

DETERMINATION EXPERIMENTALE ET APPROCHES SIMPLIFIEES DE MODELISATION DES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES DU BOIS BORASSUS (PALMIER RONIER)

EXPERIMENTAL DETERMINATION AND SIMPLIFIED MODELING APPROACHES THERMO-PHYSICAL PROPERTIES OF WOOD BORASSUS (PALMYRA PALM)

AHOUANNOU C.^{*1}, VODOUNNOU E.¹, AGOUA E.³, SANYA E. A.¹,
GBAGUIDI V.¹, JANNOT Y.², VIANOU A.³

1- Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquées (LEMA),
Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi (UAC),
01BP : 2009 Cotonou.

2- Laboratoire d'Energétique et Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA),
UMR 7563, 2, Avenue de la forêt de Haye 54504 Vandoeuvre, France.

3- Laboratoire de Caractérisation Thermophysique des Matériaux et d'Appropriation
Energétique, Université d'Abomey-Calavi (UAC), 01BP : 2009 Cotonou.

Correspondance (*) : ahouannou_clem@yahoo.fr, Tél. 97603323 / 90901785

(Reçu le 18 Janvier 2014 ; Révisé le 11 Mai 2014 ; Accepté le 10 Juin 2014)

RESUME

Le présent article donne les résultats de recherche d'une étude expérimentale sur les propriétés thermiques du bois Borassus Aëthiopum (palmier rônier) exploité au Bénin. Les propriétés telles que la masse volumique, la chaleur massique spécifique et la diffusivité thermique ont été mesurées et ont permis d'estimer la conductivité et l'effusivité thermiques de l'espèce de bois. La méthode dite du régime régulier est utilisée pour la mesure de la diffusivité (a) ; tandis que les valeurs de la conductivité thermique (λ) et l'effusivité thermiques (E) sont déduites dans les trois directions à partir de corrélations théoriques. Les résultats des essais par la méthode du régime régulier ont donné les valeurs moyennes respectives de la diffusivité thermique, suivant les axes (o, x) , (o, y) et (o, z) : $2,54 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $1,97 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $1,80 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Quant à la conductivité et l'effusivité thermiques, les valeurs calculées sont respectivement de $0,34 \text{ W/m.K}$, et $682,01 \text{ J.m}^2.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$; $0,27 \text{ W/m.K}$ et $600,63 \text{ J.m}^2.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$; et de $0,24 \text{ W/m.K}$ et $557,95 \text{ J.m}^2.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$. Les caractéristiques thermiques, physiques voire mécaniques de l'espèce de bois étudiée et la durabilité du matériau dans les constructions traditionnelles à partir du Borassus permettent d'envisager son utilisation comme armature dans le béton.

Mots clés : Borassus Aëthiopum (palmier rônier), transfert de chaleur, propriétés physiques, conductivité, diffusivité.

ABSTRACT

This paper presents research results of an experimental study on the thermal properties of wood aethiopum Borassus (Palmyra palm) operated in Benin. Properties such as density, specific heat capacity and thermal diffusivity were measured and were used to estimate the conductivity and thermal effusivity of wood species. The so-called steady state method is used to measure the diffusivity (a); while the values of the thermal conductivity (λ) and thermal effusivity (E) are deduced in three directions from theoretical correlations. Test results by the method of the steady state gave the

respective mean values of the thermal diffusivity according to the axes (o, x), (o, y) and (o, z) : $2.54 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.97 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ $1.80 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. As for conductivity and thermal effusivity, the calculated values are respectively 0.34 W/m.K , and $682.01 \text{ J.m}^2.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$; 0.27 W/m.K and $600.63 \text{ J.m}^2.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$; 0.24 W/m.K and $557.95 \text{ J.m}^2.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$. Thermal or mechanical and physical characteristics of the wood species studied and the sustainability of Borassus material in traditional constructions possible to envisage its use as reinforcement in concrete.

Keywords: Borassus Aethiopum (palm rônier), transfer of heat, physical properties, conductivity, diffusivity.

NOMENCLATURE

a :	Diffusivité thermique, (m^2/s)
c :	Chaleur massique, ($\text{J}/\text{kg.K}$)
E :	Effusivité thermique, ($\text{J}/\text{m}^2.\text{K}.\text{s}^{1/2}$)
M :	Pente de la droite de régression, (s^{-1})
R :	Rayon, (mètre)
K :	Température, (Kelvin)
T :	Temps, (secondes)
V :	Volume, (m^3)
X :	Teneur en eau, (%)

Lettres grecques

λ :	Conductivité thermique, ($\text{W}/\text{m.K}$)
Θ :	Pulsation, (radian/s)
Φ :	Température réduite
ϕ :	Flux de chaleur, (w)
	Densité de flux thermique, (W/m^2)

Indices

F_{o1}	Nombre de Fourier
$h_{\eta=x,y,z}$:	Coefficient d'échange thermo convectif suivant x, y, z
Bi :	Nombre de Biot
ΔT :	Différence de température Kelvin
$\lambda_{\eta=x,y,z}$:	Conductivité thermique, suivant x, y, z , (W/mK)
$a_{\eta=x,y,z}$:	Diffusivité thermique, suivant x, y, z , (m^2/s)
$e_{\eta=x,y,z}$:	Moitié de l'épaisseur de l'échantillon, (m)

