

Estimation de la diffusivité thermique du teck (*tectona grandis*) en fonction de la teneur en eau par la méthode du régime régulier.

Aristide Comlan HOUNGAN¹, Malahimi ANJORIN¹, Antoine VIANOU¹

¹Laboratoire d’Énergétique et de Mécanique Appliquée (L.E.M.A)
Ecole Polytechnique d’Abomey-calavi (E.P.A.C)
01BP 2009, Cotonou (Bénin)
*hounaris@yahoo.fr

Résumé - Le bois de teck (*tectona grandis*), est très utilisé dans la construction au Bénin. La recherche des conditions de confort dans l’habitat passe par une meilleure connaissance du comportement thermique des matériaux constituant les parois des bâtiments. Le présent travail est consacré à l’estimation de la diffusivité thermique du teck en fonction de la teneur en eau par la méthode du régime régulier. Il ressort de l’analyse des résultats obtenus que le teck peut être utilisé comme un bon isolant thermique permettant la réalisation de logements à confort thermique acceptable.

Nomenclature

| | | | |
|-----------------|---|-----------|--|
| a_x, a_y, a_z | diffusivité thermique suivant $x, y, z, m^2.s^{-1}$ | T | température, °C |
| Bi | nombre de biot | m | taux de variation du logarithme de T pendant le régime régulier, s^{-1} |
| Fijk | fonction d’ordre i, j, k | e | épaisseur, m |
| Fo | nombre de Fourier | t | temps, s |
| h_x, h_y, h_z | coefficient d’échange suivant $x, y, z, W.m^{-2}.K^{-1}$ | x, y, z | coordonnées d’espace, m |
| n_i | valeur propre | u | écart de température, K |

1. Introduction

Le bois couvre une grande partie de notre planète. Il représente actuellement quatre cents millions de tonnes d’équivalent pétrole en énergie et présente l’avantage d’être renouvelable [1]. Au Bénin, les forêts occupent une partie non négligeable du territoire et fournissent entre autres produits, le teck. Il est le plus utilisé comme matériau de structure. On estime à 5,2 millions de tonnes la quantité de bois prélevée par an. Plus de 90 % de ce produit est utilisé comme bois de feu ; le reste servant comme bois d’œuvre et de service dans la construction, l’ameublement et la pose des lignes électriques [2].

Le développement considérable du marché de logement au Bénin et, surtout la nécessité d’économiser de l’énergie, tout en assurant le confort thermique d’un habitat, exige une meilleure connaissance des caractéristiques thermiques des parois à réaliser. L’utilisation des matériaux adaptés au climat, comme le bois de teck, permet à l’enveloppe du bâtiment, en plus de son rôle d’isolant, de réguler elle-même les températures et l’hygrométrie intérieure (via l’inertie des parois et le phénomène de murs respirant). De plus, ceci contribue à minimiser les consommations énergétiques du bâtiment. Matériau hygroscopique, le bois fonctionne comme un régulateur naturel de l’humidité dans nos maisons.

Dans ce travail on se propose d'estimer la diffusivité thermique du Teck en fonction de la teneur en eau par la méthode du régime régulier. L'étude présente le dispositif expérimental et le principe de la méthode ainsi que l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

2. Présentation du dispositif expérimental

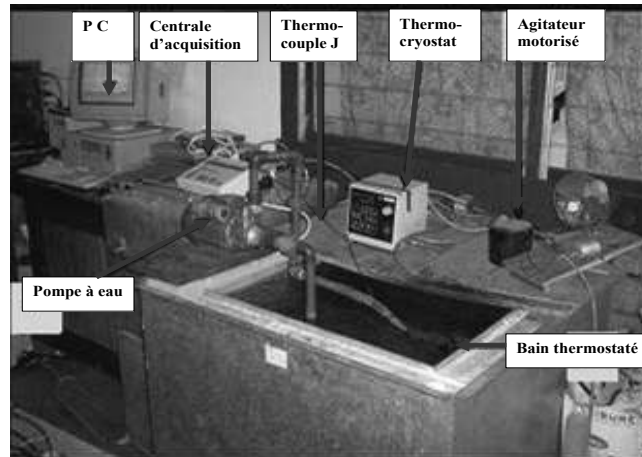


Figure.1. Dispositif expérimental de mesure de la diffusivité thermique des matériaux de construction

La méthode du régime régulier impose l'utilisation d'un bain thermostaté, homogène tel que le coefficient d'échange thermoconvectif soit suffisamment élevé pour assurer des nombres de Biot supérieurs à 100 [3]. La figure 1 montre le dispositif expérimental de mesure. Il est composé d'un bain thermostaté constitué d'un vase métallique rectangulaire. Ses dimensions sont de 540 mm de haut, de 800 mm de long et 795 mm de large, soit un volume utile de 340 litres. Le vase est logé dans une boîte et isolé sur la base et ses faces latérales à l'aide de polystyrène de 90 mm d'épaisseur.

