

Influence de la teneur en eau sur les propriétés thermophysiques des bois ptérocarpus et afzélia

Influence of water content on thermophysical parameters of pterocarpus erinaceus and afzelia

Carlos HOUNGBEME^{1*}, Aristide HOUNGAN¹, Armand DJOSSOU¹, Antoine VIANOU¹

¹Laboratoire de Caractérisation Thermo-physique des Matériaux et d'Appropriation Energétique (Labo-CTMAE) de l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI), 01 BP 2009 Cotonou, Benin
Email : *houngebearl@gmail.com

RESUME – Des valeurs de la conductivité thermique et de l'effusivité thermique des bois ptérocarpus erinaceus et afzélia ont été effectuées à la température ambiante (20°C) avec la méthode du ruban chaud. L'objectif principal du travail est de mettre en évidence l'influence de la teneur en eau et du type de bois sur leurs propriétés thermophysiques. Les résultats obtenus : la conductivité thermique ; la diffusivité thermique et l'effusivité thermique variant respectivement de 0,112 à 0,225 $W.m^{-1}.K^{-1}$; de 0,422 à $1,296 \cdot 10^{-7} m^2.s^{-1}$ et de 362,83 à $1096,68 J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-0,5}$ en fonction de l'humidité montrent que la teneur en eau influence fortement le comportement thermique de ces bois.

Mots clés : Bois tropicaux ; conductivité thermique ; effusivité thermique ; diffusivité thermique ; ruban chaud.

Abstract – Values of thermal conductivity and thermal effusivity of pterocarpus erinaceus and afzelia were performed at room temperature (20°C) using the hot ribbon method. The main objective of the work is to highlight the influence of water content and type of wood on their thermophysical properties. The results obtained: thermal conductivity; thermal diffusion and thermal effusivity ranging respectively from 0.112 to 0.225 $W.m^{-1}.K^{-1}$; from 0.422 to $1,296 \cdot 10^{-7} m^2.s^{-1}$ and from 362.83 to $1096.68 J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-0,5}$. Depending on the humidity, shows that the water content strongly influences the thermal behaviour of these woods.

Keywords: Tropical woods; thermal conductivity; thermal effusivity; thermal diffusivity; hot strip

Nomenclature

a	diffusivité, $m^2.s^{-1}$	Symboles grecs	
C	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	\emptyset	flux de chaleur, W
e	épaisseur, m	Φ	Déphasage [h]
E	effusivité thermique, $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{1/2}$	σ	Ecart-type
L	longueur, m	λ	Conductivité thermique [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
R	résistance thermique, $m^2.K.W^{-1}$	ρ	masse volumique [$kg.m^{-3}$]
S	Surface, m^2	α	coefficient directeur de la droite de régression de l'effusivité
T	température, $^{\circ}C$	β	coefficient directeur de la droite de régression de la conductivité thermique
T	temps, s	w	Teneur en eau, %

1. Introduction

Le contexte du changement climatique et la nécessité de s'orienter vers une société plus sobre énergétiquement donnent un poids considérable au développement de l'industrie du bois, par le caractère écologique et renouvelable de cette ressource naturelle. L'utilisation des matériaux adaptés au climat, comme le bois, 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 mur respirant) [1]. De plus, ceci contribue à minimiser les consommations énergétiques du bâtiment [2]. Matériau hygroscopique et ligno-cellulosique [3], le bois fonctionne comme un régulateur naturel de l'humidité dans nos maisons. Ses caractéristiques thermiques de base telles que la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la chaleur spécifique dépendent ou ne dépendent pas des essences, de la direction anatomique [4], de la densité [5], de la teneur en humidité [6], de la température [7], de la charge mécanique [8], etc. Malgré ces connaissances, certains facteurs non habituels ont une influence sur les valeurs des propriétés thermiques du bois. Le but de cet article est de décrire l'influence du type d'essence et l'épaisseur de l'échantillon sur les propriétés thermiques des essences de bois considérées et d'envisager leur possibilité utilisation dans le développement de nouveaux matériaux isolants.