1. INTRODUCTION

Le palmier rônier de son nom scientifique « *Borassus* » est une essence végétale qui comprend neuf espèces natives des régions tropicales d'Afrique sahélienne et sub-saharienne, d'Asie et de Nouvelle-Guinée (DIALLO, 1987). Nous pouvons énumérer en exemple : le *Borassus aethiopicum*, *akeassii*, *deleb*, *dichotomus*, *heineana*, *flabellifer*, *madagascariensis*, *sambiranensis*, *sundaica* et *tunicata*. En Afrique sub-saharienne, les espèces couramment rencontrées sont le *Borassus aethiopicum*, *flabellifer* et *Akeassii* (AKE et GUINKO, 1996). Il ressort de l'avis des spécialistes botanistes que le palmier rônier est une source de vie (CHEVALLIER, 1930). D'après HOUANKOU (2004), le *Borassus* présente une importance économique et écologique dont les incidences contribuent à la satisfaction des besoins des peuples ; c'est une espèce végétale à usages multiples dont l'importance varie selon les pays et les cultures. L'expérience a prouvé que toutes les parties de l'arbre sont utiles (WASSI, 2004). C'est un arbre qui possède alors plusieurs vertus : les racines servent pour un usage médicinal (anti-asthmatique) ; avec les nervures pétioles, on fabrique des cordes ; les feuilles sont utilisées comme couvertures des cases ; le bourgeon terminal des plants de 3 ou 4 ans forme un chou palmiste excellent, très tendre, que l'on mange cru ou cuit ; la résine de l'arbre coupé est une sorte de gomme brun foncé qui sert de médicament ; les fruits avant qu'ils ne soient mûrs sont comestibles sous forme de gelée. Lorsque le fruit est mûr, sa pulpe est mangée en période de disette ; la sève donne un excellent vin de palme, très apprécié des ivoiriens et des sénégalais, Il est une ressource renouvelable qui produit un bois de service imputrescible, résistant aux termites, avec un faible taux d'absorption des fibres. Il est utilisé souvent sous forme de chevron pour réaliser les charpentes des maisons à usage d'habitation par les populations rurales, et même des villes. Des chercheurs se sont intéressés à l'étude des aspects historiques et socioculturels de l'essence sur certains peuples (DIALLO et SOW, 1998). En Côte d'Ivoire et

au Sénégal, par exemple, les agronomes s'intéressent actuellement au développement de la culture du *Borassus Aethiopicum* afin d'aboutir à des espèces dont la durée de plantation serait réduite. Beaucoup d'autres travaux ont également abordé les études sur les propriétés mécaniques et ergonomiques, et ont confirmé que le *borassus aethiopicum* possède une contrainte de rupture et un module d'élasticité élevés proche de ceux de l'acier avec un taux de retrait longitudinal presque nul (GBAGUIDI *et al.*, 2011). Pour contribuer à la connaissance parfaite de cette espèce végétale, nous avons entrepris des travaux de recherche sur les propriétés thermo-physiques du *borassus aethiopicum* exploité au Bénin. Cette initiative permettra d'apprécier le comportement de l'espèce bois sous l'effet de la chaleur, afin de confirmer son utilisation comme armature dans le béton et d'envisager également son usage pour des applications de confort thermique (isolation thermique), surtout dans la construction des bâtiments modernes (MEUKAM *et al.*, 2004). Une approche de modélisation simplifiée du coefficient de diffusivité a été abordée au regard des résultats expérimentaux obtenus pour le bois *Borassus*, grâce à la méthode dite de régime régulier. La démarche utilisée a permis en outre de déduire les caractéristiques telles que l'effusivité et la conductivité thermiques pour ce matériaux.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Matériels

2.1.1. Eprouvettes-échantillons de *Borassus Aethiopicum* et de polyméthacrylate de méthyle (Plexiglas)

Les échantillons de *Borassus* testés pendant cette étude sont prélevés dans un arbre du *Borassus Aethiopicum* sélectionné dans la ville de Cotonou au sud du Bénin et ayant atteint la maturité (âge > 25 ans). Le prélèvement des éprouvettes-échantillons a été fait dans le tronc de l'arbre dont le bois est dur, solide et durable, de couleur brun foncé qui tire légèrement sur du noir. Le caractère anisotrope du bois a été éprouvé lors de la détermination de la diffusivité thermique du matériau étudié. Trois

épreuves-échantillons de dimensions: $1\text{mm}^3 \times 70 \times 60 \times 30$ (1) ; $1\text{mm}^3 \times 70 \times 30 \times 30$ (2) et $1\text{mm}^3 \times 70 \times 60 \times 15$ (3), sont confectionnés respectivement dans les trois directions axiale, radiale et tangentielle, (Figure 1).



Figure 1 : Epreuves-échantillons pour la mesure de la diffusivité thermique.

Quant à l'échantillon de Plexiglas de $1\text{mm}^3 \times 20 \times 20$, il est de type polyméthacrylate de méthyle de masse volumique égale à 1185 kg/m^3 .

2.1.2. Etuve ventilée, balance électronique et bombe calorimétrique

- Une étuve ventilée, de marque MEMMERT D 06060 ayant une plage de températures de 30 à 225°C et d'un registre de ventilation calibré de 0 à 6 , a été utilisée pour déterminer la masse anhydre des échantillons, afin de déduire la teneur en eau moyenne des échantillons pendant les essais.

- La mesure de la chaleur spécifique a été réalisée par un calorimètre μSc Evolution de SETRAM. Lors de la mesure, on a enregistré une montée de température de 15 à 25°C avec une vitesse de $0,5^\circ\text{C}.\text{mn}^{-1}$. Les données utilisées pendant la mesure sont : Chaleur

($14,319 \text{ J/g}$) ; Température ($15,27$ à $25,38^\circ\text{C}$) et temps ($28,1$ à $66,5 \text{ min}$). Le sommet du pic a été obtenu à $24,22^\circ\text{C}$ après $50,28 \text{ min}$ et la hauteur du pic est de $-3,146 \text{ (mW)}$, traduisant un Onset de $15,273^\circ\text{C}$ après $31,149 \text{ min}$ et un Offset de $25,427^\circ\text{C}$ après $54,672 \text{ min}$, de type de LdB : Linéaire.

