme ceci [18] :

$$q_u = \dot{m}C_a(T_o - T_i) = A_c[\alpha\tau G_t - U_L(T_c - T_a)] \quad (6)$$

où \dot{m} est le débit massique de l'air asséchant, C_a est la chaleur massique de l'air, T_o est la température à la sortie de la chambre de séchage et T_i la température à l'entrée, T_c est la température du capteur et T_a , la température ambiante. A_c , α , τ et U_L sont respectivement la surface du capteur, les coefficients d'absorption et de transmission et le coefficient de perte thermique. Cette puissance utile s'exprime aussi de façon suivante [19] :

$$q_u = A_c F_R [\alpha\tau G_t - U_L(T_i - T_a)] \quad (7)$$

A partir de ces deux relations, on peut écrire l'expression de l'élévation de la température au niveau de la chambre de séchage :

$$(T_o - T_i) = \frac{A_c F_R}{\dot{m}C_a} [\alpha\tau G_t - U_L(T_i - T_a)] \quad (8)$$

Cette élévation de la température s'annule pour un rayonnement seuil $G_t = G_{tmin}$. En dessous de cette valeur, les opérations de séchage avec notre dispositif sont inutiles. Et on a :

$$U_L = \frac{\alpha\tau G_{tmin}}{(T_i - T_a)} \quad (9)$$

De cette dernière expression de U_L , nous déduisons l'expression finale de $(T_o - T_i)$ [10] :

$$(T_o - T_i) = \frac{A_c F_R \alpha\tau}{\dot{m}C_a} (G_t - G_{tmin}) \quad (10)$$

2-2-3. Modélisation des courbes de séchage

2-2-3-1. Équations caractéristiques

La modélisation des courbes de séchage consiste à déterminer la fonction f(t) qui décrit au mieux l'évolution de la teneur en eau réduite du produit au cours du séchage. Plusieurs relations empiriques et semi-empiriques existent dans la littérature pour décrire les courbes de cinétique de séchage. Le **Tableau 1** ci-dessous regroupe les équations caractéristiques utilisées pour le lissage des courbes de séchage du manioc et du cacao.

Tableau 1 : Modèles de courbes caractéristiques de séchage

Modèle	Expression	Référence
Newton	$X^* = \exp(-kt)$	W. K. Lewis 1921.
Page	$X^* = \exp(-kt^n)$	C. Page 1949
Page modifié I	$X^* = \exp(-(kt)^n)$	D. D. Overhults & Al. 1973
Page modifié II	$X^* = \exp(-kt^n)$	Diamante et Munro, 1991
Henderson et Pabis	$X^* = a^* \exp(-kt)$	M. S. Shinnan, 1984
Logarithmique	$X^* = a^* \exp(-kt) + c$	A. Yagcioglu et Al. 1999
Two term	$X^* = a^* \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	S. M. Henderson 1974
Two term exponential	$X^* = a^* \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Y. I Sharaf-Elden et Al. 1980
Wang et Singh	$X^* = 1 + at + bt^2$	C. Y. Wang, 1978
Approximation de la diffusion	$X^* = a^* \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	A. S. Kassem, 1998
Henderson Et Pabis modifié	$X^* = a^* \exp(-kt) + b^* \exp(-gt) + c^* \exp(-ht)$	V. T. Karatanos, 1999.
Verma et al.	$X^* = a^* \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	L. R. Verma et Al. 1985
Midilli-Kucuk	$X^* = a^* \exp(-kt^n) + bt$	A. Midilli & Al 2002

La teneur en eau et la teneur en eau réduite sont données par les relations suivantes [20] :

$$X(t) = \frac{m(t) - m_{ps}}{m_{ps}} \tag{11}$$

$$X^* = \frac{X(t)}{X(t_0)} \tag{12}$$

2-2-3-2. Paramètres statistiques

Certains paramètres statistiques sont utilisés pour le choix de l'équation caractéristique appropriée. Il s'agit notamment du coefficient de détermination (r^2), du ki-deux réduit (χ^2), de la somme au carré des erreurs de prédiction (SSE) et du RMSE. Le premier doit avoir la plus grande valeur et les trois autres, les plus faibles valeurs. Les expressions de ces paramètres sont les suivants [20]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{iexp} - \bar{x}_{exp}) * (x_{ipre} - \bar{x}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{iexp} - \bar{x}_{exp})^2 * \sum_{i=1}^N (x_{ipre} - \bar{x}_{pre})^2}} \tag{13}$$

$$\bar{x}_{exp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{iexp} \tag{14}$$

$$\bar{x}_{pre} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ipre} \tag{15}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{iexp} - x_{ipre})^2}{N-n} \quad (16)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (x_{iexp} - x_{ipre})^2 \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{iexp} - x_{ipre})^2} \quad (18)$$

Le modèle est validé par la confrontation des résultats expérimentaux avec les résultats prédits.

3. Résultats et discussion

3-1. Performances thermiques de la cheminée

Les **Figures 3, 4, 5, 6, 7 et 8** ci-dessous illustrent les variations diurnes de la température moyenne de l'air dans les cheminées et de la température de l'air ambiant pour les dates du 18, 19 et 20 octobre 2018 pour le séchage du manioc et 21, 22 et 23 octobre 2018 pour le séchage du cacao. Nous observons pour ces différentes figures que la température de l'air dans les cheminées se maintient au-dessus de la température de l'air ambiant. Il en est de même pour tous les autres tests entrepris. Les pics de température de l'air dans les cheminées se situent entre 46°C et 49°C, au-dessus des pics de température de l'air ambiant qui se situent entre 33°C et 34°C. Ces valeurs correspondent à une élévation ΔT_{chem} de la température des cheminées sur la température ambiante comprise entre 13°C et 16°C. Une application de cette valeur de ΔT dans **l'Équation (4)** précédente donnerais des valeurs élevées de vitesse de l'air. Mais dans la réalité, la résistance des produits et de la grille d'entrée à la vitesse de l'air et les frottements des parois du séchoir entraînent des vitesses de circulation de l'air plus réduites. Toutefois ces valeurs illustrent l'efficacité de ces cheminées.