2. Echantillons étudiés

Les matériaux caractérisés sont des éprouvettes de bois tropicaux de géométrie parallélépipédique de longueur $L = 5 \text{ cm}$, de largeur $l = 3 \text{ cm}$ et d'épaisseurs e variables (0,3 cm ; 0,6 cm et 1,5 cm), les mesures d'épaisseur ont été effectuées avec un micromètre à 0,001%. Dans ce travail nous présentons les résultats relatifs aux deux premières épaisseurs. Le bois étant un matériau anisotrope les mesures sont effectuées ici dans la direction perpendiculaire aux fibres. Pour le faire, nous avons confectionné trois séries d'éprouvettes témoins dont les compositions initiales figurent au tableau 1. La figure 1 présente quelques échantillons des matériaux étudiés. Le tableau 1, présente la composition des éprouvettes témoins. Ces derniers ayant également subit une caractérisation thermophysique.

Echantillons	Kosso			Afzélia		
Epaisseur (mm)	03	06	15	03	06	15
Masse m (g)	4,50	7,30	16,10	5	8,80	18,50
Masse volumique ρ ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1000	811,11	715,55	1111,10	977,78	822,22
Teneur en eau (%)	12,5	15,87	14,18	19,05	15,79	14,20

Tableau 1 : Composition initiale des échantillons témoins



Figure 1 : Eprouvettes de koso (Ko) et d'afzélia, (A)

3. Méthodes de caractérisation

3.1. Obtention et maîtrise des teneurs en eau

La procédure d'obtention des différentes teneurs en eau est pratiquement la même que celle développée par LAURENT et al et FALL et al [9]. La teneur en eau à base sèche est obtenue en séchant les échantillons à l'étuve réglée à 105°C pendant 48 h, le temps que l'équilibre hygrothermique soit

atteint. A la sortie de l'étuve, les échantillons sont conservés dans du papier aluminium puis dans une enveloppe en matière plastique. Les autres teneurs en eau sont obtenues en plongeant les échantillons dans l'eau pendant 48 heures au moins ; puis en les séchant progressivement soit à l'étuve ou au four à microondes, soit à l'air libre. Dès l'obtention de chaque masse voulue, les échantillons sont à nouveau conservés pendant 24 h dans une enveloppe en matière plastique, le temps que l'équilibre hygrothermique au sein de l'échantillon s'établisse. Cette technique permet d'obtenir une répartition aussi uniforme que possible de l'eau à l'intérieur des échantillons [10]. Connaissant la masse sèche m_s de l'échantillon et sa masse humide m_h , la teneur en eau massique est calculée par :

$$w = \frac{m_e}{m_s} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad (1)$$

3.2 Principe du ruban chaud

La méthode du ruban chaud consiste à utiliser une simple résistance électrique de forme rectangulaire sur laquelle est disposée un thermocouple de type K constitué de fils de diamètre 0,02 mm. L'incertitude que provoque la méthode d'implantation des sondes températures est négligeable. En conséquence du contact entre la sonde et l'échantillon, il existe un très faible risque de décalage spatial pour les sondes de surface. La mesure de la température est effectuée au centre de la résistance ce qui évite d'avoir à prendre en compte les déperditions thermiques par les fils électriques à une extrémité de la résistance. La résistance est insérée entre deux échantillons de surface plane du matériau à caractériser et la température du thermocouple a été enregistrée pendant 180 s avec un pas de temps de 1 s et une résolution de 0,1 °C, les dimensions de l'échantillon sont telles que la perturbation provoquée par l'échelon de flux imposé à la sonde n'atteigne aucune de ses faces pendant la durée de la mesure (hypothèse du milieu semi-infini). Le rapport longueur/ largeur de la résistance est choisi de manière à ce que le transfert de chaleur au centre de la résistance puisse être considéré bidirectionnel pendant un temps inférieur à 180s. L'idée est d'utiliser le thermogramme correspondant au début du chauffage pendant le temps où le transfert de chaleur au centre de la sonde reste unidirectionnel pour estimer l'effusivité thermique par un modèle de type plan chaud (figure 2). Une modélisation complète des transferts bidirectionnels dans les échantillons, associée à une méthode d'estimation de paramètres, permet d'utiliser le thermogramme entre 100 s et 180 s pour estimer la conductivité thermique. La figure 2 présente le dispositif expérimental du ruban chaud utilisé :