- Une balance électronique de marque SARTORIUS BP 3100S - norme ISO 9001, avec une charge maximale de $3100 \text{ g} \pm 1\%$ a été utilisée pour faire la mesure de la masse des échantillons avant et après les essais thermiques.

2.1.3. Dispositif expérimental de mesure de la diffusivité thermique par la méthode du régime régulier

Il est constitué d'un vase métallique de forme parallélépipédique, logé dans une caisse en contreplaqué et isolé thermiquement sur toutes ses faces par du polystyrène expansé. Il contient un bain thermostaté produit au moyen d'un cryothermostat compact de type LAUDA. La température de consigne est fixée à 50°C et maintenue jusqu'à la fin des manipulations. L'eau est agitée constamment à l'aide d'un agitateur à hélice intégré au système. Compte tenu de la quantité d'eau à chauffer, une pompe électrique de puissance $750\text{W}/220\text{V}$ est montée également dans le dispositif. L'ensemble agitateur et pompe permet de répartir de façon uniforme le flux de chaleur produit par le cryothermostat et d'augmenter par conséquent le coefficient d'échange thermo-convectif entre le bain et les surfaces d'échange de l'éprouvette-échantillon testé (Figure 2).

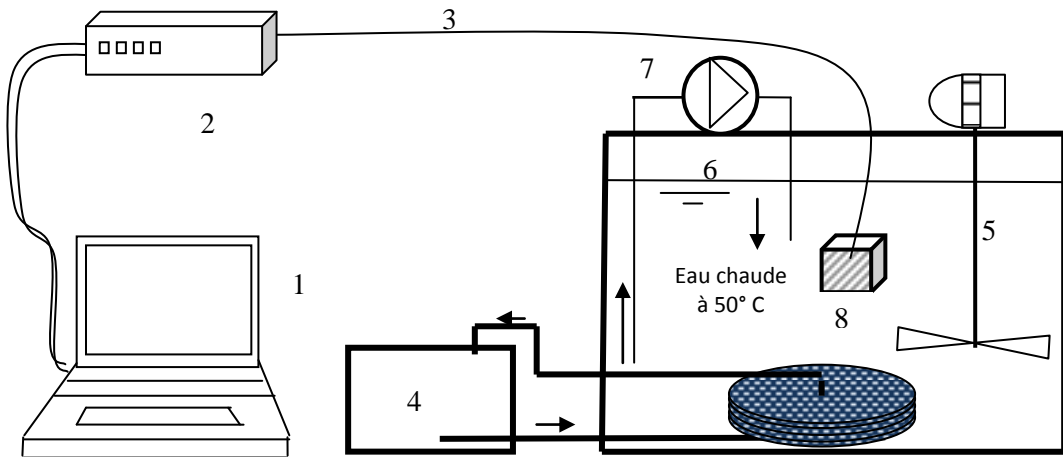


Figure 2 : Schéma du dispositif expérimental par la méthode du régime régulier

- | | | | |
|---|------------------|---|------------------------|
| 1 | Micro-ordinateur | 2 | Centrale d'acquisition |
| 3 | Thermocouple | 4 | Cryostat |
| 5 | Agitateur | 6 | Bain thermostaté |
| 7 | Pompe de reprise | 8 | Eprouvette-échantillon |

2.2. Méthode du régime régulier

2.2.1. Principe

La méthode du bloc isotherme encore appelée méthode du régime régulier s'appuie sur la connaissance du champ thermique en régime variable d'une éprouvette de matériau soumise à une sollicitation thermique sur ses six (6) faces, (VIANOU et GIRARDEY, 1991). Une éprouvette de forme parallélépipédique de dimensions $(2e_x, 2e_y, 2e_z)$ réalisée avec le bois de Borassus et initialement à la température uniforme T_{e_0} (Figure 2), est plongée dans un bain thermostaté brassé et homogénéisée à l'aide d'une pompe électrique, à température T_f , tel que le coefficient d'échange thermo-convectif entre le bain et les surfaces d'échange de l'échantillon soit suffisamment élevé, de façon à obtenir un nombre de Biot supérieur ou égal à 100.

2.2.2. Détermination de la diffusivité thermique

Pour déterminer la diffusivité thermique du matériau, on exploite le thermogramme chronologique local au centre de l'éprouvette en s'appuyant sur une particularité de la solution analytique exacte du problème qui consiste à déterminer le coefficient directeur (m) de la droite de régression dans la zone de linéarité du thermogramme (ALLOGNON, 2005 ; DJOSSOU, 2011). En effet, l'analyse de la courbe $f(t) = \ln(\Delta\theta)$ nous permet de délimiter une zone dite exploitable appelée zone de régime régulier, matérialisée par une borne inférieure de valeur ΔT égale à 1 et une borne supérieure de valeur égale à 22% de $(T_f - T_{e_0})$. Cette précaution amène à éviter des mesures tributaires de bruits parasites.

Généralement, dans le traitement des données, les valeurs de $\Delta\theta = \frac{(T_f - T_{ve})}{(T_f - T_{oe})} < 1$ sont toutes éliminées, afin d'avoir $\ln(\Delta\theta) \geq 0$.

