

Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie

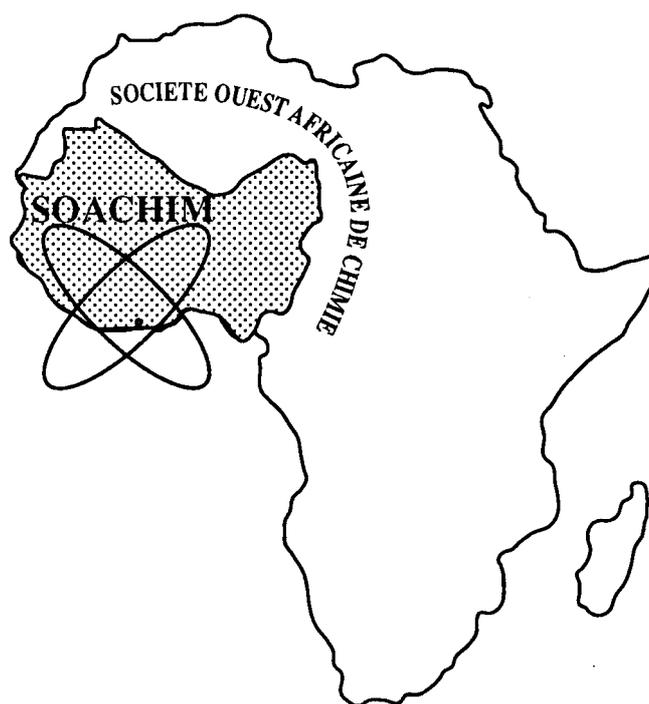
J. Soc. Ouest-Afr. Chim.

Code Chemical Abstracts : JSOCF2

Cote INIST (CNRS France) : <27680>

ISSN 0796-6687

16^{ème} Année, Décembre 2011, N° 032



Site Web: <http://www.soachim.org>

Etude expérimentale, par la méthode du plan chaud, des propriétés thermophysiques d'un bois tropical et d'un panneau isolant formulé avec des intrants locaux

D.Y.K. Toguyeni^{1*}, J.D.Bathiebo², J. Kouliati¹

¹Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement (LPCE), Université de Ouagadougou, Burkina-Faso

²Laboratoire d'Energies Thermiques Renouvelables (LETRE), Université de Ouagadougou, Burkina – Faso

(Reçu le 01/08/2011 – Accepté après corrections le 15/11/2011)

Résumé : L'étude porte sur la caractérisation thermique d'un bois blanc tropical appelé *Triplochiton scleroxylon* et d'un panneau isolant confectionné avec de la chaux et des fibres végétales de l'hibiscus *sabdariffa*. Il s'agit plus spécifiquement de la détermination par la méthode du plan chaud de l'effusivité, de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique et de la capacité calorifique de ces matériaux. L'analyse des thermogrammes étant basée sur l'hypothèse que dans la configuration expérimentale les échantillons analysés sont assimilables à des milieux semi-infinis, nous avons eu recours à une modélisation des transferts thermiques bidimensionnels dans un tricouche (matériau + air + isolant) et à la simulation sur COMSOL afin de juger de la pertinence de cette hypothèse. Dans le cas du bois blanc une analyse de la dépendance de l'effusivité avec la teneur en eau est proposée.

Mots clés : Effusivité, conductivité thermique, méthode du plan chaud, quadripôle thermique, transferts thermiques, bois tropical.

Experimental study, by the hot-plate method, of thermophysical properties of tropical wood and an insulating board made with local inputs.

Summary: The study focuses on the thermal characterization of a tropical white wood called *Triplochiton scleroxylon* and an insulating board made with lime and vegetable fibers of the hibiscus *sabdariffa*. It is more specifically about the determination by the method of the hot plan of the effusivity, the thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of these materials. The analysis of the thermograms being based on the assumption that in the experimental configuration the analyzed samples are comparable to semi-infinite mediums, we used a two-dimensional modeling of heat transfer in a three-layer (material + air + insulation) and the COMSOL simulation to determine the relevance of this hypothesis. In the case of a white wooden analysis of the dependence of the effusivity with the water content is proposed.