(3) : Alimentation stabilisée ; (2) : centrale d'acquisition ; (1) : résistance insérée entre deux échantillons du matériau

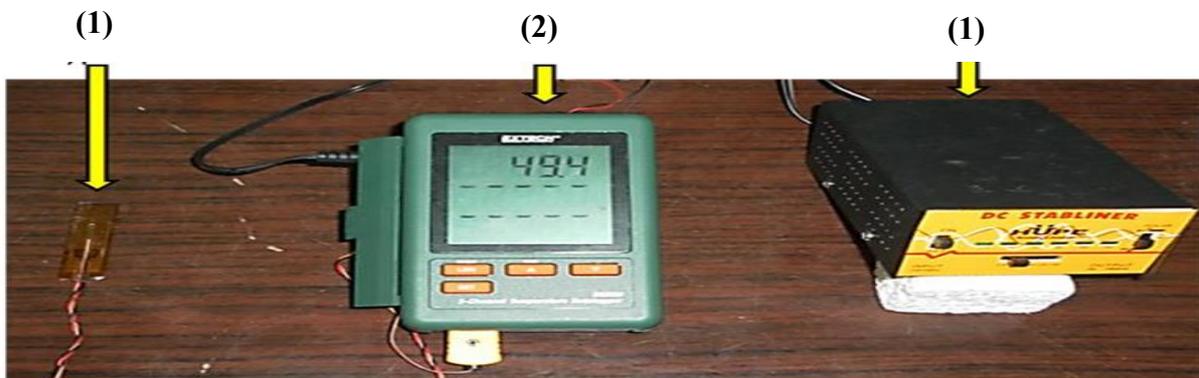


Figure 2 : Dispositif expérimental du ruban chaud

3.3. Modélisation du ruban chaud

La figure 3 présente le schéma d'un modèle ruban chaud symétrique. Les hypothèses de base sont celles émises par Yves JANNOT [10] :

- ☆ **Milieu** : Semi-infini dans les deux sens de la propagation de la chaleur (épaisseurs suffisantes);
- ☆ **Transfert** : Pas de transfert de chaleur d'un échantillon vers un autre ;
- ☆ **Condition initiale** : La température initiale T_0 des échantillons est uniforme.

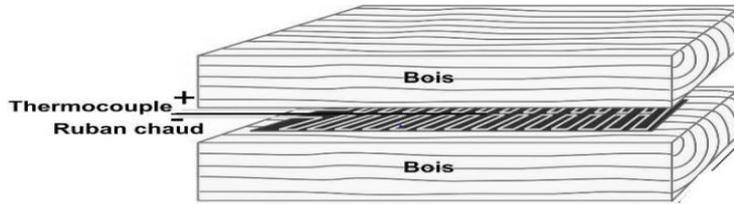


Figure 3 : Schéma du montage de la méthode du ruban chaud symétrique (mesure dans le sens perpendiculaire aux fibres).

L'élévation de la température $T(x, y, t)$ en un point de coordonnées (x, y) du ruban vérifie l'équation (3) pendant le temps où le transfert en ce point reste bidirectionnel (ruban chaud infini) :

$$\frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} \quad (2)$$

Avec les conditions aux limites suivantes :

$$\text{en } y = 0 : -\lambda S \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} = -\varphi_0 \quad (3)$$

$$\text{si } x < b \quad (4)$$

$$\text{et } -\lambda \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} = 0$$

$$\text{si } x > b \quad (5)$$

$$\text{en } :x = 0 : -\lambda \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} = 0$$

$$\text{Par symétrie} \quad (6)$$

$$\text{en } x = L : T(L, y, t) = 0 \text{ hypothèse du milieu semi-infini suivant } (ox)$$

$$\text{en } y = e : T(x, e, t) = 0, \text{ hypothèse du milieu semi infini suivant } (oy) \quad (7)$$

3.4 Estimation des paramètres

La figure 4 présente les trois thermogrammes : ruban chaud, plan chaud et fil chaud. Par comparaison, on remarque que le ruban chaud se comporte comme le plan chaud aux temps courts (entre 0 et 50 s) et comme le fil chaud aux temps longs (entre 80 s et 180 s).