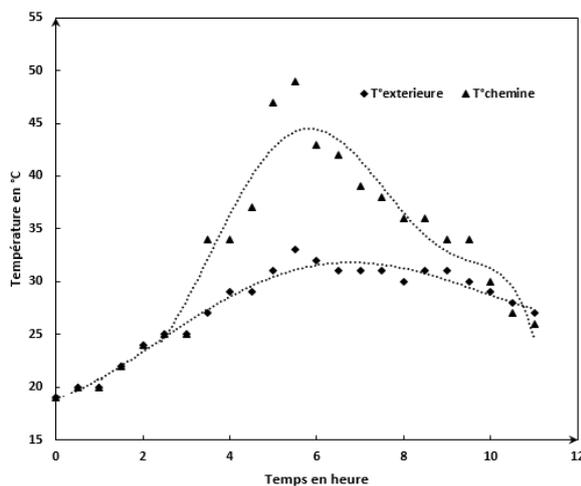


Figure 3 : *Elévation de la température de l'air dans la cheminée sur la température de l'air ambiant jour 1*

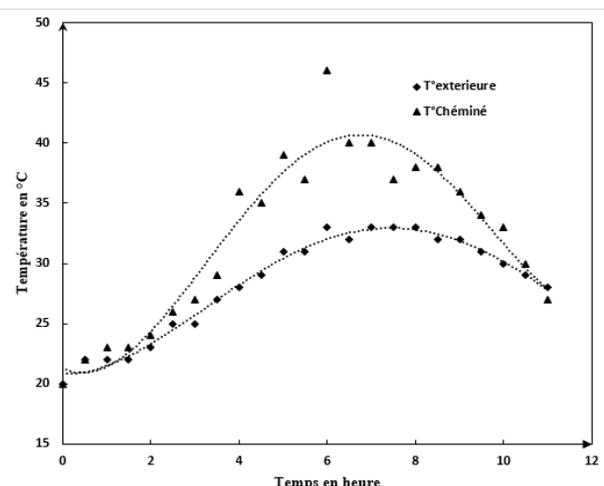


Figure 4 : *Elévation de la température de l'air dans la cheminée sur la température de l'air ambiant jour 2*

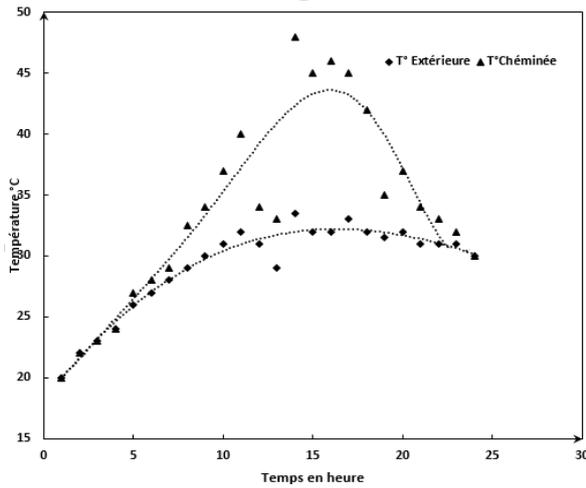


Figure 5 : *Elévation de la température de l'air dans la cheminée sur la température de l'air ambiant jour 3*

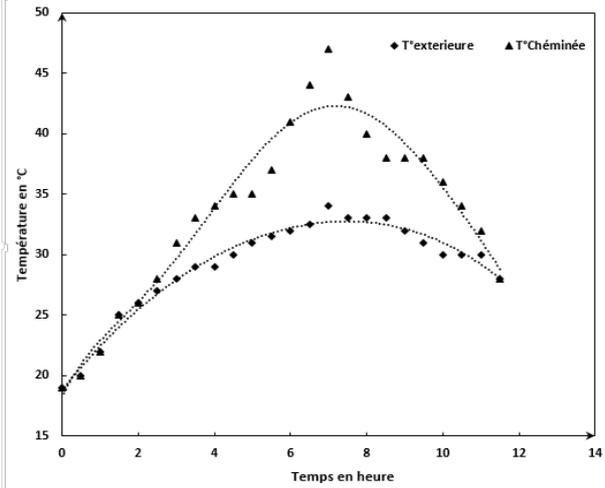


Figure 6 : *Elévation de la température de l'air dans la cheminée sur la température de l'air ambiant jour 4*

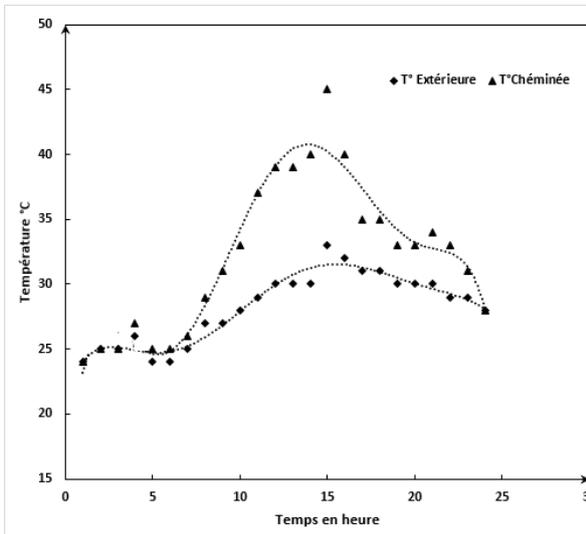


Figure 7 : *Elévation de la température de l'air dans la cheminée sur la température de l'air ambiant jour 5*

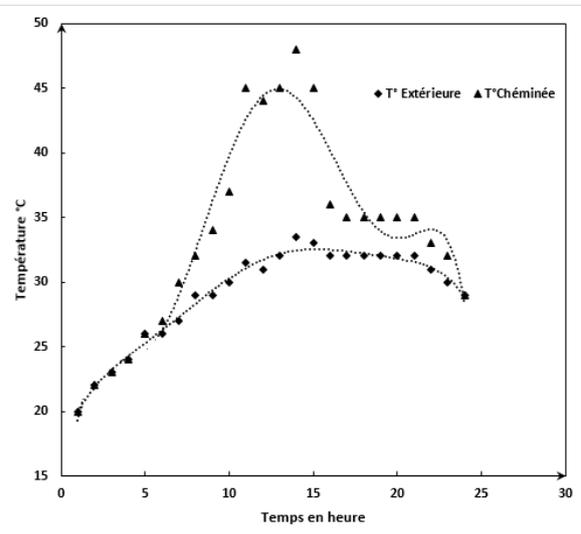


Figure 8 : *Elévation de la température de l'air dans la cheminée sur la température de l'air ambiant jour 6*

