

Etude expérimentale d'une enceinte isotherme isolée à base de laine de kapok pour la conservation du froid

Drissa OUEDRAOGO^{1*}, Serge Wendsida IGO², Gaël Lassina SAWADOGO¹,
Abdoulaye COMPAORE², Belkacem ZEGHMATI³, Xavier CHESNEAU³

Résumé

Ce travail concerne une étude expérimentale d'une enceinte isotherme développée pour la conservation de la chaleur ou du froid. La matrice isolante de l'équipement est constituée de la laine de kapok, un isolant naturel que l'on trouve en abondance au Burkina Faso. Dans nos travaux précédents, nous avons montré que cet équipement, grâce à son isolation thermique pouvait contribuer à réduire de façon significative la consommation d'énergie thermique dans le secteur de la restauration. Il permet également de conserver les mets cuits pendant de longues heures. La présente étude a permis de mettre en exergue une autre propriété de l'équipement à savoir la conservation du froid. En effet, à travers un bilan massique au cours du temps d'une quantité initiale de glace dans l'équipement de 5 kg, nous avons obtenu un taux de conservation de 50 % de glace au bout de quatre (04) jours. Ces résultats, corroborés par le monitoring des températures au sein de l'équipement montrent que l'enceinte isotherme peut être utilisée dans la chaîne de froid pour la conservation des produits alimentaires périssables.

Mots-clés : Enceinte isotherme, laine de kapok, isolation thermique, conservation du froid, conservation de produits.

Experimental study of an isothermal container insulated with kapok wool for cold storage

Abstract

This work concerns an experimental study of an isothermal container insulated with kapok wool for heat or cold storage. The insulation matrix of the equipment consists of kapok wool, a natural insulator that is found in abundance in Burkina Faso. In our previous work, we have shown that this equipment, thanks to its thermal insulation, can contribute to reduce significantly energy consumption in the catering sector. It also keeps cooked dishes for long hours. The present study has enabled us to highlight another property of the equipment, namely cold storage. Indeed, through a mass balance over time of an initial amount of ice in the equipment, we obtain a conservation rate of 50% of ice after four (04) days. These results corroborated by the monitoring of temperatures within the equipment show that the isothermal container can be used in the cold chain for the conservation of perishable food products.

Keywords: Isothermal container, kapok wool, thermal insulation, cold storage, conservation of products.

¹ Université Joseph KI-ZERBO/Laboratoire d'Energies Thermiques Renouvelables (LETRE), Ouagadougou, Burkina Faso

² Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT/CNRST)/Département Energie, Ouagadougou, Burkina Faso

³ Université de Perpignan Via Domitia/Laboratoire de Mathématiques et Physique (LAMPS), Perpignan, France

* Auteur correspondant : ouedraogodri2016@gmail.com

Introduction

L'isolation thermique est l'une des solutions les plus utilisées pour économiser l'énergie dans différents secteurs (bâtiment, industrie, etc.). De nos jours, l'isolation naturelle est de plus en plus préférée à l'isolation synthétique (polyuréthane, polystyrène, laine de verre ou de roche, etc.) en raison des exigences liées au climat et au développement durable. Les isolants naturels sont entièrement recyclables, biodégradables et peuvent être d'origine végétale, animale ou minérale. Des auteurs (KRISHPERSAD *et al.*, 2006) ont montré dans leurs travaux que l'utilisation d'une isolation thermique biodégradable atténue les problèmes environnementaux contrairement aux isolants thermiques non biodégradables. Leur production n'entraîne également aucun dommage sur les écosystèmes (ROUT *et al.*, 2001). En plus des avantages sur le plan environnemental, leur fabrication locale les rend moins coûteux par rapport aux isolants synthétiques importés. Parmi les isolants naturels que l'on trouve en abondance dans les pays tropicaux comme le Burkina Faso, se trouve la laine de kapok.

