

Utilisation de la fibre de coco comme isolant thermique dans un chauffe-eau solaire thermosiphon

Ekoun Paul Magloire KOFFI¹, Kamenan Blaise KOUA^{1,2*}, Prosper GBAHA¹ et Siaka TOURE²

¹ Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, Laboratoire d'Energies nouvelles et Renouvelables, BP 581 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

² Université Félix Houphouët Boigny, Laboratoire d'Energie Solaire, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

* Correspondance, courriel : kouakb@yahoo.fr

Résumé

La présente étude examine la possibilité d'utiliser la fibre de coco comme isolant thermique dans un chauffe-eau solaire. Ainsi, les propriétés spécifiques de la fibre de coco sont mesurées et comparées favorablement à celles des fibres synthétiques. Les valeurs de la conductivité thermique des fibres de coco sont comprises entre 0,0703 et 0,0777 W / mK. Ces valeurs montrent que la fibre de coco est un excellent isolant thermique. Un système de chauffe-eau solaire utilisant de la fibre de coco comme matériau isolant thermique et contenant un échangeur de chaleur placé en diagonale dans le réservoir de stockage a été conçu et réalisé. Les résultats des expériences se concentrent principalement sur les niveaux des flux de chaleur et les températures enregistrées. Les flux solaires journaliers mesurés varient de 71 à 1215 W / m² pour une température ambiante quotidienne variant de 20,3 à 39,4 °C. L'efficacité moyenne de l'échangeur est supérieure à 50 %.

Mots-clés : *chauffe-eau solaire, fibre de coco, conductivité thermique, échangeur de chaleur.*

Abstract

Use of coconut fiber as thermal insulating material in a solar water heater

This study examines the possibility of using coconut fiber as a thermal insulation in a solar water heater. Thus, the specific properties of coconut fiber are measured and compared favorably with those of synthetic fibers. The thermal conductivity values of coconut fibers are between 0.0703 and 0.0777 W / mK. These values show that coconut fiber is an excellent thermal insulator. A solar water heater system using coconut fiber as a thermal insulation material and containing a heat exchanger arranged diagonally in the storage tank has been designed and constructed. The results of the experiments focus mainly on the levels of heat fluxes and recorded temperatures. The daily solar intensities vary from 71 to 1215 W / m² for a daily ambient temperature ranging from 20.3 to 39.4 °C. The average efficiency of the exchanger is greater than 50 %.

Keywords : *solar water heater, coconut fiber, thermal conductivity, heat exchanger.*

1. Introduction

Les fibres synthétiques obtenues industriellement sont les plus utilisées pour renforcer les plastiques et isoler les systèmes thermiques en raison de leurs propriétés mécaniques relativement bonnes. Cependant, un bon nombre de composants automobiles fabriqués auparavant avec des composites de fibres de verre par exemple sont maintenant fabriqués en utilisant des composites écologiques [1]. Bien que les propriétés mécaniques des fibres naturelles soient beaucoup plus faibles que celles des fibres de verre, leurs propriétés spécifiques, en particulier la rigidité, sont comparables aux valeurs indiquées pour les fibres de verre. Au niveau économique, les fibres végétales sont beaucoup moins chères que les fibres synthétiques. De plus, les fibres naturelles sont environ 50 % plus légères que les fibres de verre. En outre, la performance mécanique des fibres naturelles peut être comparée à celle des fibres synthétiques actuellement utilisées et elles présentent de bonnes propriétés thermiques [2]. Parmi les diverses fibres naturelles disponibles dans le monde, la fibre de coco est l'une des moins chères car les plantations de noix de coco sont répandues dans les régions tropicales et subtropicales [3]. La fibre de coco possède une grande résistance aux intempéries en raison de sa teneur élevée en lignine. La forte teneur en lignine (46 % en masse) des fibres de coco fait qu'elles sont naturellement résistantes et ne nécessitent pas de traitement chimique particulier. La fibre de coco absorbe également moins d'eau par rapport à d'autres fibres en raison d'une plus faible teneur en cellulose [4].

Sa structure a une grande stabilité et son espérance de vie est de 10 ans. Dans ce travail, la fibre de coco est utilisée comme isolant thermique dans un chauffe-eau solaire en raison de ses propriétés biodégradables [5]. Les fibres biodégradables à l'instar de celles contenues dans la noix de coco ont pris une importance croissante pour des raisons économiques et environnementales [6]. Les chauffe-eau solaires sont des systèmes solaires très courants et assez utilisés dans de nombreux pays ayant un bon potentiel de rayonnement solaire, comme les pays d'Afrique subsaharienne. Dans un chauffe-eau solaire indirect, un échangeur de chaleur est utilisé pour transférer la chaleur solaire absorbée du fluide caloporteur vers le réservoir de stockage. Les échangeurs de chaleur sont généralement fabriqués à partir de matériaux conducteurs comme l'aluminium, l'acier inoxydable, la fonte, le cuivre et le bronze [7]. Pour assurer une bonne conductivité thermique et une bonne résistance à la corrosion, le cuivre est couramment utilisé dans les chauffe-eau solaires. Plusieurs configurations d'échangeur de chaleur ont été proposées pour améliorer la performance globale du chauffe-eau solaire [8, 9]. Le travail porte sur un système de chauffe-eau solaire avec circulation naturelle par thermosiphon, comprenant un échangeur de chaleur original et innovateur en tube de cuivre placé en diagonale dans le réservoir de stockage. L'objectif de ce travail est d'utiliser les caractéristiques de la fibre de coco, un isolant thermique écologique comme matériel d'isolation de température dans les systèmes solaires.