La **Figure 9** ci-dessous illustre cette variation de l'écart de température ΔT_{chem} en fonction de l'ensoleillement. On observe une corrélation linéaire qui met en évidence la croissance de ΔT_{chem} avec l'ensoleillement instantané. On peut donc déduire à partir de **l'Équation (5)** le débit d'air augmente dans la cheminée et donc dans le séchoir avec l'ensoleillement. **L'Équation** de la droite obtenue est :

$$\Delta T_{chem} = 0,0154G_t + 0,4223 \quad (19)$$

Il est possible à partir de celle-ci, de prédire la variation de ΔT_{chem} en fonction de l'ensoleillement à tout moment de l'année.

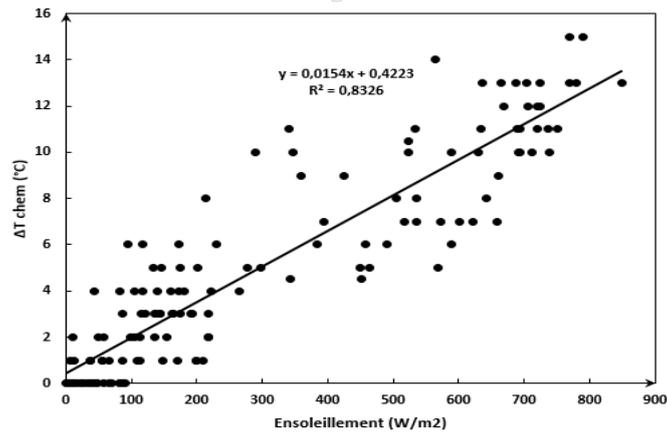


Figure 9 : $\Delta T_{chem} (^{\circ}C)$ en fonction de $G(t)$

De ces observations, nous pouvons aisément affirmer que les tuyaux de PVC sont adaptés pour leur utilisation comme cheminée solaire. Ekechukwu & Al. obtiennent des résultats similaires d'évolution linéaire de l'élévation de la température de la cheminée au-dessus de la température ambiante avec l'ensoleillement [14].

3-2. La chambre de séchage

Comme nous l'avons précisé plus haut, pour la chambre de séchage, les transferts de chaleur ont un impact sur les transferts de masse. Les **Figures 10, 11, 12, 13, 14 et 15** ci-dessous présentent les courbes de variations de la température ambiante et la température interne du prototype et de l'ensoleillement pour le 18, 19, 20, 21, 22 et 23 octobre 2018.

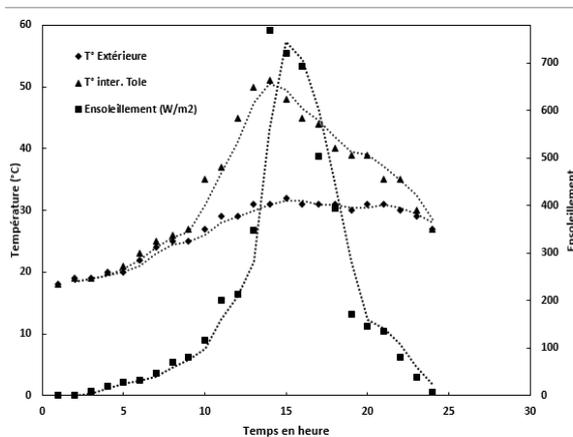


Figure 10 : Elévation de la température interne sur la température ambiante en fonction de l'ensoleillement. Jour 1

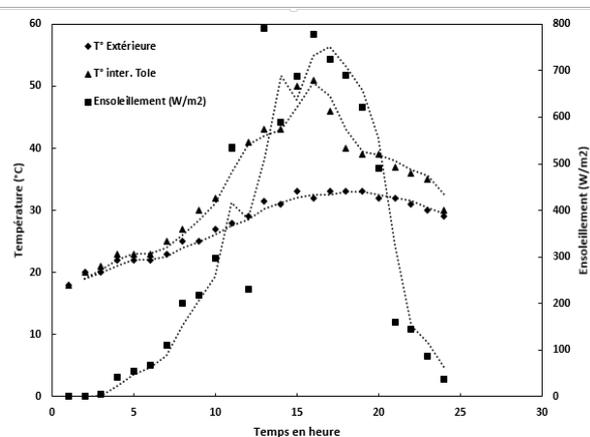


Figure 11 : Elévation de la température interne sur la température ambiante en fonction de l'ensoleillement. Jour 2

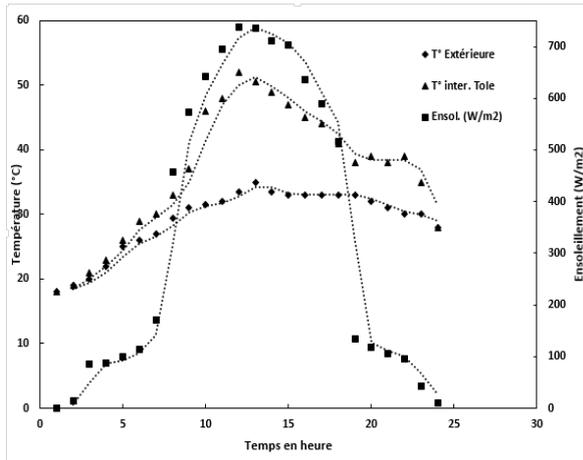


Figure 12 : Elévation de la température interne sur la température ambiante en fonction de l'ensoleillement. Jour 3