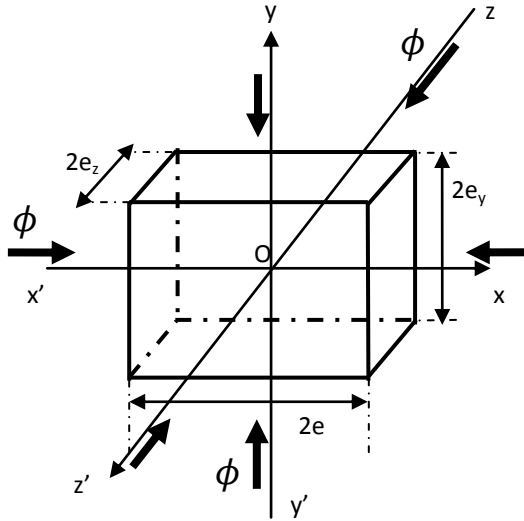


Figure 3 : Représentation physique du de l'échantillon de Borassus Aéthiopum pour la détermination du coefficient de diffusivité

A partir des équations ci-dessus, on peut déterminer analytiquement en un point quelconque de l'éprouvette le champ thermique en régime variable. La solution de ce problème est obtenue en s'appuyant sur la méthode de

séparation des variables et en appliquant le théorème de Von Neumann, (JANNOT, 2011a). Dans ce contexte nous avons fait les hypothèses ci-après :

- le transfert thermique se fait dans les trois directions $(\vec{ox}, \vec{oy}$ et $\vec{oz})$ et de façon symétrique ;
- le matériau étudié est homogène et anisotrope ;
- les échanges de chaleur entre le fluide et les surfaces de l'échantillon obéissent aux conditions du type Fourier ;
- qu'il n'y a pas de génération d'énergie à l'intérieur de l'échantillon ;
- l'écart de température est modéré et on peut écrire que les transferts de chaleur dans l'échantillon sont régis par l'équation générale ci-après :

$$\lambda_\eta \frac{\partial^2 T(\eta, t)}{\partial \eta^2} - \rho c \frac{\partial T(\eta, t)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

avec $\eta = x, y, z$

- les conditions initiales et aux limites sont :

$$T(\eta, 0) = T_0 \quad (2)$$

$$-\lambda_\eta \frac{\partial T(\eta, t)}{\partial \eta} + h_\eta [T(\eta, t) - T_f] = 0 \text{ en } \eta = \pm e_\eta \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(\eta, t)}{\partial \eta} = 0 \text{ en } \eta = 0 \quad (4)$$

Ainsi, la température réduite θ a pour expression

$$\theta = \frac{T(x, y, z, t) - T_f}{T_0 - T_f} = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{ijk} F_{ijk} \exp \left[- \left(n_{ix}^2 F_{0x} + n_{jy}^2 F_{0y} + n_{kz}^2 F_{0z} \right) \right] \quad (5)$$

avec :

$$A_{ijk} = \frac{2 \sin(n_{ix})}{[n_{ix} + \sin(n_{ix}) \cos(n_{ix})]} \cdot \frac{2 \sin(n_{jy})}{[n_{jy} + \sin(n_{jy}) \cos(n_{jy})]} \cdot \frac{2 \sin(n_{kz})}{[n_{kz} + \sin(n_{kz}) \cos(n_{kz})]} \quad (6)$$

$$F_{ijk} = \cos \left(n_{ix} \frac{x}{e_x} \right) \cdot \cos \left(n_{jy} \frac{y}{e_y} \right) \cdot \cos \left(n_{kz} \frac{z}{e_z} \right) \quad (7)$$

$$F_{0\eta} = \frac{a_\eta t}{e_\eta^2} \quad (8)$$

$n_{i\eta}$: racine positive de rang i de l'équation transcendante.

$$\cot g(n_{i\eta}) = \frac{n_{i\eta}}{B_{i\eta}} \quad (9)$$

$B_{i\eta}$: nombres de Biot de rang i relatifs aux directions (o, η) ,

$$B_{i\eta} = \frac{h_{\eta} e_{\eta}}{\lambda_{\eta}} \quad (10)$$

Dans le cas où les nombres de Biot ($B_{i\eta}$) sont assez élevés, en particulier quand $B_{i\eta} \geq 100$, $n_{i\eta}$ devient pratiquement constant et peut être remplacé avec une précision suffisante par $\frac{\pi}{2} = 1,57$. Pour des temps supérieurs au temps de démarrage du régime régulier, c'est-à-dire des temps définissant des nombres de Fourier élevés ($F_o \geq 0.23$), la série de l'équation (10) devient rapidement convergente et peut être remplacée par son premier terme avec une précision suffisante, mieux que 1%. Alors l'expression (5) peut être simplifiée:

$$\theta = A_{111} F_{111} \exp(-mt) \quad (11)$$

Et

$$m = \left(\frac{n_{1x}^2 a_x}{e_x^2} + \frac{n_{1y}^2 a_y}{e_y^2} + \frac{n_{1z}^2 a_z}{e_z^2} \right) \quad (12) \text{ avec les } a_{\eta} : \text{diffusivités thermiques associées aux conductivités thermiques.} \quad (12)$$

De l'équation (11), on déduit la relation : $\ln \theta = mt + C^{te}$ (13)

De même, à partir de l'expression (13), la valeur du paramètre (m) peut être déduite des résultats expérimentaux par la relation :

$$m = \frac{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}{t_2 - t_1} \quad (14)$$