2. Matériel et méthodes

2-1. Détermination de la conductivité thermique de la fibre de noix de coco

2-1-1. Procédure expérimentale

Les noix de coco proviennent d'une plantation de cocotier se trouvant de la ville de Yamoussoukro. La noix de coco a une section transversale de 200 mm x 210 mm et une épaisseur de 40 mm. Elle a une masse moyenne de 37 g et une masse volumique moyenne de 22 kg / m³. La coque de la noix de coco est riche en cellulose et en lignine, qui sont les deux principaux éléments pour la production de fibres sans liant [10]. Les fibres sont extraites de la couche externe de l'exocarpe et de l'endocarpe du fruit. Les composants chimiques de la coque de noix de coco sont présentés dans le **Tableau 1** et ceux-ci ont été mesurés selon les procédures de l'Association Technique de l'Industrie des Pâtes et Papiers [11]. Les coques de noix de coco recueillies sont

présentées sur la **Figure 1-a**. Les fibres de coco sont tout d'abord tirées de la coque comme montré sur la **Figure 1-b**. Les coques sont trempées dans l'eau pour faciliter l'extraction des fibres. Les fibres extraites sont à nouveau lavées pour éliminer la saleté encastrée entre les fibres (**Figure 1-c**). Finalement, les fibres ont été séchées à température ambiante pendant 48 h. Chaque fibre a été soigneusement choisie (**Figure 1-d**).

Tableau 1 : Composants chimiques de la fibre et de la moelle de coco

Composants chimiques	Résultats (%)		
	Fibre de coco	Moelle de coco	Méthode
Lignine	36.73	45.12	TAPPI-T222-cm-98
Holocellulose	67.63	58.82	Chlorite acide
Cellulose	51.12	48.21	TAPPI-T203-cm-93



Figure 1 : Procédé d'extraction des fibres de coco (1-a), 1-b), 1-c)) et des fibres de coco utilisées dans les expériences comme matériaux isolants thermiques (1-d))

2-1-2. Test de conductivité thermique

La méthode utilisée dans notre cas est celle dite « des boîtes ». Elle consiste à établir un flux de chaleur unidirectionnel, normal à la surface de l'échantillon à tester. L'appareil est indiqué sur la **Figure 2**. Cet appareil est une boîte ouverte d'un côté, dans laquelle la chaleur est générée au moyen d'un système de chauffage électrique. Les parois de la boîte sont isolées thermiquement avec un matériau en fibre céramique. C'est un appareil primaire qui utilise le transfert de chaleur par conduction en régime permanent comme principe de fonctionnement et permet de déterminer la conductivité thermique. Le principe de base est de créer un flux de chaleur axial unidimensionnel à travers l'échantillon afin d'utiliser **l'Équation** de Fourier pour la conduction thermique :

$$q = -k_{ins} A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

où, q est le flux de chaleur, k_{ins} est la conductivité thermique, A est la section transversale de l'échantillon, et dT/dx est le gradient de température.