Keywords: Effusivity, thermal conductivity, hot-plate method, thermal quadrupoles, heat transfers, tropical wood.

* Auteur correspondant : togyen@univ-ouaga.bf, togyen@yahoo.fr

1. Introduction

L'isolation thermique joue un rôle fondamental pour la réduction des consommations énergétiques et également pour créer un espace de vie sain et plus confortable. Dans les pays tempérés, l'isolation thermique, en hiver, permet de garder la chaleur à l'intérieur des maisons et donc de limiter les déperditions thermiques du bâtiment. Dans les pays à climat tropical comme le Burkina-Faso, l'isolation permet de limiter le flux de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment, contribuant ainsi à la réduction des dépenses dues à la climatisation. Aujourd'hui, il existe dans le commerce un grand nombre d'isolants et bien souvent, le choix n'est pas toujours évident. Pourtant chaque isolant est caractérisé par un ensemble de propriétés physiques bien précises qui permettent à la fois de les comparer entre eux et de définir leur application la plus appropriée. Nous pouvons dissocier deux types de propriétés

- Les caractéristiques statiques comme la conductivité thermique, la capacité thermique.

- Les caractéristiques dynamiques comme la

diffusivité thermique et l'effusivité thermique qui déterminent le comportement d'un matériau en fonction de son temps de réaction.

Nous présentons ici la méthode du plan chaud que nous appliquons à la détermination de l'effusivité, de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique et de la capacité calorifique :

- D'une essence de bois tropical : un bois blanc, *Triplochiton scleroxylon* (Samba ou Wawa).

- Un panneau isolant confectionné avec de la chaux (24%) , du ciment(6%) , de l'eau (50%) des fibres végétales de *l'hibiscus sabdariffa* (16%), arbre très répandu au burkina Faso et de la bagasse de canne à sucre (4%).

Le choix de ces deux matériaux se justifie par le fait que:

- Le bois est un matériau poreux et hygroscopique très utilisé dans de nombreux domaines dont celui du Génie civil. Il est biodégradable, durable, présente une assez bonne tenue au feu en conservant plus longtemps que l'acier ses capacités porteuses. Même si dans les pays sahéliens, les constructions de maison en bois sont quasi inexistantes, il reste malgré tout un matériau de choix pour les plafonds des maisons d'habitation. Des travaux de recherche sur les essences de bois tropical, à notre connaissance ont porté la plupart du temps sur la détermination des propriétés thermo-hygro-mécaniques [1-3].

- Le panneau isolant fabriqué avec des intrants locaux s'il s'avère performant thermiquement est susceptible d'offrir des solutions alternatives et durables aux importations massives de matériaux de construction.

Le modèle du quadripôle thermique grâce auquel nous faisons l'exploitation des thermo grammes expérimentaux étant basée sur l'hypothèse d'un transfert thermique par conduction unidirectionnel dans un milieu semi-infini, nous avons modélisé les transferts thermiques conductifs bidimensionnels dans un matériau composite et simulé avec le logiciel COMSOL afin d'étudier la validité du modèle, c'est dire que le milieu peut être tenu pour semi-infini et le transfert conductif, unidirectionnel.

2. Méthode et matériel

2.1 Méthode du plan chaud

La méthode du plan chaud permet de déterminer l'effusivité thermique du matériau.

Le principe est le suivant :

- un flux de chaleur uniforme (ϕ_1) est imposé, d'une résistance chauffante, à l'interface de deux échantillons symétriques d'épaisseur quelconque et d'extension infinie dans la direction perpendiculaire à l'interface. Les échantillons sont assimilables à un milieu semi infini si le rapport de leur longueur à

l'épaisseur de l'élément chauffant est supérieur à 20. Par ailleurs, les faces latérales des deux échantillons sont isolées et le transfert peut être considéré comme unidirectionnel. L'évolution de la température $T_0(t)$ de la résistance chauffante est mesurée dans le plan du chauffage par un thermocouple. Le comportement asymptotique aux temps longs (20 mn), du thermogramme ainsi obtenu, est proportionnel à la racine carrée du temps, le coefficient de proportionnalité (β) étant directement relié à l'effusivité (E) des échantillons. Le comportement aux temps courts est influencé par l'inertie thermique de la sonde (élément chauffant + thermocouple) et par la résistance de contact sonde-milieu.