De nombreuses études scientifiques ont démontré la capacité de cette fibre à concurrencer les isolants synthétiques. Ainsi, les travaux expérimentaux (VOUMBO *et al.*, 2008) sur la laine de kapok, en utilisant la méthode des plaques, ont révélé des propriétés thermophysiques très intéressantes de cette fibre. En effet, ils ont montré que la conductivité thermique de la laine de kapok varie entre 0,03 et 0,04 W/m. K pour une densité comprise entre 5 et 40 kg/m³ et une diffusivité thermique moyenne de $17,1 \cdot 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$. Ces propriétés sont très proches de celles d'isolants synthétiques tels que le polystyrène et le polyuréthane.

Dans le même sens, DAMFEU *et al.*, (2016) ont déterminé expérimentalement en utilisant la méthode du flux radial à faible densité les propriétés thermophysiques des fibres naturelles suivantes : fibres kapok, fibres de coque d'arachide, fibre de rotin et fibre de coco. Les résultats présentés montrent que la conductivité thermique de la laine de kapok ($\lambda = 0,045 \text{ W/ m. K}$) est en accord avec celle rapportée par WEREME *et al.*, 2010.

WANG.F, (2009) a analysé expérimentalement le transfert de chaleur dans le kapok à l'aide d'un capteur HIH-3610. Il a montré que l'utilisation de la laine de kapok comme matériau d'isolation thermique dans le tissu aide à minimiser les pertes de chaleur du corps humain. L'influence de la température et de la vitesse du vent sur le transfert de chaleur à travers la laine kapok a été analysée et comparée à celle du coton. Il a été démontré qu'avec la laine de kapok les pertes de chaleur du corps humain sont inférieures à celles obtenues avec le coton. Ces résultats sur la capacité de rétention de la chaleur par la fibre de kapok sont en accord avec ceux trouvés par d'autres auteurs (GUANGBIAO *et al.*, 2009).

Dans le domaine du bâtiment, une étude comparative (MUHD *et al.*, 2014) des performances thermiques d'une maison non isolée et celle dont le toit est isolé avec de la fibre de kapok a montré que la fibre de kapok convient pour l'isolation du toit des bâtiments résidentiels dans un environnement chaud le climat.

D'autres travaux ont montré que la combinaison de la laine de kapok avec d'autres matériaux peut conduire à des matériaux isolants très intéressants. Ainsi, ADULKAREEM *et al.* (2016) ont montré à travers une étude expérimentale que les mélanges laine de kapok-bagasse de canne à sucre ou laine de kapok-fibre de coco à des pourcentages de 50 % conduisent à de très bons matériaux isolants. Il en est de même pour VOUMBO *et al.* (2008) qui ont montré que l'ajout d'une petite quantité de laine de kapok au plâtre conduit à une amélioration des propriétés thermophysiques du matériau composite.

En raison de ses propriétés thermophysiques très intéressantes, nous avons récemment utilisé de la laine de kapok dans l'isolation thermique d'un autocuiseur destiné à la cuisson et à la conservation des repas. L'étude expérimentale (OUEDRAOGO *et al.*, 2020) qui s'en est suivie a montré que l'équipement permet de réaliser d'énormes économies d'énergie (entre 30 et 75 %) dans la cuisson des mets locaux. Sa constante de temps est d'environ 60 heures et son déphasage thermique est d'environ 7 heures.

Ainsi, si cet équipement permet une très bonne conservation de la chaleur, tout porte à croire qu'il en serait de même pour le froid, mais en absence d'étude scientifique, cette hypothèse ne peut être vérifiée.

Par conséquent, l'objectif de ce travail est de réaliser une étude expérimentale du dispositif sur la conservation du froid. Les résultats obtenus permettront de vérifier l'hypothèse ci-dessus et éventuellement d'assigner à l'équipement une autre fonction en plus de la cuisson des repas, à savoir celle de la conservation des denrées alimentaires périssables.