Le chauffage du fluide contenu dans le vase est réalisé au moyen d'un thermocryostat compact de type LAUDA et d'un serpentin chauffant de 1 kW/220V piloté par un régulateur électronique de température. La température de consigne est réglée à l'aide d'un potentiomètre et la lecture se fait sur un cadran à affichage numérique. On obtient une stabilisation de la température dans le temps de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. L'eau est agitée intensément à l'aide d'un agitateur en hélice intégré au système. Compte tenu de la quantité d'eau à chauffer, une pompe d'une puissance de 750W/220V est associée parallèlement à l'agitateur, qui permet de répartir de façon uniforme le flux de chaleur produit par le serpentin et le thermocryostat.

L'échantillon du matériau à tester est placé dans le bain contenant de l'eau maintenue à une température constante T_f de l'ordre de 50°C . La température de l'éprouvette est mesurée grâce à des thermocouples de type J (Fer Constantan) de diamètre inférieur à 1mm surgainé et isolé. Avant les mesures, tous les thermocouples sont préalablement étalonnés. Le trou recevant la sonde a été réalisé avec une perceuse à foret de diamètre d'environ 1 mm et après la pose du couple dans le volume central de l'éprouvette, l'orifice est fermé avec une colle imperméable à l'eau. Toutes ces précautions minimisent l'effet intrusif de la sonde. A l'issue des mesures, les échantillons sont découpés et la verticalité de la sonde au point de mesure a été vérifiée. Un second thermocouple de même type sert à relever la température du bain thermostaté.

3. Préparation des échantillons

Dans le souci de mesurer la diffusivité thermique des matériaux pour différents teneurs en eau, nous avons réalisé des éprouvettes de petites dimensions afin de s'assurer de l'uniformité de l'humidité au sein de leur réseau poreux. Pour obtenir les teneurs en eau voulues, les échantillons sont placés pendant plusieurs jours soit à l'étuve, saturé dans l'eau, séché à l'air, ou conditionné dans une enceinte climatique. Les teneurs en eau sont vérifiées en utilisant des échantillons jumeaux et en mesurant à la fin leur masse anhydre. La figure 3 ci-dessous montre la photo des échantillons de teck utilisés. Les dimensions et les teneurs en eau de ces échantillons sont consignés dans le tableau 1.

Les échantillons sont découpés dans les trois plans perpendiculaires : coupe transversale perpendiculaire à l'axe de la tige, coupe radiale dans un plan passant par la moelle, coupe tangentielle dans un plan excentré et parallèle à l'axe de la tige. Les trois directions axiale (L), radiale (R) et tangentielle (T) sont les directions d'anisotropie du bois. Ainsi les six faces des échantillons sont bien taillées dans les plans principaux d'anisotropie. Ceci a été possible en respectant la disposition des cernes et rayons ligneux du bois. Aussi, les échantillons de bois sont imperméabilisés à l'eau à l'aide d'une mince couche de vernis.

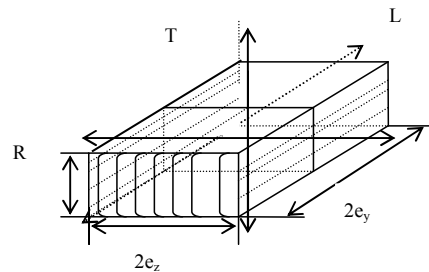
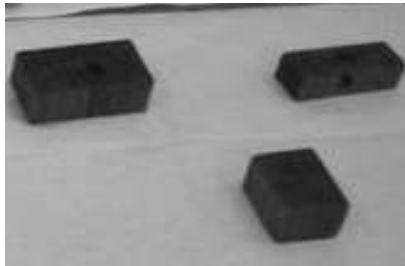


Figure 2 : photo des échantillons

Figure 3 : système de coordonnées pour une plaque en bois.