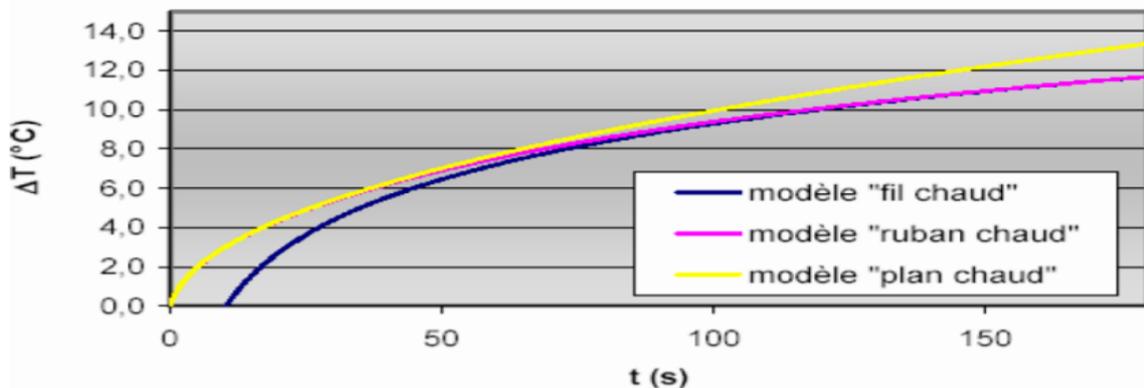


Figure 4 : Comparaison des modèles ruban chaud, plan chaud et fil chaud [10]

En appliquant successivement une transformée de Laplace, une transformation finie de Fourier en cosinus entre $x = 0$ et $x = L$ et à l'équation (2) et le formalisme des quadripôles :
Le thermogramme du plan chaud a pour expression :

$$T_s(0,0,t) - T_s(0,0,0) = \frac{2\varphi_0}{ES\sqrt{\pi}}\sqrt{t} + \varphi_0 \left[R_c - \frac{(mc)_s}{(ES)^2} \right] \quad (8)$$

$$L'effusivité thermique est obtenu par : $E = \frac{2\varphi_0}{\alpha S\sqrt{\pi}}$ (9)$$

Avec α le coefficient directeur de la droite de régression en fonction \sqrt{t} donnée par la relation (14).
Le thermogramme du fil chaud a pour expression :

$$T_s(0,t) - T_s(0,0) = \frac{\varphi_0}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \varphi_0 \left[R_c + \frac{\gamma}{4\pi\lambda L} - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{2\pi\lambda L} \right] \quad (10)$$

$$La\ conductivité\ thermique\ est\ obtenue\ par\ \lambda = \frac{\varphi_0}{4\pi\beta L} \quad (11)$$

Avec β le coefficient directeur de la droite de régression en fonction de $\ln(t)$ donnée par la relation (16). La diffusivité thermique est obtenue par : $a = \left(\frac{\lambda}{E}\right)^2$ (12)

4. Résultats

Les tableaux 2 et 3 présentent les caractéristiques thermiques des matériaux à 6 mm d'épaisseur.

Echantillon	w (%)	P (kg. m ⁻³)	λ_1	λ_2	λ_3	$\bar{\lambda}$ (W. m ⁻¹ . K ⁻¹)	$\overline{\Delta\lambda}$ (W. m ⁻¹ . K ⁻¹)
Afzélia	0	844,440	0,129	0,145	0,138	0,137	0,004
	40,78	1188,890	0,256	0,238	0,249	0,248	0,005
Kosso	0	700	0,118	0,118	0,121	0,119	0,001
	53,96	1022,220	0,238	0,246	0,241	0,242	0,002

Tableau 2 : Conductivité thermique des échantillons étudiés à 6 mm d'épaisseur.