I. Matériels et méthodes

1.1. Matériels

Dans le cadre de nos expériences, nous avons utilisé :

- Une enceinte isotherme

Elle est de forme parallélépipédique et de dimensions : Longueur x Largeur x Hauteur = 65 cm x 60 cm x 50 cm. La paroi extérieure est constituée d'une enveloppe métallique en tôle noire d'épaisseur 2 mm. L'intérieur de l'équipement est constitué d'une couche d'isolation en laine de kapok d'épaisseur 15 cm recouverte par un tissu peau de pêche de couleur noire. La laine de kapok est séparée de la paroi extérieure par une feuille de contreplaqué d'épaisseur 15 cm qui renforce l'isolation de l'enceinte. L'ensemble de l'équipement repose sur quatre roulettes qui facilitent son déplacement. Une vue schématique de l'équipement est présentée sur la figure 1.

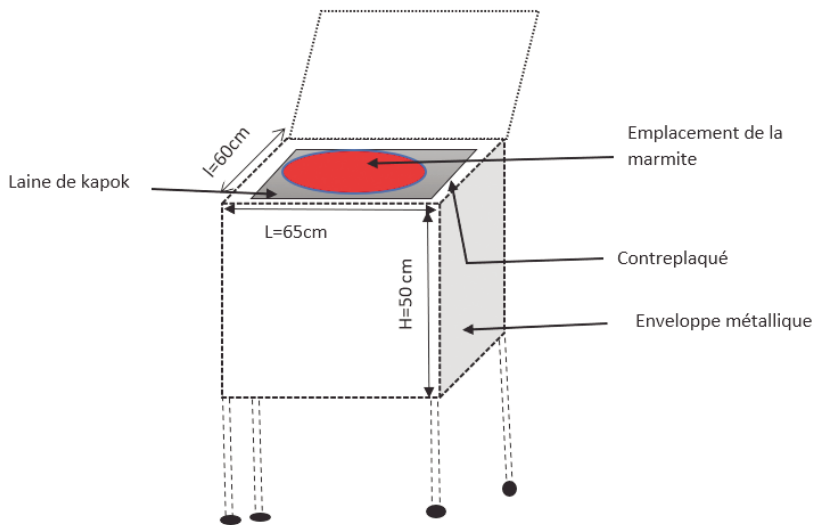


Figure 1 : Vue schématique de l'enceinte isotherme.

Le prototype expérimental est présenté sur la figure 2.



Figure 2 : Prototype d'enceinte isotherme (source : IRSAT).

- Une marmite en aluminium de capacité 22 litres telle que présentée sur la figure 1
- De la glace obtenue sur la place du marché



Figure 3 : Echantillons de la glace utilisée.

- Des instruments de mesure, notamment :

- Une chaîne d'acquisition de données constituée d'un datalogger de type midi LOGGER GL220 de précision : 0,05 % (valeur lue) $\pm 1^{\circ}\text{C}$ d'incertitude et de sept (07) thermocouples de surface de type K ayant une incertitude de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Le datalogger a été paramétré pour enregistrer les données avec un pas de temps de 10 mn.



Figure 4 : Datalogger GRAPHTEC « midi logger GL220



Figure 5 : Thermocouple type K Une balance de laboratoire de précision : ± 0.1 kg



Figure 6 : Balance de laboratoire.

1.2. Méthodes

- Détermination du taux de conservation de la glace

De la glace de masse initiale (m_{gi}) est pesée et introduite dans la marmite qui est aussitôt plongée dans l'autocuiseur qui est ensuite hermétiquement fermé. Après 24 h, 48 h, 72 h, 96 h, 120 h et 144 h de conservation dans l'enceinte isotherme, la glace est retirée et pesée de nouveau et sa nouvelle masse ou masse conservée (m_{gc}) est notée. Le taux de conservation de la glace (T_c) dans l'enceinte isotherme est alors donné par la formule :

$$T_c (\%) = (m_{gc} / m_{gi}) \times 100 \quad (1)$$

L'incertitude absolue de calcul sur T_c est donnée par :

$$\Delta T_c (\%) = \left(\frac{\Delta m_{gc}}{m_{gc}} + \frac{\Delta m_{gi}}{m_{gi}} \right) \times T_c \quad (2)$$

- Profils de température

Comme la méthode précédente, de la glace de masse initiale (m_{gi}) est pesée et introduite dans la marmite qui est aussitôt plongée dans l'autocuiseur et hermétiquement fermé pendant six (06) jours. Les sept (07) thermocouples placés à l'intérieur du dispositif (dont un dans la marmite et un sur la paroi externe de la marmite), sur les parois externes ainsi que dans l'air ambiant permettent de suivre l'évolution des profils de température dans le temps due à la fusion progressive de la glace.