Dans la pratique, la valeur m est égale à la valeur absolue de la pente de droite obtenue par une régression linéaire issue des points expérimentaux, dans la zone du régime régulier. En conclusion, l'expression de la diffusivité thermique $a_{(x,y,z)}$, pour le cas où les dimensions de l'éprouvette sont $(2e_x, 2e_y, 2e_z)$ sur l'axe (o, x) ; $(2e_x, 2e_y, e_z)$ sur l'axe (o, y) et $(2e_x, 2e_y, 2e_z) = e_z$ sur l'axe (o, z) , est donnée par le système d'équations (15), ci-dessous :

$$\begin{cases} a_x = 0,1352 \cdot (5m_1 - m_2 - m_3) \cdot e_x^2 \\ a_y = 0,1352 \cdot (m_2 - m_1) \cdot e_y^2 \\ a_z = 0,1352 \cdot (m_3 - m_1) \cdot e_z^2 \end{cases} \quad (15)$$

Les valeurs de m_1 , m_2 et m_3 représentent la valeur du paramètre m calculée à partir de la régression linéaire effectuée sur les mesures expérimentales acquises pour une éprouvette, suivant les axes \overline{OX} , \overline{OY} et \overline{OZ}

2.2.3. Calcul de la conductivité et de l'effusivité thermiques

- Conductivité thermique

La valeur de la conductivité thermique dans une direction quelconque η est donnée par la relation ci-après (DE PONTE et al., 2002) :

$$\lambda_{\eta} = \rho \cdot c \cdot a_{\eta} \text{ avec } \eta = x, y, z \quad (16)$$

- Effusivité thermique

L'effusivité thermique d'un matériau est liée à la diffusivité thermique ou à la conductivité thermique du matériau par les formules (KRAPEZ, 2004) :

$$E_{\eta} = \rho \cdot c \cdot \sqrt{a_{\eta}} = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda_{\eta}} \quad (17).$$

3. RESULTATS ET DISCUSSION

L'arbre de Borassus *Aéthiopum* utilisé a atteint la maturité (> 25 ans) et les échantillons prélevés ont permis de déterminer une masse volumique moyenne estimée à $\rho = 955 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, avec une teneur en eau moyenne de $14,50 \pm 1,40\%$ (b.s.). La mesure de la chaleur spécifique a été réalisée avec un calorimètre μdSc3 Evolution de SETRAM sur une masse d'échantillon de 300mg et la valeur obtenue est $c = 1417 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, (JANNOT, 2011b).

3.1. Diffusivité thermique

Nous présentons dans les figures 5 ci-dessous les thermogrammes expérimentaux et les résidus d'estimation issus des droites de régressions obtenues après traitement des points de mesures.

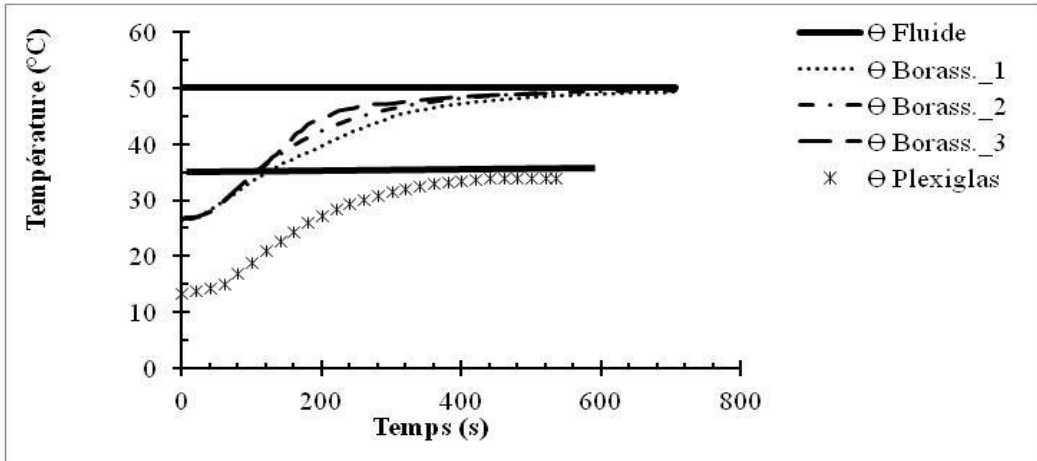


Figure 5.a : Thermogrammes obtenues après 480 secondes, pour la détermination de la diffusivité de quatre échantillons : le Plexiglas (01), le bois de Borassus Aéthiopum (03).

D'après les résultats des travaux de DJOSSOU *et al.* (2011): «influence de la teneur en eau sur la diffusivité thermique de la latérite stabilisée au ciment», nous envisageons dans les mêmes conditions expérimentales et hypothèses méthodologiques de l'approche de la méthode dite du régime régulier, de retenir les valeurs respectives suivantes :

- coefficient d'échange convectif (h) entre le fluide thermostaté et les échantillons d'éprouvettes ($1544 \text{ W.m}^2.\text{K}$).
- nombre de Biot (Bi) (104,91).