4. Equations de transfert dans le matériau

L'équation de transfert de chaleur dans un milieu orthotrope comme le bois est :

$$\lambda_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \rho c \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \text{ avec } u = T(x,y,z,t) - T_f \quad (1)$$

La figure 3 présente le système de coordonnées pour une plaque en bois.

La condition initiale et aux limites de type Fourier :

$$u(x, y, z, t = 0) = u_0$$

$$\lambda_x \frac{\partial u}{\partial x} + h_x u = 0 \text{ pour } x = \pm e_x \quad (2)$$

$$\lambda_y \frac{\partial u}{\partial y} + h_y u = 0 \text{ pour } y = \pm e_y \quad (3)$$

$$\lambda_z \frac{\partial u}{\partial z} + h_z u = 0 \text{ pour } z = \pm e_z \quad (4)$$

Où $u_0 = T(x, y, z, t = 0) - T_f$; T_f température du milieu environnant.

En fin d'essais, $u(x, y, z, \text{inf}) = 0$ car la température de l'échantillon tend vers T_f .

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 [3]. La température réduite solution de (1) avec les

$$\text{conditions aux limites (2 à 4) notée : } \theta = \frac{u}{u_0} = \frac{T(x, y, z, t) - T_f}{T_0 - T_f} \quad (5)$$

$$\text{est donnée par : } \theta = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{ijk} F_{ijk} \exp \left[- \left(n_{ix}^2 F_{ox} + n_{jy}^2 F_{oy} + n_{kz}^2 F_{oz} \right) \right] \quad (6)$$

$n_{i\eta}$ est la racine positive de rang i de l'équation transcendante $\cotg \left(\frac{n_{i\eta}}{Bi_{\eta}} \right) = \frac{n_{i\eta}}{Bi_{\eta}}$ avec

($\eta = x, y, z$). Si le nombre de Biot Bi_{η} tend vers l'infini, les nombres propres $n_{i\eta}$ ont pour

valeurs : $n_{1\eta} = \frac{\pi}{2}$, $n_{2\eta} = 3 \frac{\pi}{2}$, $n_{3\eta} = 5 \frac{\pi}{2}$, $n_{i\eta} = (2i-1) \frac{\pi}{2}$. Pour des temps supérieurs au temps de

démarrage du régime régulier, la série (6) devient convergente et peut être remplacée avec une précision mieux que 1% [3] par son premier terme : $\theta = A_{111} F_{111} \exp(-mt)$ (7)

$$m = \left(\frac{n_{1x}^2 a_x}{e_x^2} + \frac{n_{1y}^2 a_y}{e_y^2} + \frac{n_{1z}^2 a_z}{e_z^2} \right) \quad (8)$$

En linéarisant θ dans le domaine du régime régulier on a : $\ln \theta = -mt + Cte$ (9)

La valeur de m peut être obtenue expérimentalement par la relation :

$$m = \frac{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}{t_2 - t_1} = \frac{\ln u_1 - \ln u_2}{t_2 - t_1} \quad (10)$$

Dans la pratique, m est pris égal à la valeur absolue de la pente de la droite obtenue par une régression linéaire à partir des points expérimentaux dans la phase du régime régulier.

L'identification des diffusivités a_x, a_y, a_z nécessite trois enregistrements expérimentaux sur le même type d'échantillon de matériau mais avec des éprouvettes de dimensions caractéristiques choisies de façon adéquate.

Par exemple dans le cas simple où l'on instrumente trois éprouvettes de dimensions

$$\text{respectives : } \begin{cases} n^{\circ 1} : 2e_x, 2e_y, 2e_z \\ n^{\circ 2} : 2e_x, 2e'_y = e_y, 2e_z \\ n^{\circ 3} : 2e_x, 2e_y, 2e'_z = e_z \end{cases} \begin{cases} a_x = 0,135(5m_1 - m_2 - m_3)e_x^2 \\ a_y = 0,135(m_2 - m_1)e_y^2 \\ a_z = 0,135(m_3 - m_1)e_z^2 \end{cases} \quad (11)$$

Ainsi, connaissant les valeurs de m représentant le taux de variation du logarithme de la température pendant le régime régulier en un point quelconque de chaque éprouvette, nous pouvons déduire les diffusivités par rapport aux directions principales par les relations (11).