Le dispositif expérimental ayant permis de réaliser les différentes expériences est présenté sur la figure 7.



Figure 7 : Dispositif expérimental.

II. Résultats et discussion

2.1. Taux de conservation de la glace

Le tableau 1 récapitule les résultats obtenus sur le taux de conservation de la glace dans l'équipement pendant six (06) jours. L'expérience a été répétée trois (03) fois et les résultats sont presque similaires.

Tableau I : Taux de conservation de la glace

Jours de conservation	m_{gi} (kg)	m_{gc} (kg)	Taux de conservation (%)
24 h	5	4.25	$85 \pm 3,7$
48 h		3.95	$79 \pm 3,5$
72 h		3.25	$65 \pm 3,3$
96 h		2.50	50 ± 3
120 h		0.50	$10 \pm 2,2$
144 h		0	0

La figure 8 montre le taux de conservation de la glace en fonction du temps.

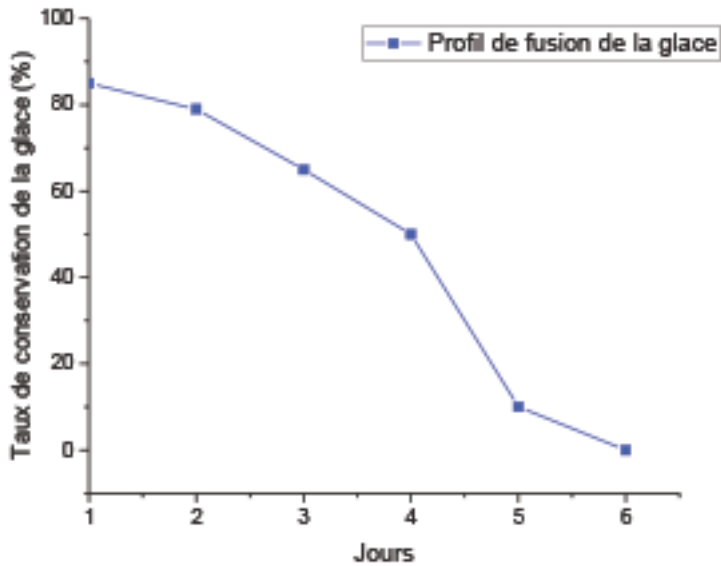


Figure 8 : Taux de conservation de la glace.

Les résultats indiquent une fusion progressive mais lente de la glace au sein de l'équipement. En 24 h, il reste dans l'équipement 85 % de la glace introduite. A ce stade, les pertes sont essentiellement dues au gradient de température entre l'intérieur du dispositif qui est à la température ambiante et la glace qui est à 0 °C. Ce gap de température fait fondre une partie de la glace, ce qui entraîne un refroidissement de l'isolant en commençant par les zones proches de la marmite. Progressivement, le refroidissement s'étend sur l'ensemble de l'isolant et il se crée alors un autre gradient de température entre le milieu extérieur (plus chaud) et l'intérieur de l'équipement (plus froid). Ce nouveau gap de température qui apparaît après le 4^e jour force le transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur de l'équipement, ce qui entraîne une fusion rapide de la glace. Cette fusion rapide est matérialisée par un point d'inflexion sur la figure 8.

2.2. Profils de températures

La figure 9 montre l'évolution des profils de température au cours du temps respectivement pour la durée de l'expérience à savoir six (06) jours. L'expérience a été répétée trois (03) fois et les résultats sont presque similaires.