Echantillon	w (%)	$a_1 = \left(\frac{\lambda_1}{E_1}\right)^2$	$a_2 = \left(\frac{\lambda_2}{E_2}\right)^2$	$a_3 = \left(\frac{\lambda_3}{E_3}\right)^2$	\bar{a} (10 ⁻⁷ . m ² . s ⁻¹)	$\overline{\Delta a}$ (10 ⁻⁷ . m ² . s ⁻¹)
Afzélia	0	0,854	1,001	0,888	0,914	0,044
	40,78	0,743	0,851	0,721	0,771	0,040
Kosso	0	0,975	0,914	0,911	0,933	0,021
	53,96	1,045	0,824	0,929	0,932	0,064

Tableau 3 : Diffusivité thermique des échantillons étudiés à 6 mm d'épaisseur.

Les valeurs présentées sur les figures (5 à 10) ci-dessous sont les moyennes de trois mesures effectuées dans le sens perpendiculaire aux fibres, sur les mêmes échantillons dans les mêmes conditions. Les valeurs sont mesurées à la température ambiante (20°C) et à la pression normale. Les valeurs estimées sont calculées en utilisant les équations 2 à 12.

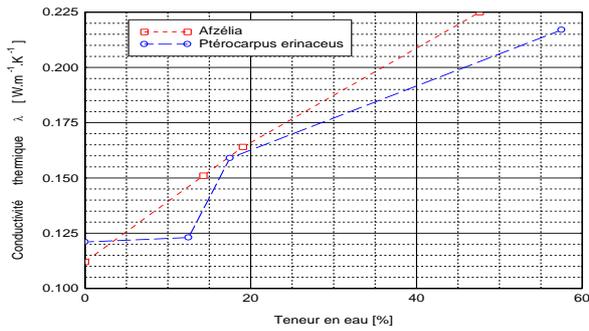


Figure 5 : Variation de la conductivité thermique du kosso et de l'afzélia en fonction de l'humidité à épaisseur constante $e=3mm$

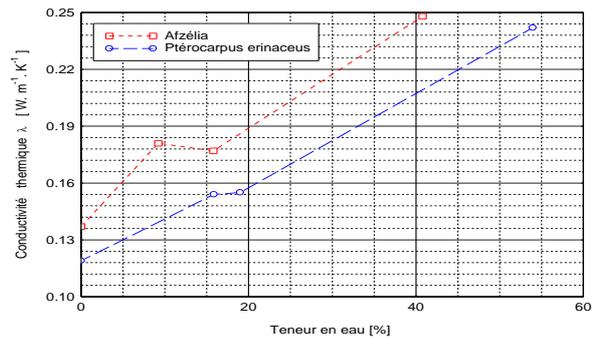


Figure 6 : Variation de la conductivité thermique du kosso et de l'afzélia en fonction de l'humidité à épaisseur constante $e=6mm$

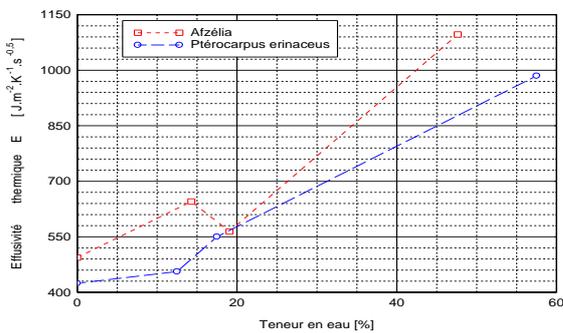


Figure 7 : Variation de l'effusivité thermique du kosso et de l'afzélia en fonction de l'humidité à épaisseur constante $e=3mm$

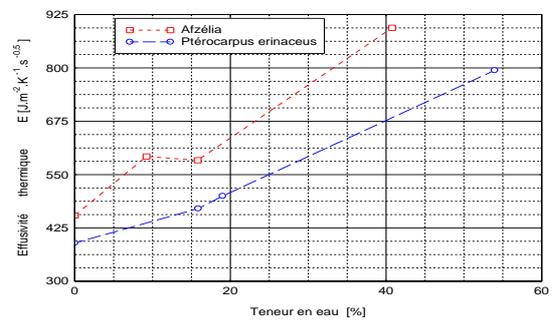


Figure 8 : Variation de l'effusivité thermique du kosso et de l'afzélia en fonction de l'humidité à épaisseur constante $e=6mm$