Cette considération nous a permis de déduire une valeur de la diffusivité du plexiglas testé égale à $0,115.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

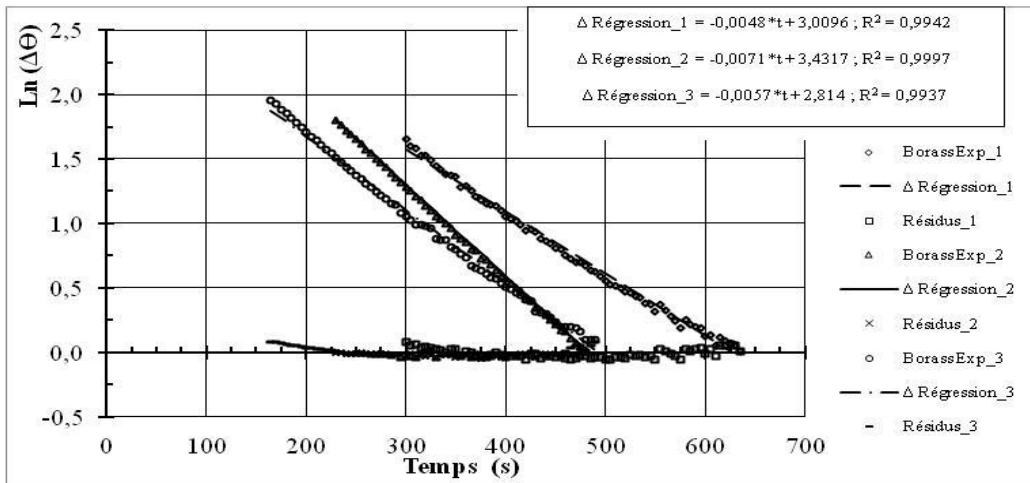


Figure 5.b : Points expérimentaux et droites de régression linéaire + résidus obtenus à partir du thermogramme des échantillons de Borassus Aéthiopum coupés suivant les trois directions (\vec{OX} , \vec{OY} et \vec{OZ}) et de dimensions respectives ($70 \times 60 \times 30 \text{ cm}^3$), ($70 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$) et ($70 \times 60 \times 15 \text{ cm}^3$), par la méthode du régime régulier à $H = 15,51\%$, $T_0 = 27^\circ\text{C}$, $T_f = 50^\circ\text{C}$.

Détermination expérimentale et approches simplifiées de modélisation des propriétés thermo-physiques du bois Borassus (palmier rônier).

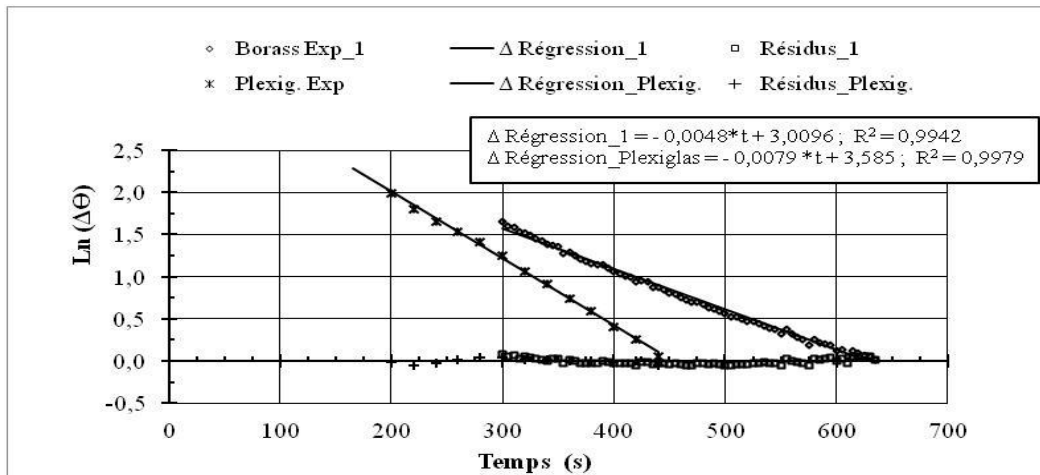


Figure 5.c : Comparaison de deux droites de régression linéaire issues des thermogrammes d'un échantillon de Borassus Aéthiopum de dimension (70 x 60 x 30 mm³) coupé suivant la direction axiale (\overline{OX}), et d'un échantillon de Plexiglas, matériau de référence de (20 x 20 x 20mm³), par la méthode du régime régulier ; respectivement à $T_0 = 27^\circ\text{C}$, $T_f = 50^\circ\text{C}$ et $T_0 = 13,4^\circ\text{C}$ et $T_f = 35^\circ\text{C}$

Le traitement des résultats déduits des thermogrammes chronologiques des échantillons testés et des droites de régression donnent les valeurs de la diffusivité thermique dans les directions principales. Ces valeurs obtenues expérimentalement confirment bien l'hypothèse de l'effet d'anisotropie du matériau évoqué dans la littérature et mentionnée dans les paragraphes antérieurs. La diffusivité thermique du matériau étudié est plus élevée dans la direction axiale, ce qui permet d'affirmer que la chaleur se propage plus vite

dans cette direction que dans les directions radiales et tangentielles.

Les résultats de recherche effectuée sur l'espèce de bois teck, par HOUNGAN et *al.* (2008) permettent de comparer les caractéristiques thermo-physiques du borassus à celles du teck, deux essences de bois tropicaux rencontrées en Afrique de l'Ouest, et dont le teck est en bonne position dans la catégorie des essences de bois industriellement cultivées et exportées.

Tableau I : Valeurs de diffusivité thermique du Borassus Aéthiopum.

Type du matériau	Directions de principales	Dimensions (mm)	Teneur en eau (%)	Diffusivité thermique $\text{ax}10^{-7}(\text{m}^2/\text{s})$	Ecart type
Borassus Aéthiopum	Axiale (o,x)	70 x 60 x 30	15,51	$a_x = 2,54$	0,930
	Radiale (o,y)	70 x 30 x 30	15,51	$a_y = 1,97$	0,104
	Tangentielle (o,z)	70 x 60 x 15	15,51	$a_z = 1,70$	0,105

Tableau II : Comparaison de la diffusivité thermique de deux essences de bois tropicaux (les bois Borassus Aéthiopum et Teck).