Au début de l'expérience, on constate une chute brutale de la température de la marmite à cause du gradient de température entre l'intérieur de l'équipement qui est à la température ambiante (27 °C) et la marmite, plus froide (5 °C). On constate également que durant toute l'expérience, les températures des parois suivent celles de la température ambiante à cause de l'équilibre thermique, ce qui leur donne une évolution cyclique. Les pics de température observés correspondent à l'ensoleillement maximal. Les températures élevées au niveau de la face du couvercle s'expliquent par le fait que cette face est directement exposée au soleil.

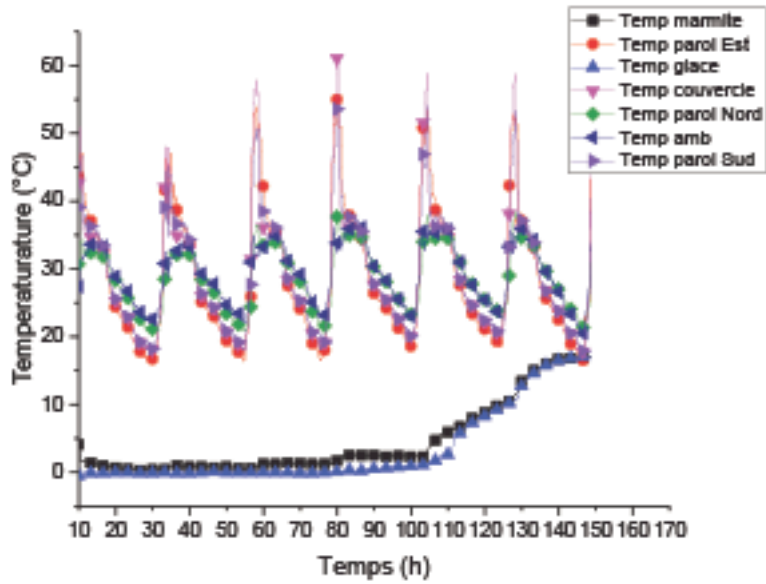


Figure 9 : Evolution des profils de températures pendant six (06) jours.

Pendant les deux premiers jours, la température de la marmite tend asymptotiquement vers celle de la glace à cause de l'équilibre thermique comme le montre la figure 10. Cette phase correspond au refroidissement de la marmite.

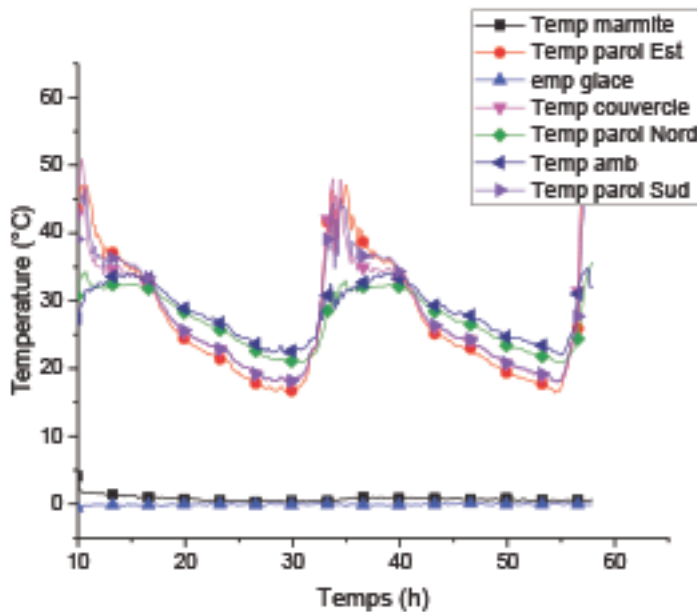


Figure 10 : Phase de refroidissement de la marmite

A partir du 3^e jour, on constate une légère augmentation (de l'ordre de 2 °C) de température de la marmite jusqu'au 4^e jour. Durant cette phase, l'équilibre thermique s'étend progressivement à l'ensemble de la matrice isolante et entraîne une fusion de presque la moitié de la glace, comme observé plus haut. Cette phase correspond au refroidissement de la matrice isolante.