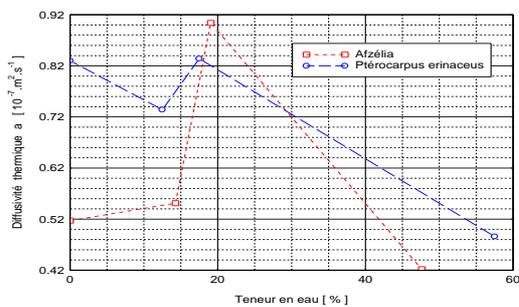


Figure 9 : Variation de la diffusivité thermique du kosso et de l'afzélia en fonction de l'humidité à épaisseur constante $e=3mm$

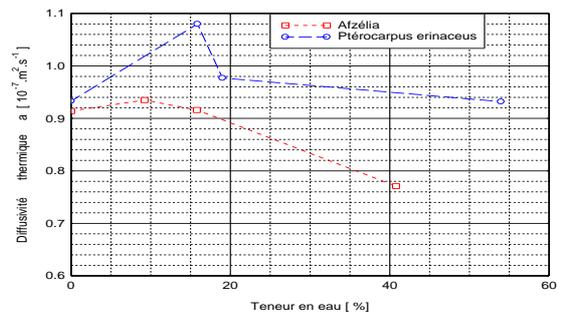


Figure 10 : Variation de la diffusivité thermique du kosso et de l'afzélia en fonction de l'humidité à épaisseur constante $e=6mm$

5. Discussions

La valeur de la conductivité thermique ; de la diffusivité thermique et l'effusivité thermique varient respectivement entre 0,112 et 0,225 $W.m^{-1}.K^{-1}$; 0,422 et 1,296 $10^{-7}.m^2.s^{-1}$ et 362,83 et 1096,68 $J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-0,5}$. D'une manière générale, l'analyse des résultats montre que la conductivité thermique et l'effusivité thermique des deux essences croissent globalement en fonction de la teneur en eau. Selon NGOHE [11], ceci était en effet à prévoir puisque le bois est poreux, et que la conductivité thermique de l'eau (environ 0,60 $W.m^{-1}.K^{-1}$ à 20°C) est très supérieure à celui de l'air (environ 0,026 $W.m^{-1}.K^{-1}$ à 20°C) qu'elle remplace au fur et à mesure de l'humidification du bois. Toujours selon cet auteur, il existe aussi, nécessairement, dans les pores remplis d'air entre les parois humides, un gradient de pression partielle résultant de la chute de température et, de ce gradient de pression partielle, résulte une diffusion de vapeur qui à son tour entraîne de l'énergie. Nous remarquons également qu'au fur et à mesure l'épaisseur des échantillons augmente l'écart entre la conductivité thermique et l'effusivité thermique des deux bois devient de plus en plus considérable. Cette remarque peut être liée à la limite de notre hypothèse de milieu semi-fini compte tenu de la faible épaisseur de nos échantillons ou peut être dû à des différences de microstructure (porosité, tortuosité...) des deux matériaux ou à un état d'hydratation différent des échantillons. En ce qui concerne la diffusivité thermique, elle évolue d'une manière complexe mais semble en grande partie décroître en fonction de la teneur en eau. Selon NGOHE [11], ceci s'explique très facilement si nous interprétons la diffusivité thermique 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 thermique (environ 1,44. $10^{-7}.m^2.s^{-1}$ à 20°C) remplace l'air sec dont la diffusivité (environ 2. $10^{-5}.m^2.s^{-1}$) est très supérieure à la sienne.