Type du matériau	Dimensions (mm)	Coefficient de corrélation	Diffusivité thermique ax $10^{-7}(m^2/s)$
Direction Axiale (o,x)			
Teck (13 % bs)	49,3 x 28,2x 21,5	0,996	$a_x = 5,7$
Borassus Aéthiopum	70 x 60 x 30	0,994	$a_x=2,54$
Direction radiale (o,y)			
Teck (14,9 % bs)	49,3 x 28,2 x 21,5	0,998	$a_y=1,7$
Borassus Aéthiopum	70 x 30 x 30	0,991	$a_y=1,97$
Direction tangentielle (o,z)			
Teck (14,3 % bs)	49,3 x 28,2 x 21,5	0,997	$a_z = 0,6$
Borassus Aéthiopum	70 x 60 x 15	0,990	$a_z = 1,70$

Ces deux essences de bois tropicaux exploitées dans les mêmes conditions expérimentales présentent des valeurs de diffusivité thermique relativement différentes dans les trois directions principales. Nous déduisons par conséquent que la chaleur traverse plus vite le bois de Teck dans la direction axiale que le Borassus Aéthiopum. Par contre dans les directions radiale et tangentielle, le Borassus Aéthiopum se laisse facilement traverser par la chaleur que le bois de Teck. En effet, Plus la diffusivité thermique est faible, plus le flux de chaleur mettra du temps à traverser une épaisseur donnée du matériau et plus le temps mis entre le moment où la chaleur parvient sur une facette du bloc considéré et le moment où ce flux atteindra l'autre facette opposée, est long (OSSENI, 2012). Ainsi, pour faire jouer à chacune de ces essences de bois le rôle d'une

paroi isolante, il convient de choisir la meilleure direction préférentielle. Dans la direction axiale par exemple le bois Borassus Aéthiopum pourrait mieux servir d'isolant ; par contre dans la direction tangentielle le bois teck offre une meilleure isolation.

3.2. Calcul de la conductivité et de l'effusivité thermiques

3.2.1. Conductivité thermique

La mesure de la chaleur spécifique du bois Borassus Aéthiopum a permis de calculer les conductivités thermiques dans les trois directions principales à partir de l'expression (16). Les résultats présentés dans le tableau III sont alors déduits des valeurs expérimentales de la diffusivité thermique.

Tableau III : Valeurs calculées de la conductivité thermique du Borassus Aéthiopum, suivant les trois directions principales

Type de matériau	Directions de principales	Dimensions (mm)	Teneur en eau (%)	Conductivité thermique (W/m.K)
Borassus Aéthiopum	Axiale (o,x)	70 x 60 x 30	15,51	$\lambda_x = 0,34$
	Radiale (o, y)	70 x 30 x 30	15,51	$\lambda_y = 0,27$
	Tangentielle (o, z)	70 x 60 x 15	15,51	$\lambda_z = 0,23$

Le tableau III présente les résultats de calcul pour la conductivité thermique du Borassus Aéthiopum. Ces valeurs obtenues montrent que le Borassus Aéthiopum laisse plus passer la chaleur dans la direction axiale (sens des fibres) que dans toutes autres directions.

L'analyse des résultats a permis de conclure que le Borassus ne peut pas servir d'isolant

thermique quelle que soit la direction de coupe ; car la valeur de sa conductivité thermique dans toutes les directions est supérieure à 0,1W/m.K. Lorsque nous rapprochons ces résultats de ceux du bois teck, nous pouvons conclure que le Borassus paraît plus isolant que le teck, quelque soit la direction de coupe choisie.

Tableau IV : Valeurs comparées des conductivités thermiques du Borassus Aéthiopum et du bois de Teck.

Type de matériau	Dimensions (mm)	Teneur en eau (%)	Conductivité thermique (W/m.K)
Direction axiale (o,x)			
Bois de Teck	80,9 x 60 x 44	13,0	$\lambda_x = 0,55$
Borassus Aéthiopum	70 x60 x30	13,56	$\lambda_x = 0,34$
Direction radiale (o,y)			
Bois de Teck	80,9 x 60 x 44	14,9	$\lambda_y = 0,28$
Borassus Aéthiopum	70 x35 x30	13,56	$\lambda_y = 0,27$
Direction tangentielle (o,z)			
Bois de Teck	80 x 60 x 44	14,3	$\lambda_z = 0,30$
Borassus Aéthiopum	70 x 60 x 30	13,6	$\lambda_z = 0,23$

3.2.2. Effusivité thermique

Elle est déduite de l'expression (17) et les valeurs trouvées suivant les trois directions sont reportées dans le tableau V ci-après :

Tableau V : Valeurs calculées de l'effusivité thermique du Borassus Aéthiopum, suivant les trois directions principales

Type du matériau	Directions de principales	Dimensions (mm)	Teneur en eau (%)	Effusivité thermique ($J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$)
Borassus Aéthiopum	Axiale (o,x)	70 x 60 x 30	15,51	$E_x = 682,01$
	Radiale (o,y)	70 x 30 x 30	15,51	$E_y = 600,63$
	Tangentielle (o,z)	70 x 60 x 15	15,51	$E_z = 557,95$

La valeur de l'effusivité thermique du Borassus Aethiopum déterminée au LEMTA, par la méthode du plan chaud centré sur un échantillon de dimension $44,5 \times 44,5 \times 5 \text{ mm}^3$, (JANNOT, 2011b), est de $555 \text{ J.m}^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$. Cette valeur mesurée diffère des valeurs respectives déduites par calcul lors de notre étude de moins de 22,8% ; 8,1% et 0,5%. Pour une erreur d'estimation de l'ordre de 10%, les résultats obtenus sont admissibles. La diffusivité thermique obtenue dans la direction tangentielle se rapproche au mieux de la valeur retenue au LEMTA.