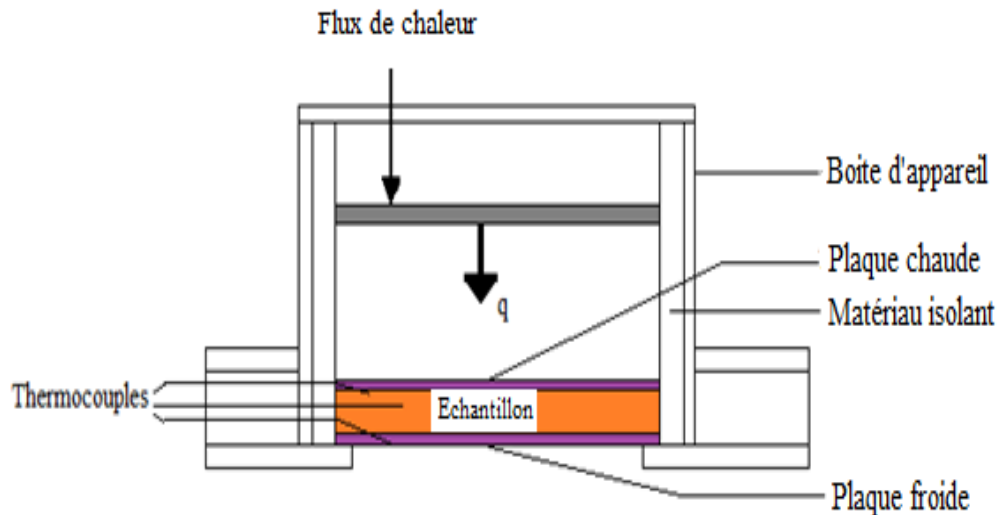


Figure 2 : Configuration expérimentale du test de conductivité thermique

Pour la détermination de la conductivité thermique, des parois sont montées sur le côté ouvert pour fermer complètement la boîte. Un flux de chaleur constant a été fourni à l'échantillon par l'intermédiaire d'une alimentation contrôlée. Le procédé consiste à établir un flux thermique unidirectionnel, normal à la surface de l'échantillon à tester, comme présenté sur la **Figure 2**. L'échantillon est placé entre une source chaude et une source froide. Le matériau testé est très hétérogène. Ainsi, les mesures de température rapportées dans cette étude ont été réalisées en utilisant un total de neuf thermocouples conçus localement. Ces thermocouples sont fixés à l'aide d'un ruban adhésif et le contact avec l'échantillon est optimisé grâce à la graisse de silicone. Quatre thermocouples situés dans la face chaude, quatre dans la face froide et un thermocouple est introduit au centre de l'échantillon. Les mesures de température ont été effectuées toutes les 10 min pendant une période de 10 h. La variation de température génère un flux de chaleur proportionnel à la différence de température. Une fois l'état d'équilibre atteint, on peut enregistrer la température moyenne sur les côtés chaud et froid de l'échantillon. On mesure également la température de l'air de la boîte chaude et celle de l'air ambiant. Connaissant la puissance délivrée par la source chaude, il devient alors possible de calculer la conductivité thermique du matériau en rapportant les valeurs obtenues dans l'équation de Fourier. Les résultats ont montré que les valeurs de conductivité thermique des fibres de noix de coco s'étendent de 0,0703 à 0,0777 W / mK. Ces résultats sont en accord avec ceux de la littérature [10, 12].

2-2. Système de chauffe-eau solaire

Le chauffe-eau solaire réalisé comprend un capteur solaire de 2 m² de surface, un échangeur de chaleur disposé en diagonale dans le réservoir de stockage de capacité 95 litres et la tuyauterie des connexions comme le montre la **Figure 3**. Avec un diamètre extérieur de 12 mm et une longueur de 6 m, la surface de l'échangeur de chaleur enroulé est de 0,226 m². L'isolation thermique du système est faite à l'aide de fibres de coco. Le réservoir de stockage est disposé horizontalement comme représenté sur la **Figure 3**. L'échangeur de chaleur est placé en diagonale dans le réservoir de stockage de sorte que le fluide chaud traverse une quantité significative d'eau stockée dans le réservoir. Le capteur solaire comprend un absorbeur composé de 12 tubes séparés de 12 mm et peints en noir mat. Au-dessous de ces tubes, se trouve une feuille d'aluminium qui réfléchit le rayonnement solaire reçu vers l'absorbeur. Le capteur solaire est recouvert d'une vitre en verre de 4 mm d'épaisseur. Le capteur solaire est dirigé vers le sud et incliné de 10° par rapport à l'horizontale. Les spécifications techniques détaillées du système solaire réalisé sont données dans le **Tableau 2**.



Figure 3 : *Système de chauffe-eau solaire étudié et une présentation du réservoir de stockage avec l'échangeur de chaleur*

Tableau 2 : *Spécifications du chauffe-eau solaire utilisé*

Matériaux de conception / paramètres	Spécifications
a. Capteur solaire	
Dimension	2200mm x 1000mm x 100 mm
Type	Plan
Longueur du collecteur (partie supérieure)	d: 20 mm, longueur 1100 mm (tuyau de cuivre)
Longueur du collecteur (partie inférieure)	d: 20 mm, longueur 1100 mm (tuyau de cuivre)
Longueur des tubes	D 12mm, D 10 mm, longueur 2000 mm (tuyau de cuivre)
Nombre de tubes	12
Plaque d'absorbeur	Tubes en cuivre, longueur 2000 mm, distance entre tubes parallèles 58 mm
Isolation	fibre de coco d'épaisseur 50 mm
couverture du capteur (vitre)	Verre transparent de 4 mm d'épaisseur
Cadre	Tôle galvanisée, épaisseur 1.5 mm
Angle d'inclinaison	10° par rapport à l'horizontal
Orientation	Sud
b. Réservoir de stockage	
Disposition	horizontal
Longueur	490 mm
Dimension	Diamètre 750mm x 390 mm
Materiel	Tôle galvanisée, épaisseur 3 mm
Isolation	fibre de coco d'épaisseur 50 mm
Couverture	Tôle galvanisée, épaisseur 3 mm
Volume	95 L
c. Echangeur de chaleur	
Longueur du tube	6000 mm (D 12 mm)
Géométrie	Tube enroulé en une boucle
Type d'échangeur	Boucle (Diamètre 160 mm) (tube en cuivre), espacée de 45 mm
Surface effective de transfert de chaleur	0.226 m ²
d. Tuyau de raccordement	
Tube situé entre la sortie de l'échangeur de chaleur et l'entrée du collecteur solaire	Longueur 2570 mm (10 mm diamètre intérieur) tuyau en cuivre
Tube situé entre l'entrée de l'échangeur de chaleur et la sortie du collecteur solaire	Longueur 1180 mm (10 mm diamètre intérieur) tuyau de cuivre
Isolation du fond	Fibre de coco 50 mm d'épaisseur recouverte d'une feuille d'aluminium
Isolation latérale	30 mm de fibre de coco
Absorptivité de la plaque d'absorbeur	0.95
Transmittivité du verre	0.88

Les études expérimentales ont consisté à mesurer l'ensoleillement reçue par le capteur solaire et la température en divers endroits du système. L'ensoleillement est mesurée au moyen d'un pyranomètre KIPP et ZONEN dont les incertitudes relatives sont de $\pm 2 \%$. Il est relié à un intégrateur numérique, de même marque, permettant la lecture de l'énergie solaire reçue instantanément et de l'irradiation journalière. Le pyranomètre est placé horizontalement pour obtenir tout le rayonnement solaire. Une carte d'acquisition de données, réalisée, par nos soins, permet d'enregistrer la température à divers endroits du système. Pour éviter de perturber l'écoulement du fluide, on utilise des sondes de petites dimensions (1,6 mm de diamètre) et faites de diode 1N4148 en silicium. La précision de ces sondes est de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Avant toute utilisation, les sondes sont calibrées à l'aide d'un thermomètre numérique qui donne des coefficients de température / tension de conversion complètement identiques avec une marge de 0,1. En plus de la mesure de l'ensoleillement reçu, de la température ambiante, de la température du fluide caloporteur dans le capteur solaire (entrée et sortie du capteur solaire), de la température du fluide caloporteur dans l'échangeur de chaleur (entrée et sortie de l'échangeur de chaleur), la température de l'absorbeur est aussi mesurée dans le système.