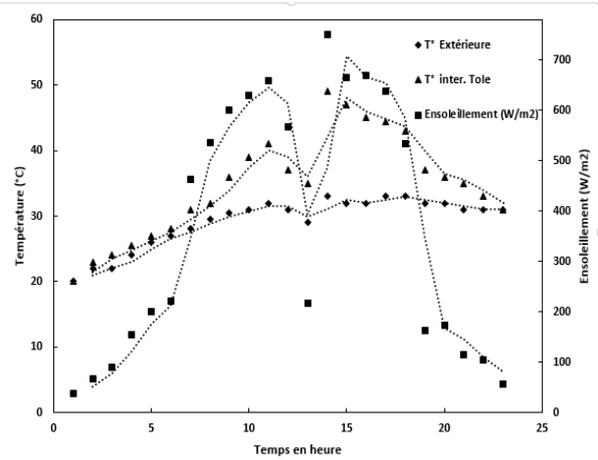


Figure 13 : Elévation de la température interne sur la température ambiante en fonction de l'ensoleillement. Jour 4

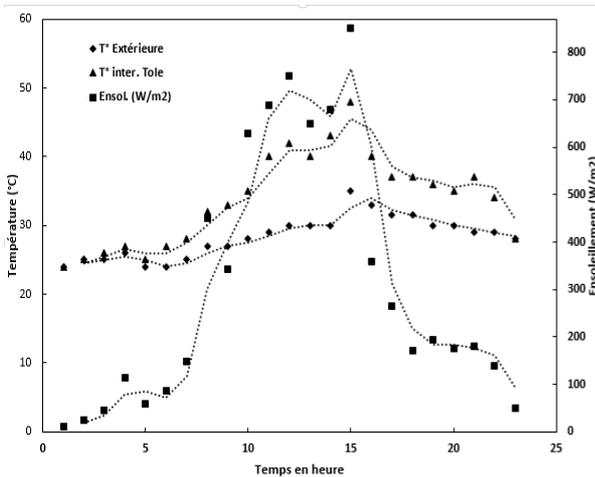


Figure 14 : Elévation de la température interne sur la température ambiante en fonction de l'ensoleillement. Jour 5

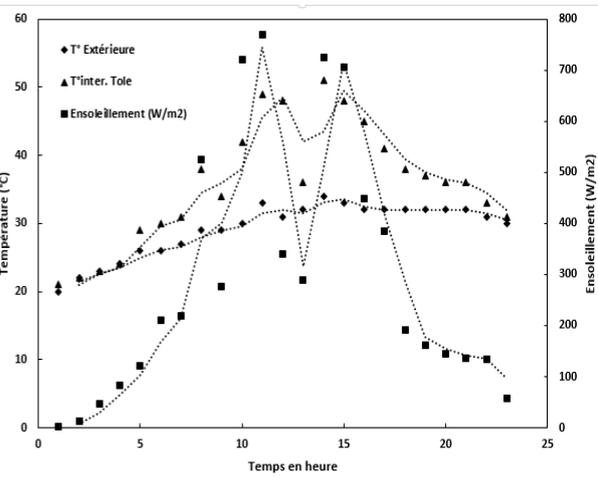


Figure 15 : Elévation de la température interne sur la température ambiante en fonction de l'ensoleillement. Jour 6

Pour ces six jours de mesure choisis, la température ambiante varie entre 18°C et 32°C, la température interne varie de 18°C à 52°C, l'ensoleillement quant à lui atteint des valeurs crête d'environ 800W / m². Ces trois paramètres évoluent de façon synchrone pour atteindre leurs valeurs maximales entre 11 h et 15 h. Ces observations sont normales et confirment clairement l'influence du rayonnement solaire sur les variations de température. La **Figure 16** présente les variations de l'élévation de la température interne par rapport à la température ambiante en fonction de l'ensoleillement. Nous obtenons une droite dont l'équation est donnée dans le **Tableau 2** ci-dessous. Des résultats similaires sont obtenus par [21].

Tableau 2 : Loi de variation de la température et paramètres caractéristiques de la chambre de séchage

Équation de ΔT_{int}	$\frac{A_c F_R \alpha \tau}{\dot{m} C_a}$	$\frac{A_c F_R \alpha \tau}{\dot{m} C_a} G_{tmin}$	$G_{tmin} (W/m^2K)$
$T_o - T_i = 0,0197 G_t$	0,0197	0	0

Dans la chambre de séchage, les écarts de température entre l'intérieur et l'extérieure varient de 0°C à 20°C . La teneur en eau a été réduite de 63 % en base humide à 14,5 % en base sèche pour les cossettes de manioc. Quant aux cossettes séchées directement au soleil sur une bâche, elles présentaient encore de l'humidité le soir et avaient pris de la poussière. Pour le cacao, la masse a cessé de décroître le troisième jour, à partir de 13 h. La teneur en eau a été réduite de 55 % en base humide à 8,53 % en base sèche.

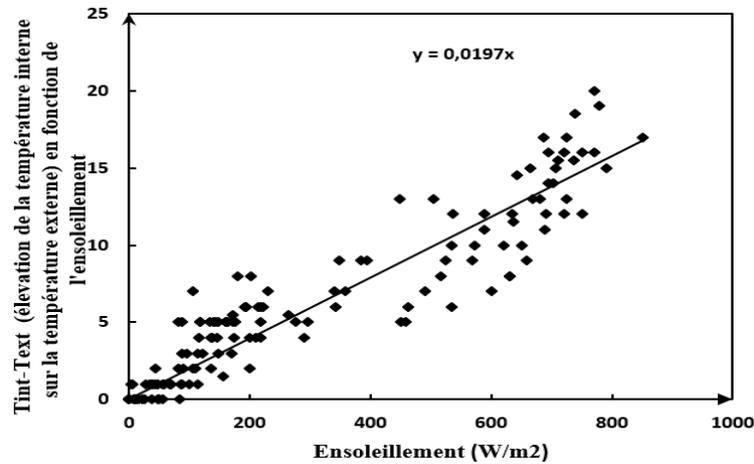


Figure 16 : Variation de ΔT_{int} en fonction de l'ensoleillement

3-3. Modélisation des courbes de séchage

Les *Figures 17 et 18* ci-dessous présentent les variations de la teneur en eau réduite $x^*(t)$ obtenues expérimentalement. Le temps de séchage du cacao est de 27 h. Quant au manioc, la durée de séchage est de 26 h. Pour les deux courbes, on observe une décroissance continue de la teneur en eau des produits au fil du temps. Cette décroissance est rapide durant les 8 premières heures de séchage. Ceci s'explique par la présence d'eau libre en quantité considérable dans le produit [22]. La décroissance est beaucoup plus rapide dans le cas du manioc que pour le cacao. Pour les heures suivantes, la décroissance est lente. On explique cela par la présence de l'eau de plus en plus attachée à la matière et difficile à arracher au produit. Ces constats sont conformes à la littérature [19, 23]. Nous avons procédé à la modélisation des courbes de séchage afin de prédire le comportement du manioc et du cacao lors de leur séchage dans le prototype. Le lissage s'est fait en utilisant les modèles cités plus haut avec Matlab. Les résultats pour chaque modèle et pour chaque produit sont répartis dans les *Tableaux 3 et 4* ci-dessous.