➤ On applique ensuite une méthode d'optimisation de paramètres pour calculer les valeurs de :

- l'effusivité thermique $E = \frac{\varphi_1}{\beta\sqrt{\pi}}$ et la

conductivité thermique k_1 du matériau à caractériser,

- la capacitance thermique (mc)_s de l'ensemble sonde + résistance chauffante,
- les résistances de contact R_{c1} à l'interface sonde/échantillon et R_{c2} à l'interface échantillon / matériau connu, qui minimisent l'écart entre les courbes $T_0(t)$ théoriques et expérimentales [1,3,7].

En sus de cette approche plus traditionnelle de la méthode du plan chaud, nous avons

systématiquement enregistré les thermogrammes aux temps longs pour lesquels, éventuellement un régime permanent caractérisé par un différentiel de température $\Delta T = T_1 - T_2$ (figure 1) entre les deux faces du matériau à caractériser s'instaure. Il s'ensuit les relations ci-dessous, qui permettent de calculer, l'effusivité (E), la conductivité thermique (k_1) et la capacité calorifique (c) :

$$E = \frac{\varphi_1}{\beta\sqrt{\pi}}, \quad k_1 = \frac{\varphi_1 \cdot L_1}{\Delta T}, \quad \alpha = \frac{k_1^2}{E^2}.$$

Les écarts relatifs sont donnés par les formules ci-dessous :

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta\varphi_1}{\varphi_1} + \frac{\Delta\beta}{\beta},$$

$$\frac{\Delta k_1}{k_1} = \frac{\Delta\varphi_1}{\varphi_1} + \frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T} + \frac{\Delta L_1}{L_1}$$

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = 2\left(\frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta k_1}{k_1}\right)$$

Les éléments du dispositif expérimental sont montrés dans la **figure 2**.

Du fait de l'hygroscopicité du bois et des panneaux isolants, si l'on veut faire des essais qui soient non destructifs et qui n'entraînent pas le séchage, la densité de flux thermique doit être très en dessous des flux critiques d'ignition ou bien les temps d'expérimentation doivent être courts pour maintenir constante la teneur en eau des matériaux [4].

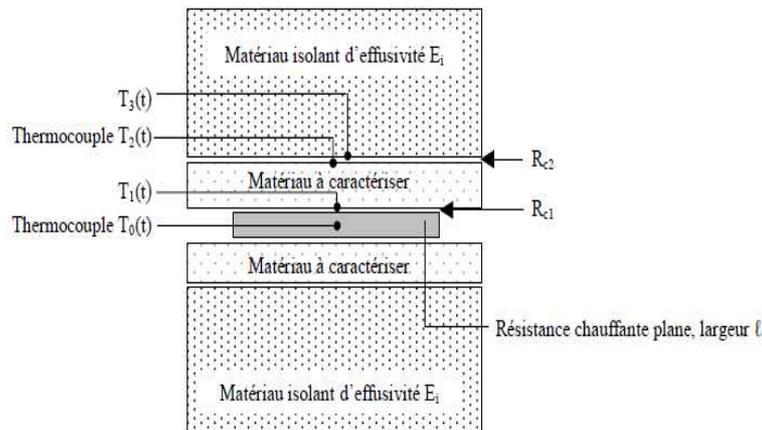


Figure 1 : Vue plane du dispositif expérimental dans la méthode du plan chaud



Enceinte calorifugée



Enceinte et accessoires



Acquisition des données

Figure 2 : Dispositif expérimental

Etant donné que nous avons pris le parti d'étudier l'influence de la teneur en eau sur les propriétés thermo physiques de l'essence de bois tropical, il nous a fallu au préalable déterminer la gamme des densités de flux thermique adéquate [5].