5. Résultats et interprétation

L'identification de la zone exploitable correspondant au régime régulier nécessite la définition de critères pertinents. En principe, la régression linéaire ne concerne que les points expérimentaux qui correspondent à des temps définissant un nombre de Fourier supérieur à 0,23 [3]. Comme le nombre de Fourier est une fonction de la dimension caractéristique et des diffusivités dont les valeurs sont inconnues, on ne peut connaître exactement le temps t_r

associé à l'apparition du régime régulier. L'analyse de la courbe $f(t) = \ln(\Delta T)$ nous permet de délimiter la zone exploitable avec une borne inférieure égale à 1°C pour que les mesures ne
Tableau 1 : diffusivité thermique du teck (Tectona Grandis) à 50°C pour différentes teneurs en eau

| Matériau | Dimensions (mm) | Infra densité kg/m^3 | Teneur en eau % | Pente s^{-1} | Coefficient de corrélation | Diffusivité $\times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ |
|------------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------------------|---|
| Teck (anhydre) | 48,4 x 27,8x 20,8 | 476,7 | 0 | -0,0135 -0,0142 -0,0173 | 0,9986 0,9977 0,9990 | $a_L = 5,20 \pm 0,40$ $a_R = 1,01 \pm 0,08$ $a_T = 0,60 \pm 0,05$ |
| Teck (enceinte climat) | 50,6x 27,1x 21,1 | 460,4 | 8,4 | -0,0091 -0,0109 -0,0152 | 0,9990 0,9971 0,9994 | $a_L = 2,90 \pm 0,20$ $a_R = 1,50 \pm 0,10$ $a_T = 1,60 \pm 0,10$ |
| Teck (enceinte climat) | 49,3 x 28,1x 21,5 | 510,8 | 15,6 | -0,0042 -0,0039 -0,0025 | 0,9960 0,9987 0,9975 | $a_L = 5,70 \pm 0,50$ $a_R = 1,70 \pm 0,10$ $a_T = 0,60 \pm 0,05$ |
| Teck (eau liquide) | 50,1 x 30,2x 20,1 | 604,5 | 22,3 | -0,0025 -0,0038 -0,0035 | 0,9930 0,9960 0,9920 | $a_L = 4,00 \pm 0,30$ $a_R = 1,10 \pm 0,10$ $a_T = 0,80 \pm 0,07$ |
| Teck (saturé) | 51,8 x 31,2x 20,1 | 515,1 | 123,3 | -0,0059 -0,0062 -0,0088 | 0,9997 0,9999 0,9998 | $a_L = 1,90 \pm 0,15$ $a_R = 0,90 \pm 0,08$ $a_T = 0,30 \pm 0,02$ |

soient pas tributaires de bruits parasites et une borne supérieure égale à 22% de l'écart initial de la température ($T_0 - T_f$) [3]. Pratiquement, dans le traitement des données, sont considérés les enregistrements de la deuxième moitié du temps expérimental d'acquisition, tout en veillant à éliminer les valeurs de ΔT inférieures à 1°C (figure 4 et 5).

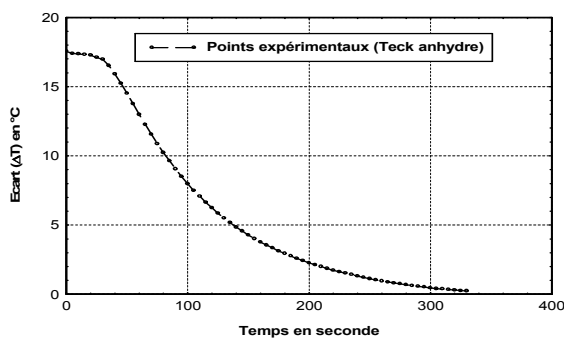


Figure 4 : Thermogramme $f(t) = \Delta T$ pour un échantillon du teck anhydre ($T_{\text{bain}} = 50^\circ\text{C}$)

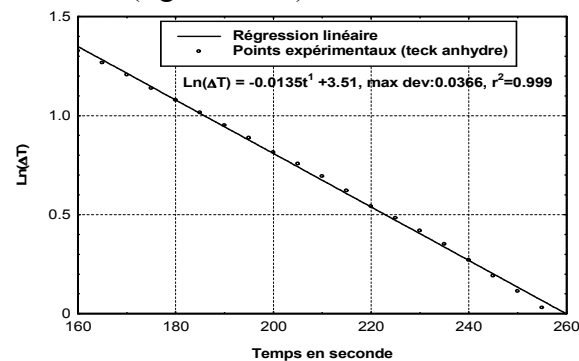


Figure 5 : Droite obtenue par régression linéaire après 160 secondes pour l'échantillon du teck anhydre ($T_{\text{bain}} = 50^\circ\text{C}$)