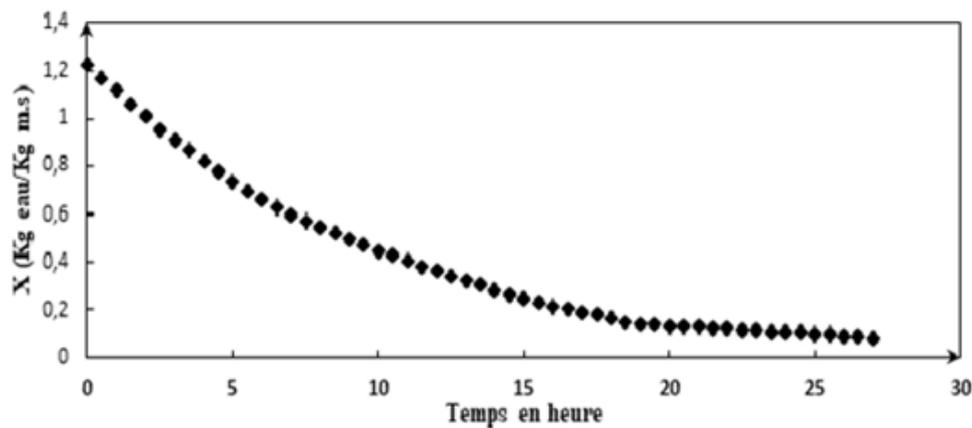


Figure 17 : Variation de la teneur en eau du cacao en fonction du temps

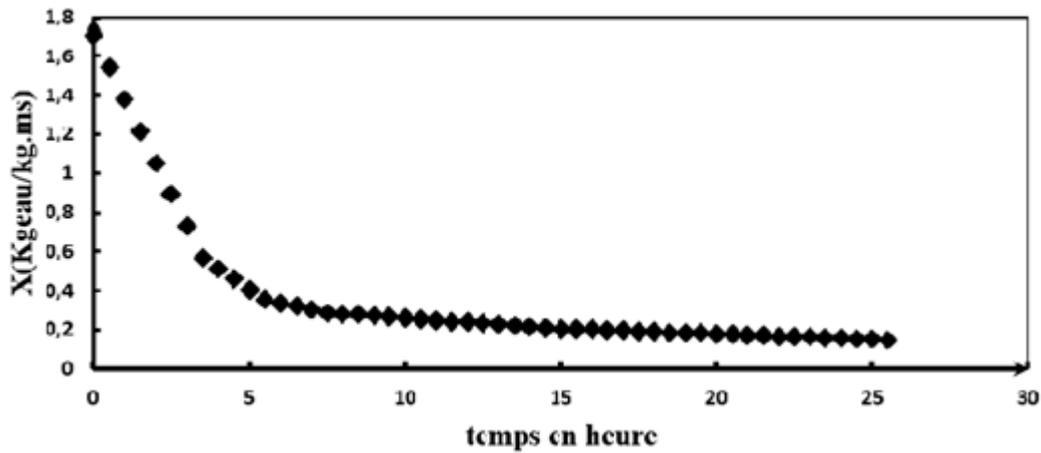


Figure 18 : Variation de la teneur en eau du manioc en fonction du temps

Tableau 3 : Résultats de la modélisation de $x^*(t)$ pour le cacao avec les 13 modèles

Modèle	X^*	Constantes	R^2	RMSE	SSE	χ^2
Newton	$\exp(-kt)$	$K = 0,08403$	0,9435	0,07882	0,3355	
Page	$\exp(-kt^n)$	$K = 0,03128$ $n = 1,394$	0,9751	0,05284	0,148	
Henderson et Pabis	$a \cdot \exp(-kt)$	$a = 1,244$ $k = 1,1054$	0,9988	0,01149	0,006997	
Logarithmique	$a \cdot \exp(-kt) + c$	$a = 1,253$ $k = 0,1018$ $c = -0,01586$	0,999	0,01087	0,006139	
Two term	$a \cdot \exp(-k_0t) + b \cdot \exp(-k_1t)$	$a = -0,1859$ $b = 1,41$ $k_0 = 0,2311$ $k_1 = 0,113$	0,9992	0,009776	0,004874	
Two term exponential	$a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	$a = 0,0001013$ $k = 829,1$	0,9435	0,07959	0,3357	
Wang et Singh	$1 + at + bt^2$	$a = -0,06608$ $b = 0,01168$	0,9636	0,06386	0,2162	
Approximation de la diffusion	$a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	$a = -0,2544$ $k = 4,843$ $b = 0,02195$	0,9907	0,03266	0,05545	
Henderson Et Pabis modifié	$a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt) + c \cdot \exp(-ht)$	$a = -0,01735$ $b = 0,08822$ $c = 1,161$ $g = 0,1053$ $h = 0,1059$ $k = 1,146$	0,999	0,01127	0,006221	
Verma et al.	$a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	$a = -0,08872$ $g = 0,08396$ $k = 0,08294$	0,9435	0,08032	0,3355	
Midilli-Kucuk	$a \cdot \exp(-kt^n) + bt$	$a = 0,9878$ $k = 0,0845$ $n = 1,0879$ $b = 0,0005$	0,9996	0,007419	0,003027	$5,93 \cdot 10^{-05}$

3-3-1. Paramètres statistiques

Les résultats statistiques utilisés pour évaluer la cohérence des modèles à décrire ces courbes de cinétique de séchage sont données dans les tableaux 2 et 3. Pour le séchage du cacao le coefficient de détermination r^2 varie de 0,9435 à 0,9996, le *RMSE* varie de 0.007419 à 0,08032 et le *SSE* varie de 0,003027 à 0,3357. On obtient les plus faibles valeurs de χ^2 , de *SSE* et de *RMSE* ainsi que la plus forte valeur du coefficient de détermination, pour le modèle de Midilli-Kucuk. Pour le séchage du manioc, les valeurs de r^2 varient de 0,6187 à 0,994, de 0.9049 à 0.01311 pour le *SSE* et de 0.07673 à 0.01688 pour le *RMSE*. Le modèle choisi est le modèle de Henderson Et Pabis modifié. C'est ce dernier qui présente les plus faibles valeurs de χ^2 , *SSE* et *RMSE* et la plus forte valeur de r^2 .