4. CONCLUSION

Nous pouvons noter que ce travail n'est que le

début de la caractérisation thermique du bois Borassus Aéthiopum. Les résultats obtenus lors de nos recherches nous permettent d'affirmer que le Borassus Aéthiopum est un matériau anisotrope à l'instar des essences de bois tropicaux et qu'il ne pourrait pas être utilisé efficacement comme un isolant thermique. Les propriétés thermiques étudiées étant interdépendantes, nous pourrions conclure sans risque de nous tromper que le bois borassus présente une inertie thermique moyenne, c'est-à-dire une bonne aptitude à échanger thermiquement avec son environnement. Les valeurs obtenues pour ses paramètres caractéristiques le placent en bonne position par rapport à d'autres espèces de bois tropicaux, tel que le teck.

REMERCIEMENTS

Nous voudrions saisir cette occasion pour remercier toute l'équipe de recherche sur la caractérisation des matériaux isolants du Laboratoire d'Energétique et de Mécanique théorique et Appliquée (LEMTA/France), en particulier monsieur Yves JANNOT pour son assistance si précieuse dans la conduite des essais effectués sur le Borassus Aéthiopum.

6- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. AKE ASSI L., GUINKO S., 1996. "Confusion de deux taxons spécifiques ou subsécificiques au sein du genre Borassus en Afrique de l'Ouest". In : Maesen LJGvd, Burgt XMvd, Medenbach de Rooy JMv, Eds. *The biodiversity of African plants: proceedings 14th AETFAT congress. Wageningen: Kluwer Academic, 773-779.*

2. ALLOGNON E., 2005. "Méthode du champ thermique en régime stationnaire. Une méthode adaptée à la mesure de la conductivité thermique des matériaux de construction", *J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo), série E, 7 (2) : 175-184.*
3. BAL H. M., JANNOT Y., GAYE S., DEMEURIE F., 2013. 'Measurement and modelisation of the thermal conductivity of a wet composite porous medium : laterite based bricks with millet waste additive. *Construction and building materials, 41, 586-593.*
4. CHEVALLIER A., 1930. Le Borassus Aethiopum de l'Afrique Occidentale et son utilisation. *Revue Botanique Appliquée, X, 649-655.*
5. DE PONTE F. et KLARSFELD S., 2002. *Conductivité thermique des isolants, Techniques de l'Ingénieur, Doc. R 2 930.*
6. DIALLO A K DIOP I. et SOW M. B., 1998. Problématique de la gestion durable du rônier dans la sous-région Ouest-africaine. *Atelier technique sur le rônier en Rép. de Guinée, 105p.*
7. DIALLO M., 1987. Le comportement du rônier (Borassus Aethiopum, Mart.) dans les rôneraies paysannes des régions de Fatick et de Thiès au Sénégal. *Mémoire, 96p., Université de Laval (Québec), (M. Sc.).*
8. DJOSSOU A. A., HOUNGAN C. A., ANJORIN M. et VIANOU A., 2011. Influence de la teneur en eau sur la diffusivité thermique de la latérite stabilisée au ciment. *J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo), 2011, Série E, 13(1), 39-46.*
9. GBAGUIDI A. G., GBAGUIDI V., GIBIGAYE M., AMADJI T. A., AGOSSOU Y. D., SOCLO P., SINSIN B. A., 2011. Étude de la possibilité d'utilisation du rônier comme armature végétale dans les éléments en béton : Cas des poutres. *Annales des Sciences Agronomiques (AJOL), 15(1), 10p.*
10. HOUANKOU D. S. E., 2004. Importance socio-économique du rônier (Borassus Aethiopum Mart) : Différents usages et commercialisation de quelques sous-produits au Bénin. *Mémoire de DEA, EDP/GEN _ UAC, 2004, p105.*
11. HOUNGAN C. A., 2008. Caractérisation hygrothermique des matériaux locaux de construction au Bénin : Diffusivité massique et isotherme de sorption conductivité et diffusivité thermique. *Thèse de Doctorat, INRA, UMR 1093 Lemab, F-54000_Nancy, 232p.*
12. JANNOT Y., 2011a. Métrologie thermique : Modélisation des transferts de chaleur. *Université de Nancy, LEMTA, CNRS, France, 12-31.*
13. JANNOT Y., 2011b. "Rapport sur les mesures des propriétés thermiques du palmier rônier". *Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée (LEMTA), Nancy (France), 4p.*
14. KRAPEZ J.C., 2004. "Mesure de l'effusivité thermique : Méthodes par contact. *Techniques de l'Ingénieur", Doc. R 2 958.*
15. MEUKAM P., JANNOT Y., NOUMOWE A. et KOFANE T.C., 2004. "Thermophysical characteristics of economical building materials". *Elsevier: Construction and Building Materials 18, 437-443.*
16. OSSENI S., 2012. "Etude de la méthode du plan chaud à deux mesures de température pour la caractérisation thermique de matériau de construction". *Mémoire de DEA-SPI, EPAC/UAC, p 67.*
17. VIANOU et GIRARDEY, 1991. "Diffusivité thermique des matériaux de construction ; mesure par la méthode du régime régulier". *Rév. Gén. Them. Fr N° 352, 233-239.*
18. WASSI S., 2004. "Les systèmes

AHOUANNOU C. & al.

agroforestiers à rônier et leur contribution Karimama au Bénin''. *Mémoire de DESS/*
socio-économique dans la commune de UAM-UAC, 105p.