2.2 Modélisation du transfert de chaleur

La **figure 1** montre la disposition des couches de matériaux de part et d'autre de la résistance chauffante. Compte tenu de la symétrie géométrique nous sommes amenés à considérer un matériau composite qui est un tri-couche : le matériau à caractériser, une lame d'air et enfin un isolant (polystyrène). Une partie de la demi-puissance calorifique produite par la résistance, $\delta \cdot \varphi_0 S$ ($0 < \delta < 1$)

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T}{\partial t} = k_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (I)$$

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T}{\partial t} = k_2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (II)$$

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T}{\partial t} = k_3 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (III)$$

$$-k_1 \frac{\partial T}{\partial x} = \varphi_1 = \delta \cdot \varphi_0, \quad x=0 \text{ et } 0 < y < H \quad (1)$$

$$k_1 \frac{\partial T}{\partial x} = k_2 \frac{\partial T}{\partial x}, \quad x=L_1 \text{ et } 0 < y < H \quad (2)$$

$$k_2 \frac{\partial T}{\partial x} = k_3 \frac{\partial T}{\partial x}, \quad x=L_1+L_2 \text{ et } 0 < y < H \quad (3)$$

diffuse dans le matériau composite, successivement, dans le matériau, la lame d'air et l'isolant (**Figure 4**).

Pour apprécier la validité de l'hypothèse d'un transfert unidirectionnel dans un milieu semi-infini (matériau à caractériser) que fait le modèle du quadripôle thermique nous considérons que :

- le transfert est conductif et bidimensionnel (équations I, II et III).

- Les conditions limites sont de type Neumann, c'est-à-dire à flux imposé.

Nous sommes amenés à considérer qu'une partie de la densité de flux délivrée par la résistance est dissipée dans la boîte contribuant aux échanges du tri-couche en $y = H$ (équations 8,9 et 10).

Aux interfaces matériau-air et air-isolant il y a continuité de flux (équations 2 et 3).

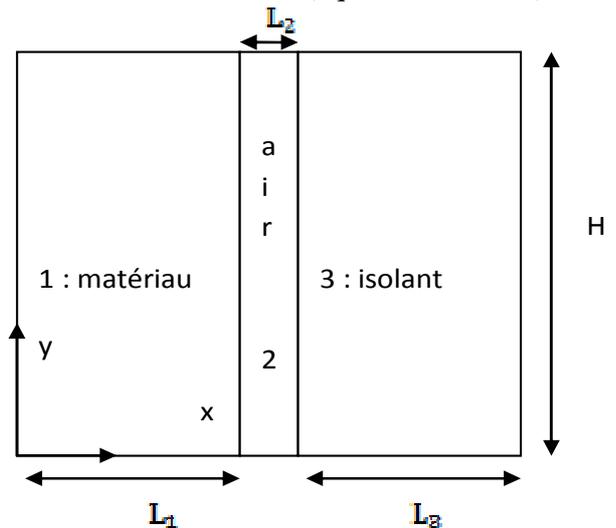


Figure 3: Tri-couche: matériau, air, isolant

$$-k_3 \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad x = L_1 + L_2 + L_3 \text{ et } 0 < y < H \quad (4)$$

$$-k_1 \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad 0 < x < L_1 \quad y = 0 \quad (5)$$

$$-k_2 \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad L_1 < x < L_1 + L_2 \quad y = 0 \quad (6)$$

$$-k_3 \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad L_1 + L_2 < x < L_1 + L_2 + L_3 \text{ et } y = 0 \quad (7)$$

$$k_1 \frac{\partial T}{\partial y} = \varphi_2 = h_4(T - T_{ext}), \quad 0 < x < L_1 \text{ et } y = H \quad (8)$$

$$k_2 \frac{\partial T}{\partial y} = \varphi_2 = h_4(T - T_{ext}), \quad L_1 < x < L_1 + L_2 \text{ et } y = H \quad (9)$$

$$k_3 \frac{\partial T}{\partial y} = \varphi_2 = h_4(T - T_{ext}), \quad L_1 + L_2 < x < L_1 + L_2 + L_3 \text{ et } y = H \quad (10)$$