2-3. Formulation mathématique

L'évaluation des coefficients de perte thermique est fondamentale pour estimer la performance des capteurs solaires plans. L'analyse thermique des capteurs solaires a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches dans le domaine du solaire [13, 14]. L'échangeur de chaleur interne placé dans le réservoir de stockage a été utilisé pour séparer les circuits d'eau primaire et secondaire. **L'Équation** d'échange thermique intervenant au niveau de l'échangeur de chaleur est exprimée par [13]:

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{f3} - T_{f4}) = U_e \cdot A_e \cdot [\Delta T_m] \quad (2)$$

$$\text{avec, } \Delta T_m = \frac{(T_{f3} - T_w) - (T_{f4} - T_e)}{\ln \frac{T_{f3} - T_w}{T_{f4} - T_e}} \quad (3)$$

Le concept de l'efficacité de l'échangeur de chaleur (ϵ_{hx}) a été introduit par Nusselt pour calculer directement le taux de transfert de chaleur à partir des températures d'entrée des fluides [13]. Une évaluation de l'efficacité de l'échangeur de chaleur a été effectuée avec **l'Équation** suivante [15]:

$$\epsilon_{hx} = \frac{T_{f3} - T_{f4}}{T_{f3} - T_w} \quad (4)$$

Ce paramètre réduit la chaleur utile délivrée par les capteurs solaires et doit être proche de l'unité. Le rendement moyen journalier (η_d) d'un chauffe-eau solaire est un paramètre important qui décrit la performance thermique du système. Il est calculé comme suit :

$$\eta_d = \frac{MC_p (T_i - T_f)}{3600 \cdot A_c \cdot H} \quad (5)$$

Les paramètres calculés sont l'efficacité de l'échangeur de chaleur et le rendement moyen journalier du système calculée à partir des paramètres mesurés. L'analyse des résultats de ces paramètres indique une précision globale de $\pm 5 \%$.

3. Résultats et discussion

3-1. Conductivité thermique des fibres de noix de coco

La connaissance des valeurs de conductivité thermique permet une comparaison quantitative entre l'efficacité de différents matériaux d'isolation thermique [16]. Le **Tableau 3** compare ainsi la conductivité thermique de la fibre de coco à celle d'autres matériaux d'isolation thermique. Il est évident que la conductivité thermique de la fibre de noix de coco est dans la même gamme que celle obtenue pour le mélange de pelure de durian et de fibre de coco et pour la fibre de tige de coton mélangée au vermiculite [17]. Elle est légèrement supérieure à celle des autres matériaux fibreux et cellulaires tels que la fibre de verre, la laine de roche et le polystyrène extrudé [16]. Toutefois, cette valeur est environ deux fois inférieure à celle de la fibre de bois. La fibre de coco ayant une conductivité thermique inférieure à 0,25 W / m.K, elle est considérée comme un excellent isolant thermique [16]. Les fibres naturelles extraites des pelures résiduelles, feuilles, tiges, et pulpe de plantes comme le lin, la canne à sucre, l'ananas, la banane, la noix de coco, le sisal, le jute et le palmier sont constituées principalement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Ces fibres sont une ressource aisément disponible, récupérable et renouvelable. Contrairement aux fibres synthétiques, les fibres naturelles sont biodégradables, peu coûteuses, de basse densité, non toxique, disponibles mondialement, énergiquement efficace et écologiques.

Tableau 3 : Conductivité thermique de divers matériaux

Matériels	Densité (kg / m ³)	Conductivité thermique (W / mK)
Fibre de coco	22	0.0703 - 0.0777
fibre de tige de coton	150 - 450	0.0585 - 0.0815
paille de blé	150 - 250	0.0481 - 0.0521
mélange de pelure de durian et de fibre de coco	311 - 611	0.0728 - 0.1117
Fibre de Kénaf	150 - 200	0.051 - 0.058
Bois (pin)	450 - 630	0.151
Fibre de verre	24 - 120	0.034 - 0.047
Laine de roche	80 - 200	0.025 - 0.035
Polystyrène extrudé	24 - 42	0.026 - 0.035
Polystyrène (mousse à alvéoles fermées)	16 - 35	0.034 - 0.038
Perlite expansée	78 - 224	0.0477 - 0.0616
Vermiculite	80 - 200	0.047 - 0.07