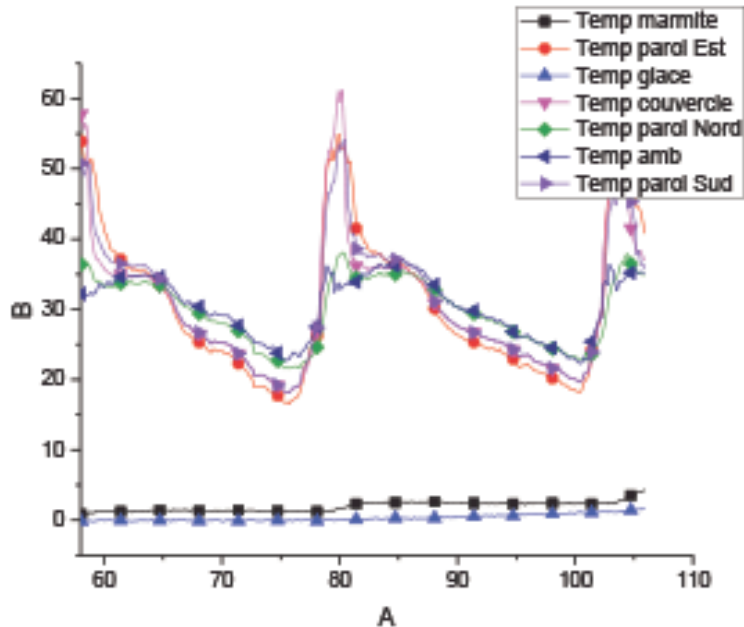


Figure 11 : Phase de refroidissement de la matrice isolante.

A partir du 5^eme jour, toute la matrice isolante est refroidie, ce qui crée immédiatement un gradient de température entre le milieu ambiant et l'intérieur de l'équipement. Ce gradient de température force un transfert de chaleur du milieu ambiant vers l'intérieur de la marmite, ce qui entraîne une fusion rapide de la glace. La température de la marmite ainsi que celle de la glace augmentent alors et tendent vers celle du milieu extérieur. L'augmentation de la température est plus faible lorsque la température ambiante baisse et plus importante lorsque celle-ci augmente. Cette phase correspond à celle de l'équilibre thermique avec le milieu extérieur.

Ces résultats corroborent ceux obtenus plus haut sur le taux de conservation de la glace et sont liés aux caractéristiques de la laine de kapok. En effet, ce matériau à cause de ses propriétés thermo-isolantes s'oppose au refroidissement rapide de l'intérieur de l'équipement, ce qui retarde la création d'un gradient de température entre le milieu extérieur et l'intérieur de l'équipement.

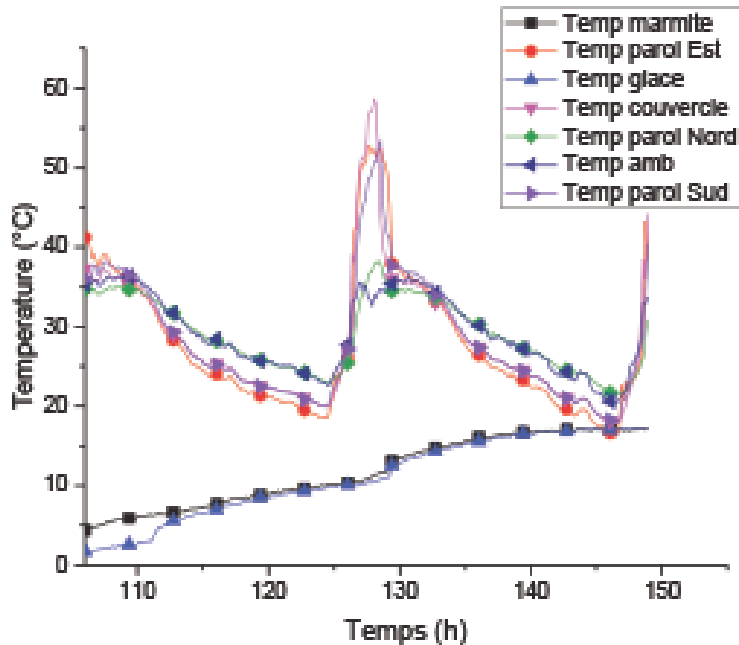


Figure 12 : Phase d'équilibre thermique avec le milieu extérieur.