Tableau 4 : Résultats de la modélisation de $x^*(t)$ pour le manioc avec les 13 modèles

Modèle	X^*	Constantes	R^2	RMSE	SSE	χ^2
Newton	$\exp(-kt)$	$k = 0.228$	0.8735	0.07673	0.3002	
Page	$\exp(-kt^n)$	$k = 0.3936$ $n = 0.6558$	0.934	0.05597	0.1566	
Henderson et Pabis	$a \cdot \exp(-kt)$	$a = 0.9181$ $k = 0.2033$	0.8794	0.07566	0.2862	
Logarithmique	$a \cdot \exp(-kt) + c$	$a = 0.9479$ $k = 0.3558$ $c = 0.1072$	0.9904	0.02156	0.02278	
Two term	$a \cdot \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	$a = 0.1342$ $k_0 = 0.01251$ $b = 0.9267$ $k_1 = 0.3756$	0.991	0.02112	0.0214	
Two term exponential	$a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	$a = 0.0214$ $k = 0.4983$	0.9114	0.06486	0.2103	
Wang et Singh	$1 + at + bt^2$	$a = -0.1219$ $b = 0.00368$	0.6187	0.1345	0.9049	
Approximation de la diffusion	$a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \cdot \exp(-kbt)$	$a = 0.8808$ $k = 0.342$ $b = 0.02067$	0.9881	0.02405	0.02833	
Henderson Et Pabis modifié	$a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt) + c \cdot \exp(-ht)$	$a = 0.254$ $k = 0.0491$ $b = 32.77$ $g = 0.7476$ $c = -32.03$ $h = 0.7613$	0.9945	0.01688	0.01311	0,000285
Verma et al.	$a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	$a = 0.881$ $k = 0.3419$ $g = 0.006978$	0.9881	0.02405	0.02833	
Midilli-Kucuk	$a \cdot \exp(-kt^n) + bt$	$a = 1.049$ $k = 0.3268$ $n = 0.9086$ $b = 0.004899$	0.9813	0.03045	0.0445	

3-3-2. Validation des modèles

La validation des modèles de Henderson et Pabis modifié pour le manioc et de Midilli-Kucuk pour le cacao est faite en comparant les résultats expérimentaux de teneurs en eau et ceux simulés.

3-3-2-1. Confrontation des résultats expérimentaux et prédits

Les **Figures 19 et 20** ci-dessous présentent les valeurs expérimentales de la teneur en eau réduite en fonction des valeurs prédites par le modèle, respectivement par le modèle de Midilli-Kucuk et par le modèle de Henderson Et Pabis modifié. Les valeurs du coefficient de détermination sont estimées à 0,9946 pour le modèle de Henderson Et Pabis modifié et à 0,9992 pour le modèle de Midilli-Kucuk. Ces valeurs élevées de R^2 indiquent qu'il y a un bon accord entre la théorie et l'expérience [24].

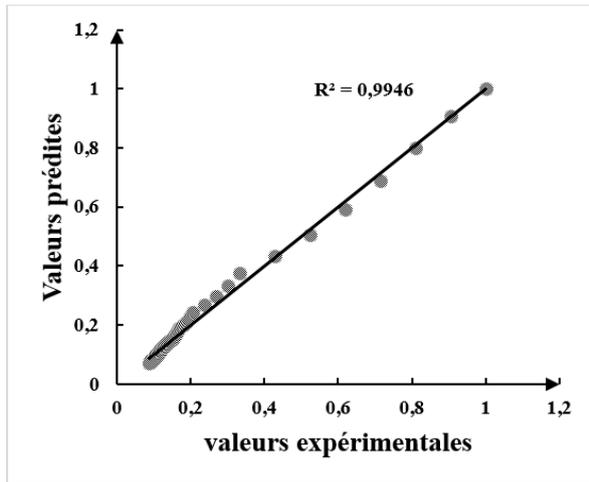


Figure 19 : Comparaison des valeurs expérimentales et des valeurs prédites par le modèle de Henderson et Pabis modifié dans le séchage du manioc

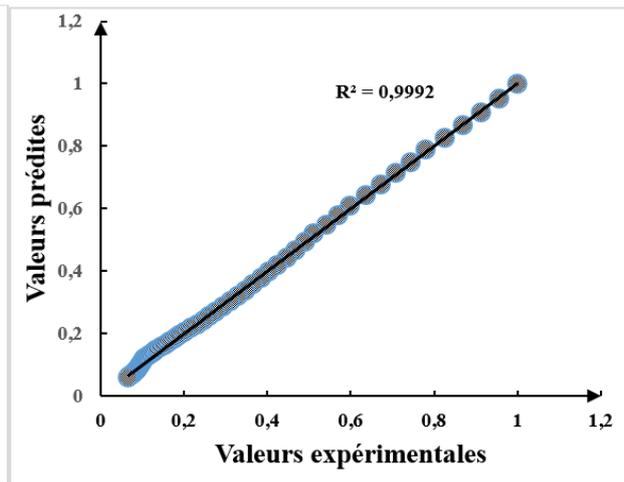


Figure 20 : Comparaison des valeurs expérimentales et des valeurs prédites par le modèle de Midilli Kucuk pour le séchage du cacao

3-3-2-2. Simulation numérique

Dans cette phase de la validation du modèle, on cherche à voir dans quelle mesure l'utilisation des modèles de Henderson et Pabis modifié et Midilli-Kucuk obtenus à partir des essais peuvent être étendu à d'autres essais de séchage, réalisés dans des conditions proches mais différentes et qui n'ont pas été utilisés pour la détermination des modèles. Les résultats de simulation montrent un accord satisfaisant entre les valeurs simulées et les mesures expérimentales (**Figures 21, 22, 23, 24, 25 et 26**) [25].