3-2. Performances du système de chauffe-eau solaire

Les expériences ont été réalisées de septembre 2014 à octobre 2016 à Yamoussoukro, capitale de la Côte d'Ivoire, située en Afrique subsaharienne entre le 5° et 11° de latitude nord. La latitude de la ville de Yamoussoukro est d'environ 6.58° N. L'énergie solaire annuelle reçue dans cette zone se situe entre 1650 et 1950 kWh / m² [18]. Une journée de ciel clair (8 / 10 / 2016) est choisie pour analyser les performances du chauffe-eau solaire utilisant la fibre de coco comme isolant thermique. L'irradiation journalière du jour est de 5033 Wh / m².j. La **Figure 4** montre les courbes du flux solaire incident, de l'énergie utile et de la température de l'air ambiant pendant cette journée. Le flux solaire incident maximal et l'énergie utile maximale étaient de 1215 W / m² et 921 W / m², respectivement. La différence entre le flux solaire incident et l'énergie utile représente la perte thermique du collecteur. Pendant l'expérience, la température ambiante minimale enregistrée était de 20,3°C et la température ambiante maximale enregistrée était de 39,4 ° C à 15 h 40. Ces

résultats sont en accord parfait avec ceux de [19 - 22]. La **Figure 5** montre les variations journalières de la température du fluide caloporteur à l'entrée de l'échangeur de chaleur (T_{f3}), de la température de l'eau à l'entrée du réservoir de stockage (T_{w1}) et celle de l'eau à la sortie du réservoir (T_{w2}). On note une augmentation de la température à l'entrée de l'échangeur de chaleur qui atteint sa valeur maximale à 14 h 20 puis diminue avec la baisse du rayonnement solaire comme le montre la **Figure 5**. La valeur maximale de la température à l'entrée de l'échangeur de chaleur est de 66°C . La différence entre la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur de chaleur et la température ambiante est de $26,6^{\circ}\text{C}$, alors qu'elle est de 23°C à ces mêmes points dans les travaux de [23] pour le même type de journée et d'ensoleillement. Il est noté, en outre, que la température de l'eau à la sortie du réservoir de stockage augmente régulièrement pour atteindre une valeur maximale de $52,5^{\circ}\text{C}$ à 16 heures tandis que les résultats de [24] indiquent seulement un pic de $38,5^{\circ}\text{C}$. Des résultats similaires sont rapportés par [23]. Ce résultat est semblable à ceux de [22] qui utilisent un échangeur de chaleur enroulé dans leur système. La différence de température maximale entre le haut et le bas du réservoir est de $16,2^{\circ}\text{C}$. Ce résultat est supérieur à ceux de [25] qui utilisaient des échangeurs de chaleur sous forme de bobine immergés et placés sur toute la longueur à l'intérieur du réservoir de stockage. Le coefficient d'échange thermique de l'échangeur de chaleur, U_e , est déterminé en utilisant l'**Équation (2)**. Le coefficient d'échange thermique de l'échangeur de chaleur est estimé à $151,8 \text{ W} / \text{m}^2.\text{K}$. Ces résultats concordent avec ceux de la littérature. Selon [26], le transfert de chaleur se faisant par convection naturelle dans le circuit primaire et dans le circuit secondaire, le coefficient de transfert est de l'ordre de $150 \text{ W} / \text{m}^2.\text{K}$.

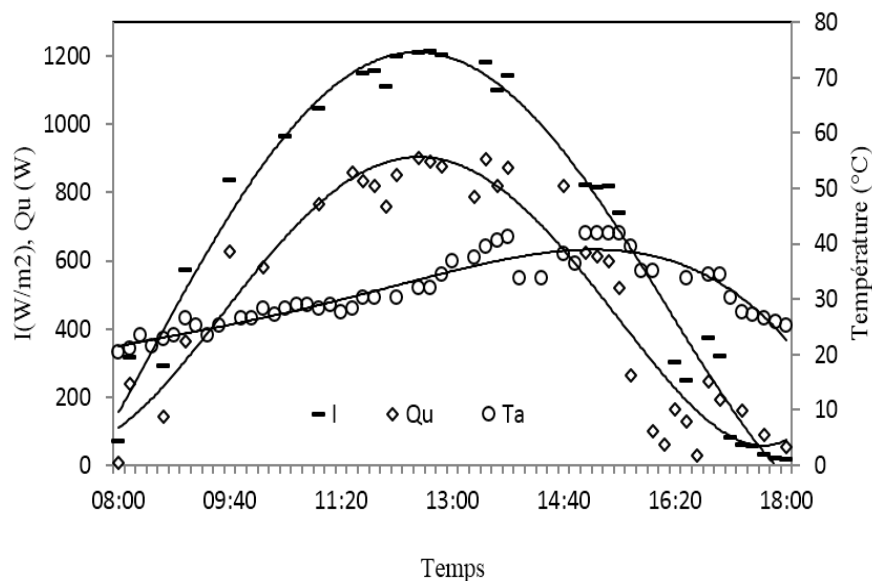


Figure 4 : Variation de l'intensité du rayonnement solaire, du gain d'énergie utile et de la température ambiante en fonction du temps