En guise de comparaison, les deux essences de bois caractérisés présentent des propriétés thermophysiques proches des précédentes publications. A titre d'exemple, Philippe Jodin [12] a publié dans le manuel « Bois matériau d'ingénierie » les valeurs 0,1 à 0,2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ de la conductivité thermique du bois sec des valeurs 0,2 à 0,5 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour le bois humide, tous mesurés dans la direction perpendiculaire aux fibres. Sahin [13] a aussi publié la valeur de la conductivité du bois *Fraxinus excelsior* dans la direction radiale à 8% de teneur en eau à 20°C, à partir de cinq mesures en moyenne 0.140 $W.m^{-1}.K^{-1}$ avec un écart type de 0.005, mesuré avec la méthode du fil chaud sur des échantillons 20x50x100 mm. Nos graphes montrent que ces valeurs sont proches des valeurs fournies par notre méthode en régime transitoire du ruban chaud à ces mêmes teneur en eau respective et sont en adéquation avec la littérature.

6. Conclusion

En conclusion, on peut retenir la dépendance forte des propriétés thermiques des bois *ptérocarpus erinaceus* et *afzélia* vis-à-vis de leur teneur en eau. Il sera donc difficile de ne considérer qu'une seule valeur moyenne de conductivité et de l'effusivité thermique dans la simulation de parois en ces bois soumises à des variations d'humidité. Les deux essences de bois tropicaux constituent un bon isolant thermique à faible épaisseur. On peut constater que le bois de *kosso* est un bon candidat pour la réalisation de nouveaux matériaux isolants car il présente une conductivité thermique relativement faible par rapport au bois d'*afzélia*. En perspective, une étude de la corrélation entre les propriétés thermiques de ces échantillons et leur microstructure s'avère nécessaire.

Références Bibliographiques

- [1] HOUNGAN C. A. Caractérisation hygrothermique des matériaux locaux de construction au Bénin : Diffusivité massique et isotherme de sorption, conductivité et diffusivité thermiques. Thèse de Doctorat. AGROPARISTECH-Nancy France. Avril 2008
- [2] NZIEGUI C., IKOGOU S., MOUTOU P. Impact of cyclic compressive loading and moisture content on the mechanical behavior of *Aucoumea Klaineana* Pierre, *Wood Material Science & Engineering*, Vol. 5, N°1,1-7 (2017)
- [3] FOUQUET, "Xylogologie", Notes de cours ENSA de Dschang. Cameroun
- [4] NIEMZ, P., SONDEREGGER, W., HERING, S.: Thermal conductivity of Norway spruce and European beech in the anatomical directions. In: *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology* No. 72. Pp 66-72, 2010.
- [5] HARADA, T., HATA, T., ISHIHARA, S.: Thermal constants of wood during the heating process measured with laser flash method. *Journal of Wood Science* 44(6): 425-431, 1998.
- [6] HRCKA, R., 2010: Variation of thermal properties of beech wood in the radial direction with moisture content and density. In: *Wood structure and properties '10*, edited by J. Kúdela and R. Lagaña, Arbora Publishers, Zvolen, Slovakia, 2010. Pp 111–115.
- [7] OLEK, W., WERES, J., GUZENDA, R., : Effects of thermal conductivity data on accuracy of modeling heat transfer in wood. *Holzforschung* 57(3): 317-325, 2003.
- [8] BUCAR, B., STRAZE, A.: Determination of the thermal conductivity of wood by the hot plate method: The influence of morphological properties of fir wood (*Abies alba* Mill.) to the contact thermal resistance. *Holzforschung* 62(3): 362–367, 2008.
- [9] LAURENT J.P., GUERRE-CHALEY C. Influence de la teneur en eau et de la température sur la variation de la conductivité thermique d'un béton cellulaire autoclave. Groupe d'étude au laboratoire des transferts en hydrologie et environnement, 1995.
- [10] MEUKAM P., JANNOT Y., NOUMOWE A. and KOFFANE T.C. Thermo physical characteristics of economical building materials. *Construction and Building Materials* Vol 18 pp. 437-443. 2004.
- [11] NGOHE EKAM P.S. "Etude expérimentale des propriétés thermophysiques des bois tropicaux". Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon I, France. 1992
- [12] ARBOLOR (éditeur)-Le bois matériau d'ingénierie. Texte rassemblé par PHILIPPE JODIN (1994)
- [13] ŞAHİN, H., The transverse thermal conductivity coefficients of some hardwood species grown in Turkey. *Forest Product Journal* 59(10): 58–63, 2009.