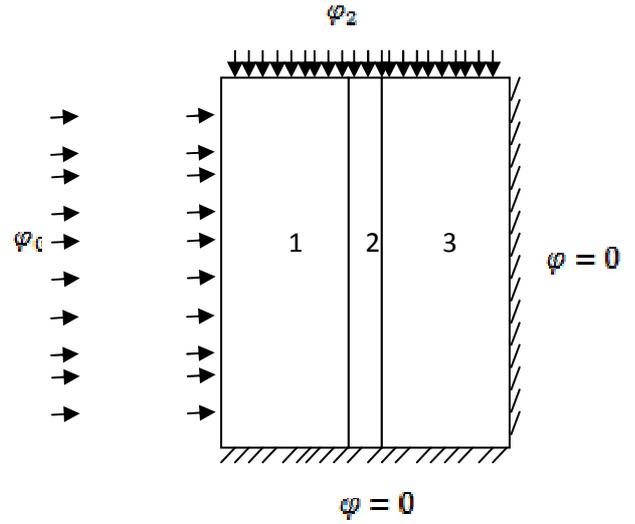


Figure 4: Conditions aux limites

D'après l'étude intitulée « Diagnostic et améliorations thermiques de l'enveloppe des bâtiments »^[6], le coefficient de convection pour des couches d'air non ventilé horizontales d'une épaisseur égale à 20 mm est $h_4 = 6.67 \text{ W/m}^2\text{K}$. Les dimensions du tri-couche sont : $L_1 = 3 \text{ cm}$, $L_2 = 1 \text{ mm}$, $L_3 = 3,5 \text{ cm}$, $H = 26 \text{ cm}$.

3. Résultats et analyse

Des expériences préliminaires ont été faites pour fixer les valeurs maximales de la densité de flux qui ne modifient pas la teneur en eau des matériaux. Il a été montré que pour l'essence tropicale de bois le *Triplochiton scleroxylon* (Samba ou Wawa), la densité de flux φ_{\max} ne doit pas excéder 254 W/m^2 . Pour l'isolant formulé à partir d'intrants locaux, la densité de flux maximale φ_{\max} ne doit pas dépasser $63,5 \text{ W/m}^2$. La teneur en eau des bois dits secs est de l'ordre de 12%. Pour l'étude du bois à teneur nulle, il nous a fallu sécher

pendant 24 heures dans une étuve portée à 100°C . Les expériences s'étant déroulées aux mois d'août et septembre caractérisés par une humidité relative (HR) variant entre 75% et 95%, en laissant reposer les échantillons séchés en étuve, ils se réhydratent, certes lentement. Il nous a fallu quelques fois recourir à un trempage pendant 24 à 48h pour atteindre des teneurs en eau conséquentes (12 à 20%).

Les évolutions des écarts $T_0(t) - T_0$ en fonction de la densité de flux φ_0 de la résistance chauffante sont montrées dans la figure 5. L'écart quadratique entre les écarts $T_0(t) - T_0$ analytiques et expérimentaux varie entre $6 \cdot 10^{-3}$ et $2 \cdot 10^{-2}$. En appliquant la méthode d'optimisation de l'effusivité par la minimisation de l'écart quadratique on trouve les valeurs optimisées des paramètres thermophysiques pour $\varphi_0 = 28,22 \text{ W/m}^2$ que nous avons consignées dans le **tableau I**.