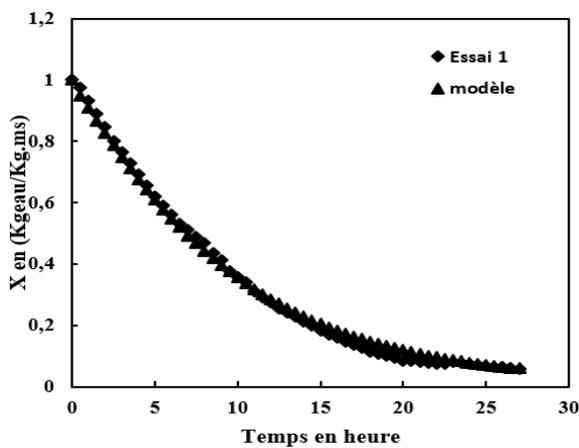


Figure 21 : Simulation de l'essai 1 pour le cacao

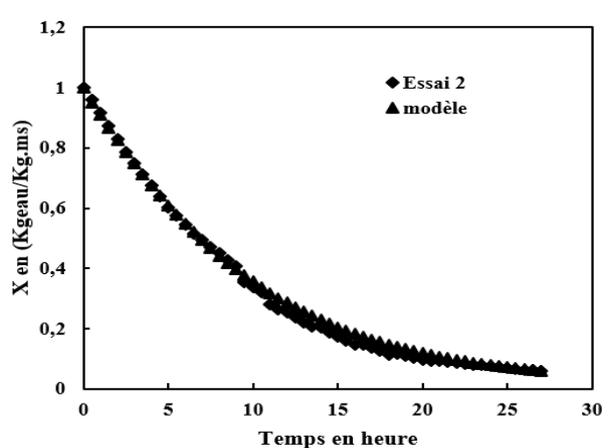


Figure 22 : Simulation de l'essai 2 pour le cacao

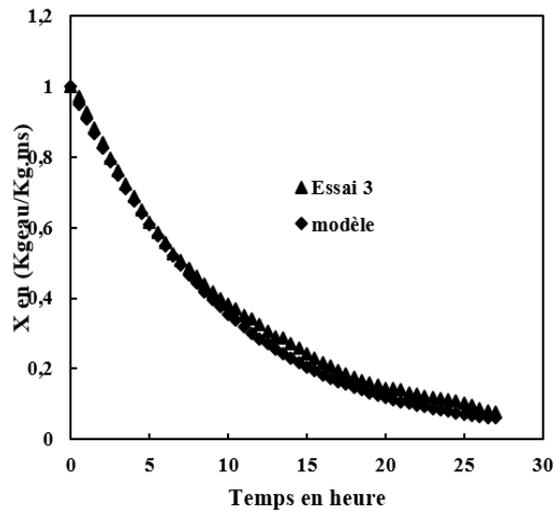


Figure 23 : Simulation de l'essai 3 pour le cacao

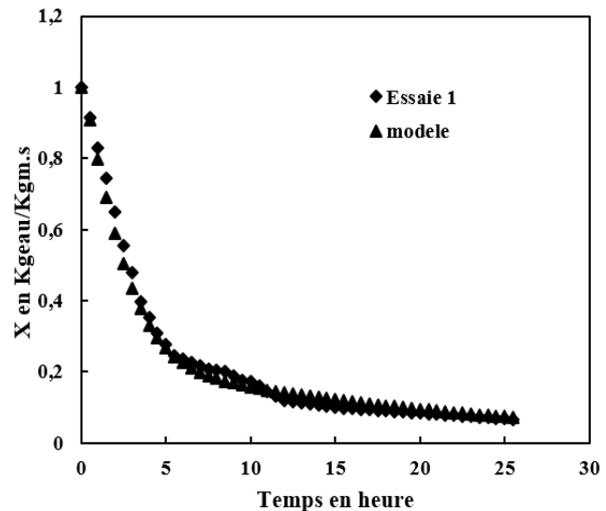


Figure 24 : Simulation de l'essai 1 pour le manioc

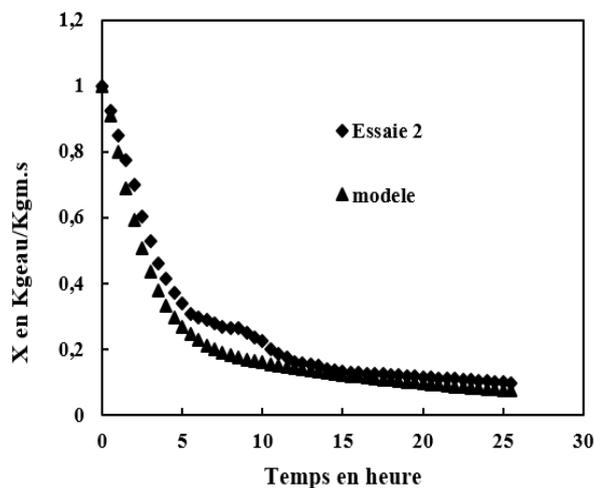


Figure 25 : Simulation de l'essai 2 pour le manioc

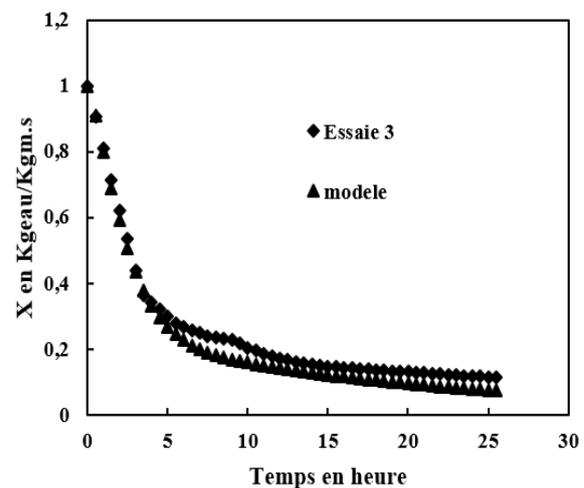


Figure 26 : Simulation de l'essai 3 pour le manioc

4. Conclusion

Les tuyaux de PVC sont appropriés pour leur rôle de cheminée solaire car entraînent une croissance du débit d'air dans le séchoir avec l'ensoleillement. Quant à la chambre de séchage, sa température atteint des valeurs maximales de 52°C pour des températures ambiantes de 32°C et un rayonnement solaire de 800 w/m^2 . Ces températures favorisent le séchage des produits agricoles. Les équations caractéristiques de Henderson et Pabis modifié et Midilli Kucuk décrivent respectivement le séchage du cacao et du manioc dans le prototype de grenier séchoir. Il faut noter que le prototype est respectueux de l'environnement et est réalisé avec du matériel moins cher dont on peut se procurer facilement. D'après les résultats de cette étude, il est donc possible proposer le grenier séchoir équipé des cheminées solaires en tuyaux de PVC comme solution viable pour le séchage des produits agricoles.