Conclusion

Dans ce travail, nous avons mené l'étude expérimentale d'une enceinte isotherme isolée à base de laine de kapok pour la conservation du froid. A travers un bilan massique, les taux de conservation de la glace ont été mesurés pendant six (06) jours. Les résultats obtenus indiquent un bon taux de conservation de la glace au bout de quatre (04) jours, autour de 50 %. Le suivi des profils de température des différentes parties du dispositif en fonction du temps ont permis de corroborer ces résultats. Ces résultats sont étroitement liés aux propriétés intrinsèques de la laine de kapok, qui agit en empêchant l'établissement rapide d'un équilibre thermique entre le milieu extérieur et l'intérieur de l'équipement. L'enceinte isotherme peut donc de ce fait être utilisée dans la chaîne alimentaire pour la conservation (à l'aide de la glace) des denrées alimentaires périssables, et contribuer en même temps à la valorisation de la laine de kapok au niveau national.

Références bibliographiques

- ABDULKAREEM S, OUGOUNMODEDE S, AWEDA, ABDULRAHIM. J.O, AJIBOYE A.T AHMED.T.K., 2016.** Investigation of thermal insulation properties of biomass. *International Journal of Technology*, 7(6): 989-999.
- DAMFEU J.C, MEUKAMA. P. and JANNOTB.Y., 2016.** Modelling and measuring of the thermal properties of insulating vegetable fibers by the asymmetrical hot plate method and the radial flux method: kapok, coconut, groundnut shell fiber and rattan. *Thermochimica Acta* 630(16): 64-77
- GUANGBIAO X., JIN L., YING L., FUMEI W., 2011.** Analysis of the bending property of kapok fiber, *Journal of the textile institute*, 102 (2). 120-125.

- KRISHPERSAD M., DALE R., GURMOHAN K., SUBHAS H., 2006.** Biodegradable fibrous thermal insulation. *Biodegradable fibrous thermal insulation*, 28(1): 45-47.
- MUHD F. N., NADZHRATULHUSN A. A. P., 2014.** Effectiveness of kapok fiber (Ceibapentandra) as roof insulation for residential buildings in hot climate. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5 (15): 86-91.
- OUEDRAOGO D., IGO S. W., COMPAORE A., SAWADOGO L. G., ZEGHMATI B., CHESNEAU X., 2020.** Experimental Study of a Metallic Pressure Cooker Insulated with Kapok Wool. *Energy and Power engineering*, 12 (2): 73-87.
- ROUT J., TRIPATHY S. S., MISRA M., MOHANTY A. K., NAYAK S. K., 2001.** The influence of fiber surface modification on the mechanical properties of coir-polyester composites. *Polymer Composites*, 22 (4) : 468-476.
- VOUMBO M. L., WEREME A., GAYE S., ADJ M., SISSOKO G., 2008.** Caractérisation des propriétés thermo - physiques du kapok. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 8 (1): 33-43.
- WANG F., 2009.** Comparisons of Thermal and Evaporative Resistances of Kapok Coats and Traditional Down Coats. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 18(1): 88-92.
- WEREME A., TAMBA S., SARR M., DIENE A., DIAGNE I., NIANG F., SISSOKO G., 2010.** Caractérisation des isolants thermiques locaux de type sciure de bois et kapok : Mésure de coefficient global d'échange thermique et de la conductivité. *Journal des sciences*, 10(4) :39-46.