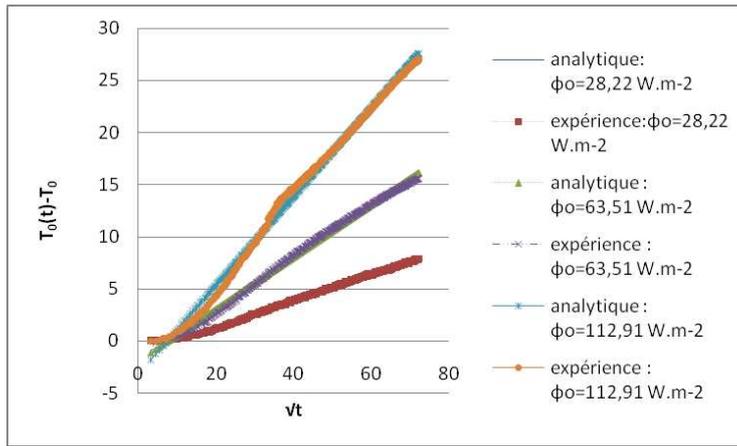


Figure 5 : Comparaison des thermogrammes analytiques et expérimentaux

Tableau I : Propriétés thermophysiques du panneau isolant

Masse volumique (kg/m ³)	Effusivité (J.m ⁻² .°C ⁻¹ .s ^{-1/2})	Conductivité (w.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	Capacité calorifique (J/°C ⁻¹ kg ⁻¹)	Diffusivité (m.s ⁻²)
351,55	245,13	0,35	498,17	2,053E-06

Pour étudier la validité des hypothèses d'un transfert unidirectionnel de chaleur dans un milieu semi-infini, nous avons simulé sur COMSOL Multiphysics en utilisant les propriétés du **tableau I**. Des ajustements numériques nous ont permis de fixer la fraction de densité, δ , délivrée

par la résistance chauffante à 0,45. Les figures 6a et 6b nous montrent les résultats pour $t = 100s$ et $1200s$. Il apparaît clairement qu'à part les effets de bord (frontière $y = H$), la conduction de chaleur est unidirectionnelle dans le matériau qui peut être considéré comme semi-infini.