Références

- [1] - A. AYENSU, "Dehydration of food crop using a solar dryer with convective heat flow", *Sol Energy*, 59 (4 - 6) (1997) 121 - 126
- [2] - MA. KARIM and MNA HAWLADÉ, "Development of solar air collectors for drying applications", *Energy Convers Manage*, 45 (2004) 329 - 44
- [3] - LAHSASNI S. KOUHILA M, JAOUHARI JT, "Drying kinetic of pickly pear fruits (opuntia ficus indicā)". *J Food eng*, 61 (2004) 173 - 9
- [4] - EL-SEBAIL AA, ABOUL ENEIN S, RAMADAN MRI, EL-GOHARI HG, "Experimental investigation of an indirect type naturel convection solar dryer", *Energy Convers Manage*, 43 (2002) 2251 - 56
- [5] - S. SING, P. PAL SINGH, SS. DHALIWAL, "Multiself portable solar dryer", *Renew Energy*, 29 (2004) 753 - 65
- [6] - HP. GARG, R. KUMAR, "Study on semi-cylindrical solar tunnel dryer ; year round Collector performance", *Int J Energy Res*, 22 (1998) 1381 - 95
- [7] - L. BENNAMOUN, A. BELHAMRI, "Design and simulation of a solar dryer for agriculture products". *J Food Eng*, 59 (2003) 259 - 66
- [8] - S. BEN MABROUK, A. BELGHITH, "simulation and design of a tunnel dryer". *Renew Energy*, 5 (1) (1994) 469 - 73
- [9] - KIEBLING JÖRG, "Solar trochner, Eine Tabellarische Übersicht (in German)", Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, OE 402.2. Information and Advisory service for appropriate Technology (ISAT), Projekt Nummer 88.200.3, (1996) 03 - 100
- [10] - K B. A. KOUA, "Etude d'un séchoir solaire direct utilisant un circulateur thermique". Thèse de Doctorat de troisième cycle. Université de Cocody Abidjan. Côte d'Ivoire, (2003) 127 p. B. "Modelling of thermal behavior of a direct solar drye possessing a chimney : application to drying of cassava", *IJST*, 4 (12) (2011) 0974 - 684
- [11] - www.fao.org/docrep/008/w0078f/w0078f0c., (Janvier 2019)
- [12] - C. OKO and S. NNAMCHI, "Optimum collector tilt angles for low latitudes", *Open Renew. Energy J.*, 5 (2012) 7 - 14
- [13] - A. MOUMMI, N. HAMANI, N. MOUMMI and Z. MOKHTARI, "Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra". 8ème Séminaire International sur la Physique Energétique. Centre Universitaire de Béchar—Algérie, (11 et 12 Novembre 2006)
- [14] - W. ZAMBRADO and S. ALVARADO, "Design, Construction and testing of a chimney that reduces dangerous temperature in radiative convective solar dryer", *Solar Energy*, 32 (5) (1984) 581 - 594
- [15] - VAL ECKECHUKWU and BRIAN NORTON, "Design and Mesured Performance Of a Solar Chimney for Natural Circulation Solar Energy Dryers". Available from Brian Norton. Retrieved on 12 January (2016), IC 95/331
- [16] - AKA S. KOFFI, N'GORAN YAO, KOUAKOU KONAN, JOSEPH K. SARAKA and DENIS BRUNEAU, "Design, Realization and Optimisation of A Flat-Plate Solar Collector for an Indirect Dryer of Cocoa Beans", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 7 (5) (2017) 2250 - 2459
- [17] - Y. JANNOT, "thermique Solaire", (2011)
- [18] - HG. HOTTEL and A. WILLIER, "Evaluation of flat-plate collector performance", *Trans. Conf. Use of solar Energy II, Thermal Process*, University of Arizona. USA., (1958) 74 - 104
- [19] - JA. DUFFIE and WA. BECKMAN, "Solar engineering of thermal process", John wiley and Sons, NY, (1991) 197 - 249

- [20] - PANEL THIERRY BASSENE, VINCENT SAMBOU, ANDRE TALLA and SALIF GAYE, "Détermination expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage des granules de la farine de mil par la méthode de la courbe caractéristique de séchage (CCS)", *Afrique SCIENCE*, 13 (4) (2017) 241 - 250
- [21] - P. GBAHA, H. YOBOUET ANDOH, J. KOUASSI SARAHA, B. KAMENAN KOUA and S. TOURÉ, "Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow", *Renewable Energy*, 32 (2007) 1817 - 1829
- [22] - C. HII, C. LAW and S. SUZANNAH, "Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying", *J. Food Eng.*, 108 (2) (2012) 276 - 282
- [23] - AKA S. KOFFI, N'GORAN YAO, KOUAKOU KONAN, DENIS BRUNEAU, ADAMA TRAORE, KADJO A. DIBY and JOSEPH K. SARAHA, "A numerical Model of cocoa beans drying kinetics in an indirect solar and air crossing dryer", *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 23 (4) (2018) 717 - 731
- [24] - S. MEZIANE, "Modélisation de la cinétique du séchage convectif du grignon d'olive", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 16, N°2 (2013) 379 - 387
- [25] - C. AKMEL DJEDJRO, "Séchage Solaire des fèves de cacao: Étude expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage", Thèse de Doctorat de l'Université d'Abobo-Adjamé, (2009) 126 p.