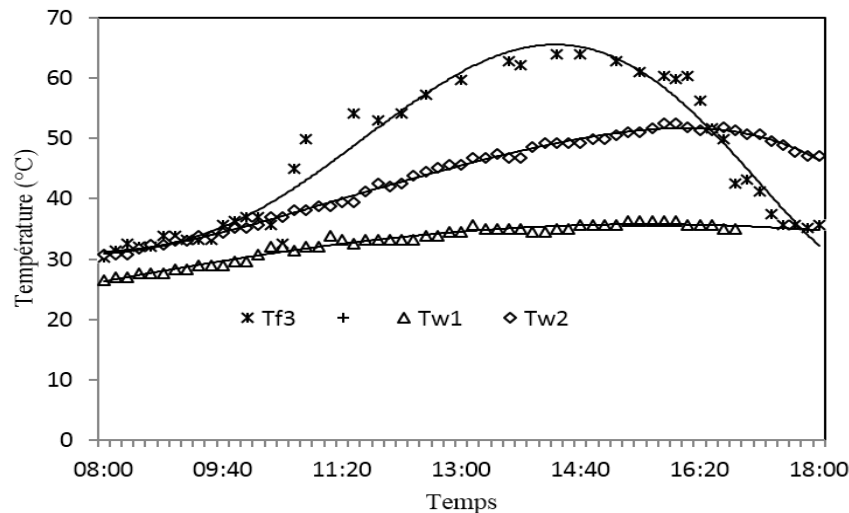


Figure 5 : *Variation de la température à l'entrée de l'échangeur de chaleur et de la température à l'entrée et à la sortie du réservoir d'eau en fonction du temps*

La **Figure 6** montre la variation de l'efficacité de l'échangeur de chaleur avec le temps. Cette efficacité varie avec le temps, augmentant et diminuant rapidement à mesure que la température de l'eau du capteur solaire augmente et diminue en début et en fin de journée, respectivement.

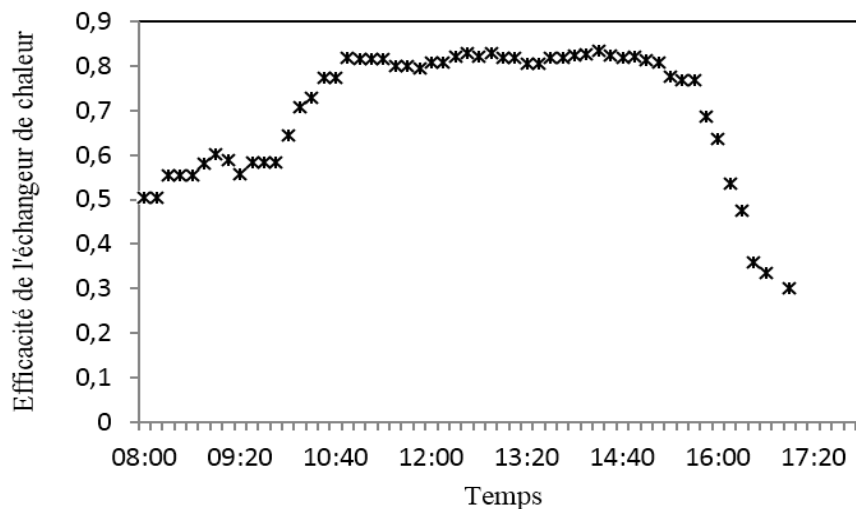


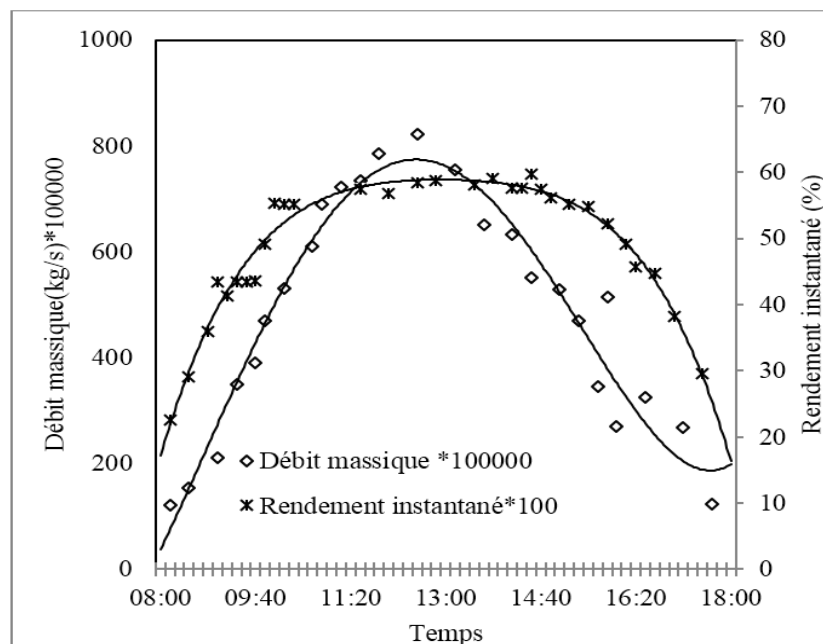
Figure 6 : *Efficacité de l'échangeur de chaleur en fonction du temps*

L'efficacité quotidienne moyenne de l'échangeur de chaleur est de 70,40 %. [26] qui a fait son étude avec un échangeur de chaleur bobine immergé a montré qu'un bon échangeur de chaleur doit avoir une efficacité supérieure à 50 %. [27], qui ont également utilisé dans leurs travaux un échangeur de chaleur immergé, ont montré après 1 h de mesure que le rendement de l'échangeur de chaleur utilisé est compris entre 61 % et 68 % avec une moyenne de 65,1 %. L'efficacité journalière moyenne (η_d) du chauffe-eau solaire étudié est de 41,1 %. Le **Tableau 4** compare cette valeur à celles obtenues dans la littérature par d'autres auteurs concernant les systèmes avec des collecteurs constitués d'un absorbeur de surface sélective et ayant des dimensions similaires à la nôtre, pour une journée ensoleillée. Les résultats expérimentaux montrent que l'efficacité journalière moyenne de chauffe-eau solaire est acceptable. Tous les chauffe-eaux solaires avec lesquels des comparaisons sont faites, sont tous isolés avec des fibres synthétiques obtenues industriellement.