Le tableau 1 donne les résultats de mesures de diffusivité thermique du teck pour différentes teneurs en eau. De ce tableau on en déduit un rapport d'anisotropie moyen variant de $a_L/a_R = 1,9-5,2$; $a_L/a_T = 1,8-9,5$; $a_R/a_T = 1,6-3,0$. Ces différences entre rapport d'anisotropie montrent l'influence de la teneur en eau sur le transfert de chaleur. Les incertitudes absolues estimées par intervalle de confiance à 95% sur les mesures de diffusivités sont résumées dans le tableau 1. La figure 6 donnant la diffusivité thermique en

fonction du taux d'humidité montrent que pour le teck, la diffusivité longitudinale est supérieure à la transversale. Nous constatons également sur ces courbes qu'en transverse (radial et tangentiel), les diffusivités thermiques ne dépassent guère $2.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Aussi pour de faible teneur en eau (0-15%) la diffusivité obtenue en transverse passe par un maximum. Ce résultat a été prouvé expérimentalement [4] pour des teneurs en eau situées en 0 et 10% pour le bois et autres matériaux.

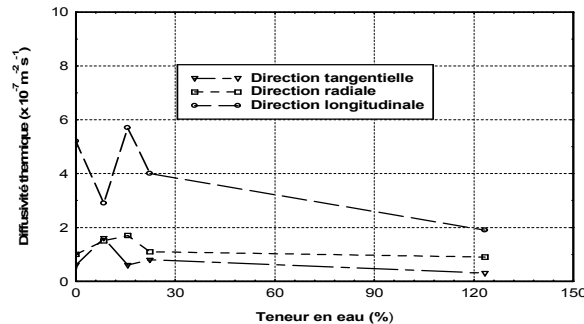


Figure 6 : Diffusivité thermique du Teck en fonction de la teneur en eau à $T_{\text{bain}} = 50^{\circ}\text{C}$.

Pour des teneurs en eau au delà de 15% on note une diminution de la diffusivité thermique. Ceci peut s'expliquer très facilement si nous interprétons la diffusivité comme le pouvoir d'atténuation d'une perturbation thermique superficielle, au sein du matériau. En effet, au cours de l'humidification du bois, l'eau de faible diffusivité (environ $1,44.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ à 20°C) remplace l'air sec dont la diffusivité (environ $2.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) est très supérieure à la sienne. Nos résultats sont comparés à ceux de deux essences de bois secs à l'air [3] (l'Iroko et l'Acajou) très utilisés au Bénin, il ressort qu'en longitudinale la diffusivité thermique est de $3,21.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ pour l'Iroko contre $2,49.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ pour l'Acajou alors qu'en transverse, ces valeurs sont respectivement de $2,69.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ et $1,55.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Nous constatons que pour une teneur en eau de 15,6%, nos résultats sont plus faibles que ceux de ces essences de bois.

6. Conclusion

Nous avons mesuré la diffusivité thermique du teck par la méthode du régime régulier. L'un des avantages de cette méthode est la rapidité avec laquelle on obtient les résultats expérimentaux (un essai dure moins de 15 minutes). D'autre part la méthode du régime régulier utilise un appareillage particulièrement simple à mettre en œuvre et se prête bien à des mesures fortement automatisées. De façon globale, nous notons, la décroissance de la diffusivité thermique avec le taux d'humidité du bois, et une grande valeur de la diffusivité dans le sens axial par rapport aux sens transversaux, l'écart dans les deux sens (axial et transverse) se réduisant au fur et à mesure de l'humidification.

Références bibliographiques

- [1] A. Houngan, Caractérisation hygrothermique des matériaux locaux du Bénin : conductivité et diffusivité thermique, isothermes de sorption et diffusivité massique, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts de Nancy-France (2008), 232p.
- [2] S. Gboyahida, Caractérisation des transferts de chaleur et de masse de trois essences tropicales de Bois. Mémoire de D.E.A Collège Polytechnique d'Abomey-Calavi (1997), 80 p.
- [3] A. Vianou, A. Girardey, Exploitation of the regular-state phenomenon in thermokinetics for the determination of the thermal properties of building materials, Publication High- Temperatures-High Pressures., 25(1993), 635- 641.
- [4] D. Quenard, J. P. Laurent, H. Sallée - Influence de la teneur en eau et de la température sur les paramètres thermiques du plâtre Rev. Gen. Therm n°291(1986), 137 – 144.