Tableau 4 : Différents résultats d'efficacité quotidienne moyenne pour une journée ensoleillée

Système plan sans échangeur de chaleur [28]	Système utilisant un échangeur de chaleur annulaire immergé [27]	Notre étude (avec fibre de coco)	Système de capteur solaire tubulaire sous vide [27]
57	50,28	41,10	48,16

La **Figure 7** présente la variation du rendement instantané et du débit massique du fluide caloporteur avec le temps. Le débit massique du fluide caloporteur augmente graduellement avec le flux solaire incident pour atteindre son maximum en milieu de journée (0,0078 kg / s à 12 h 00 mn) et commence ensuite à décroître progressivement dans l'après midi et ce, jusqu'à la tombée de la nuit. Les résultats obtenus sont intéressants comparativement à ceux de [19]. Le rendement instantané du capteur solaire qui est le ratio de l'énergie interne par le flux thermique suit la même tendance que le flux solaire et l'énergie utile. Il augmente jusqu'en milieu de journée et ensuite commence à décroître comme le montre la **Figure 7**. Le rendement maximal est obtenu à 13 h 10 mn temps solaire vrai pour une valeur de 58,7 %. Nos résultats sont en parfait accord avec ceux de [29, 30]

**Figure 7 : Débit massique et rendement instantané du capteur solaire en fonction du temps**

3-3. Coût de l'isolation thermique utilisée dans le système de chauffe-eau solaire

En Côte d'Ivoire, la bourre de coco est disponible en grande quantité. C'est un déchet qui pose des problèmes environnementaux. La présente étude a consisté à recycler ces déchets en les développant. Ce recyclage a été réalisé en trois étapes : (1) collecte de la bourre, (2) broyage de la bourre, (3) extraction et séchage de la fibre obtenue au soleil. Toutes ces opérations coûtent environ 17 \$ [29]. Cependant, la laine de verre, utilisée comme isolant thermique dans une de nos études [31], a été importée de France et a coûté environ (frais de transport inclus) 220 \$. L'utilisation de matériaux locaux comme isolant conduit donc à une réduction substantielle du coût initial du dispositif solaire. Ceci est en accord avec les conclusions des travaux de [32] qui ont étudié l'influence de l'isolation thermique sur la performance du chauffe-eau solaire. Afin de réduire le coût du dispositif solaire, ils ont utilisé des matériaux locaux comme isolant thermique

4. Conclusion

Les valeurs expérimentales de la conductivité thermique sont comprises entre 0,0703 et 0,0777 W / mK. Par conséquent, la fibre de coco est un excellent isolant thermique pour le chauffe-eau solaire. Le chauffe-eau solaire, conçu et réalisé comprend un échangeur de chaleur immergé placé en diagonale dans le réservoir de stockage et utilise de la fibre de coco comme isolant thermique. L'irradiation quotidienne du jour choisi est de 5033 Wh / m² / jour. Le rayonnement solaire quotidien maximal et le gain d'énergie utile ont été de 1215 W / m² et 921 W / m² respectivement à 12 h 30. Le coefficient d'échange thermique de l'échangeur de chaleur est estimé à 151,8 W / m² K quand l'efficacité moyenne de l'échangeur de chaleur quotidien est de 70,40 %. L'efficacité quotidienne moyenne du chauffe-eau solaire étudié est de 41,1 %. D'après les résultats de cette étude, on peut dire que la fibre de noix coco est une option respectueuse de l'environnement et durable pour être utilisée comme isolant thermique dans un système de chauffe-eau solaire.

Références

- [1] - X. T. NGUYEN, S. H., T. LIU and X. HAN, "A potential natural energy absorption material - Coconut mesocarp : Part A : Experimental investigations on mechanical properties", *Int. J. Mech. Sci.*, 115 - 116 (2016) 564 - 573
- [2] - C.-L. HWANG, V.-A. TRAN, J.-W. HONG and Y.-C. HSIEH, "Effects of short coconut fiber on the mechanical properties, plastic cracking behavior, and impact resistance of cementitious composites", *Construction and Building Materials*, 127 (2016) 984 - 992
- [3] - J. G. OHLER, "The coconut palm and its environment", in : J. G. Ohler (Ed.), *Modern Coconut Management-Palm Cultivation and Products*, FAO and Intermediate Technology Publications Ltd., London, (1999) 112 - 156
- [4] - A. SANGARE, E. KOFFI, F. AKAMOU and C. A. FALL, "État des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture", *Second rapport national*, (Octobre 2009)
- [5] - M. BRAHMAKUMAR, C. PAVITHRAN and R. M. PILAI, "Coconut fibre reinforced polyethylene composites : effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre / matrix interfacial bonding and strength of composites", *Compos. Sci. Technol.*, 65 (2005) 563 - 569
- [6] - J. KHEDARI, P. WATSANASATHAPORN and J. HIRUNLABH, "Development of fibre-based soil - cement block with low thermal conductivity", *CemConcr Compos.*, 27 (2005) 111 - 116
- [7] - R. SHUKLA, K. SUMATHY, P. ERICKSON and J. GONG, "Recent advances in the solar water heating systems : A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19 (2013) 173 - 190
- [8] - L. M. AYOMPE, A. DUFFY, M. MCKEEVER, M. CONLON and S. J. MCCORMACK, "Comparative field performance study of flat plate and heat pipe evacuated tube collectors (ETCs) for domestic water heating systems in a temperate climate", *Energy*, 36 (2011) 3370 - 3378
- [9] - A. ORDAZ-FLORES, O. GARCIA-VALLADARES and V. H. GOMEZ, "Findings to improve the performance of a two-phase flat plate solar system, using acetone and methanol as working fluids", *Sol. Energy*, 86 (2012) 1089 - 1098
- [10] - S. PANYAKAEW and S. FOTIOS "New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse" *Energy and Buildings*, 43 (2011) 1732 - 1739
- [11] - Technical Association of Pulp and Paper Industry, TAPPI Standard Test Method : Fibrous Materials and Pulp Testing T 1-200 Series, TAPPI, New York, (1998)
- [12] - R. ALAVEZ-RAMIREZ, F. CHINAS-CASTILLO, V. J. MORALES-DOMINGUEZ and M. ORTIZ-GUZMAN, "Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels", *Construction and Building Materials*, 37 (2012) 425 - 431

- [13] - P. M. E. KOFFI, B. K. KOUA, P. GBAHA and S. TOURÉ, "Thermal performance of a solar water heater with internal exchanger using thermosiphon system in Côte d'Ivoire", *Energy*, 64 (2014) 187 - 199
- [14] - J. A. DUFFIE and W. A. BECKMAN, "Solar Engineering of Thermal Processes" *Third ed.* Wiley, New York, (2006)
- [15] - A. SYED, M. IZQUIERDO, P. RODRIGUEZ, G. MAIDMENT, J. MISSENDEN, A. LECUONA, R. A. TOZER, "Novel experimental investigation of a solar cooling system in Madrid", *Inter. J. Refrig.*, 28 (2005) 859 - 871
- [16] - S. A. MOHAMMAD, "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials", *Building and Environment*, 40 (3) (2005) 353 - 366
- [17] - X. Y. ZHOU, F. ZHENG, H.-G. LI, C.-L. LU, "An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers", *Energy and Buildings*, 42 (2010) 1070 - 1074
- [18] - C. A. CRUICKSHANK, S. J. HARRISON, "Investigation of reverse thermosiphoning in an indirect SDHW system". *Journal of Solar Energy Engineering*, Transactions of the ASME, 133 (1) (2011). art. N°. 011001
- [19] - P. GBAHA, T. R. ORI, H. Y. ANDOH, P. M. E KOFFI, K. KONAN and J. K. SARAKA, "Thermal and economical study of two solar water heaters : the one using glass wool and the other vegetable fiber as thermal insulator", *Indian J. Sci. Technol.*, Vol. 4, N° 7 (July 2011)
- [20] - Y. HANG, M. QU and F. ZHAO, "Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States", *Energy and Buildings*, 45 (2012) 181 - 188
- [21] - A. SAKHRIEH and A. AL-GHANDOOR, "Experimental investigation of the performance of five types of solar collectors", *Energy Convers. Manage.*, 65 (2013) 715 - 720
- [22] - L. M. AYOMPE and A. DUFFY, "Thermal performance analysis of a solar water heating system with heat pipe evacuated tube collector using data from a field trial", *Solar Energy*, 90 (2013) 17 - 28
- [23] - H. M. S. HUSSEIN, "Transient investigation of a two phase closed thermosiphon flat plate solar water heater", *Energy Convers. Manage.*, 43 (2002) 2479 - 2492
- [24] - M. N. BARGACH, R. TADILI and M. BOUKALLOUCH, "Survey of thermal performances of a solar system used for the heating of agricultural greenhouses in Morocco", *Renew. Energy*, 20 (2000) 415 - 433
- [25] - H. I. ABU-MULAWEH, "Design and performance of a thermosiphon heat recovery system". *Applied Thermal Engineering*, 26 (2006) 471 - 477
- [26] - C. A. ROULET, "Chauffe-eau solaires", Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, (1988)
- [27] - J. F. HALTIWANGER, H. J. DAVIDSON, "Discharge of a thermal storage tank using an immersed heat exchanger with an annular baffle", *Sol. Energy*, 83 (2009) 193 - 201
- [28] - A. A. KARAGHOULI and W. E. ALNASER, "Experimental study on thermosiphon solar water heater in Bahrain". *Renew. Energy*, 24 (2001) 389 - 396
- [29] - J. HUANG, S. PU, W. GAO, Y. QUE, "Experimental investigation on thermal performance of thermosiphon flat-plate solar water heater with a mantle heat exchanger", *Energy*, 35 (2010) 3563 - 3568
- [30] - T. S. GE, Y. J. DAI, Y. LI, R. Z. WANG, "Simulation investigation on solar powered desiccant coated heat exchanger cooling system", *Applied Energy*, 93 (2012) 532 - 540
- [31] - P. M. E. KOFFI, "Conception et réalisation d'un chauffe eau solaire thermosiphon. Etude comparative d'un isolant classique et d'un isolant à fibre végétale. Thèse, Institut National Polytechnique Houphouët Boigny Yamoussoukro-Côte d'Ivoire, (2008) 115 p.
- [32] - A. K. AREMU and R. AKINOSO, "Effect of Insulating Materials on Performance of Solar Heater", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8 (2) (2013) 64 - 68