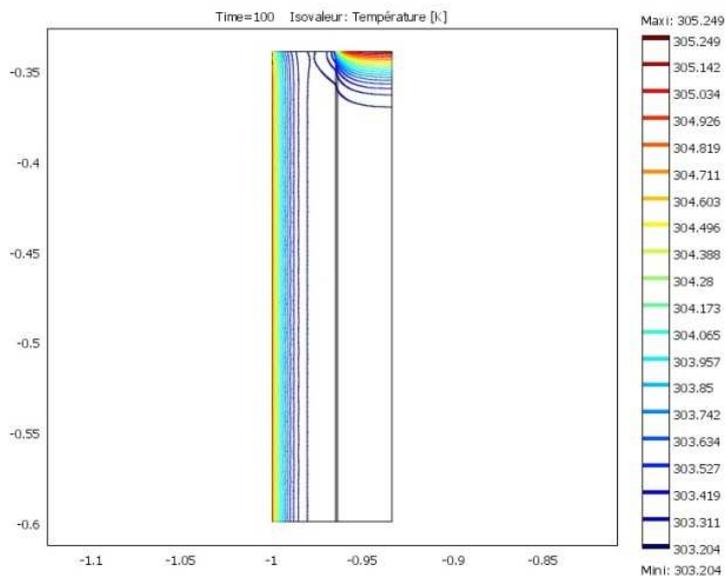


Figure 6a : Isothermes dans le tri-couche avec le panneau isolant à $t = 100s$

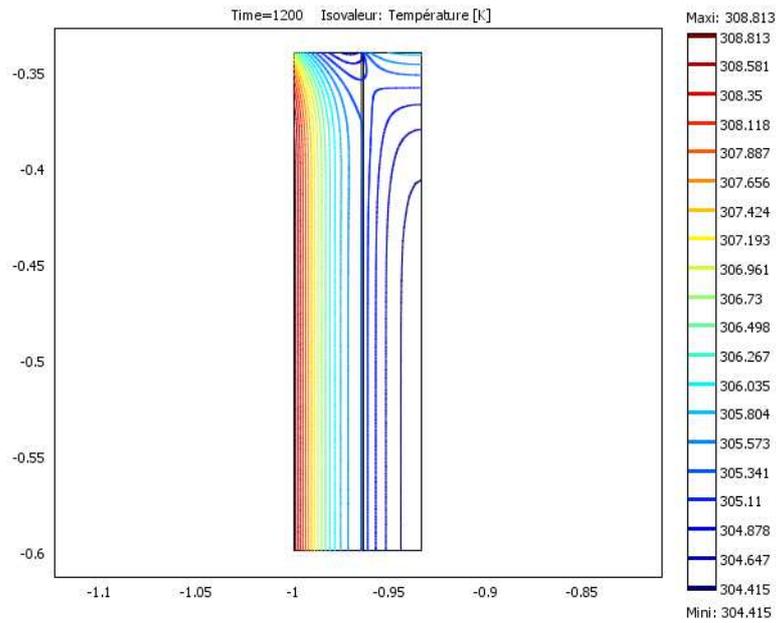


Figure 6b : Isothermes dans le tri-couche avec le panneau isolant à $t = 1200s$

L'excellent accord entre les thermogrammes expérimentaux et analytiques en ce qui concerne le panneau isolant, nous a permis d'étudier le comportement du bois tropical. Nous avons consigné les résultats dans la **figure 7**. Le bois blanc est relativement léger puisque sa masse volumique moyenne est $\rho = 372 \text{ kg/m}^3$. L'ensemble des propriétés thermophysiques déterminées pour une densité de flux $\varphi_0 = 63,51 \text{ W/m}^2$ est résumé dans le **tableau II**.

Les écarts relatifs maximums sur la détermination des propriétés thermophysiques sont donnés dans le **tableau III**.

A nouveau, pour apprécier la validité de l'hypothèse du transfert unidirectionnel en milieu semi-infini, nous utilisons les paramètres thermophysiques correspondant à une teneur en eau de 9,61% du tableau 2. Il apparaît clairement (figure 8a) que hormis les effets de bord (supérieur), l'hypothèse est bien vérifiée pour les 100 premières secondes. La figure 8b indique que la chaleur a diffusé dans toutes les épaisseurs du tri-couche.

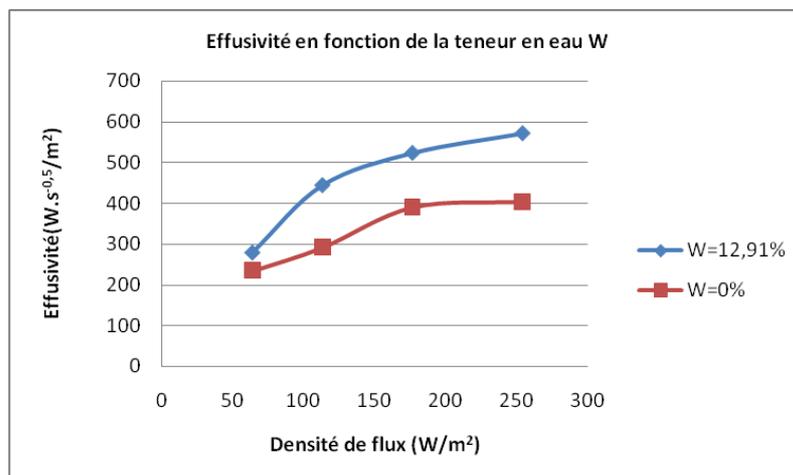


Figure 7 : Effusivité en fonction de φ_0 du bois blanc sec

Tableau II : Propriétés thermophysiques du bois blanc

Teneur en eau %	Effusivité ($J.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}.s^{-1/2}$)	Conductivité ($w.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)	Diffusivité ($m.s^{-2}$)
9,61	245,24	0,217	7,83E-07
12,91	278,39	0,522	3,52E-06
19,22	335,13	0,526347016	2,4667E-06

Tableau III : Ecart relatifs maximums sur les propriétés thermophysiques du bois blanc

Ecart relatifs des propriétés thermophysiques	$\frac{\Delta E}{E}$	$\frac{\Delta k_1}{k_1}$	$\frac{\Delta \alpha}{\alpha}$
		$\leq 7\%$	$\leq 23\%$

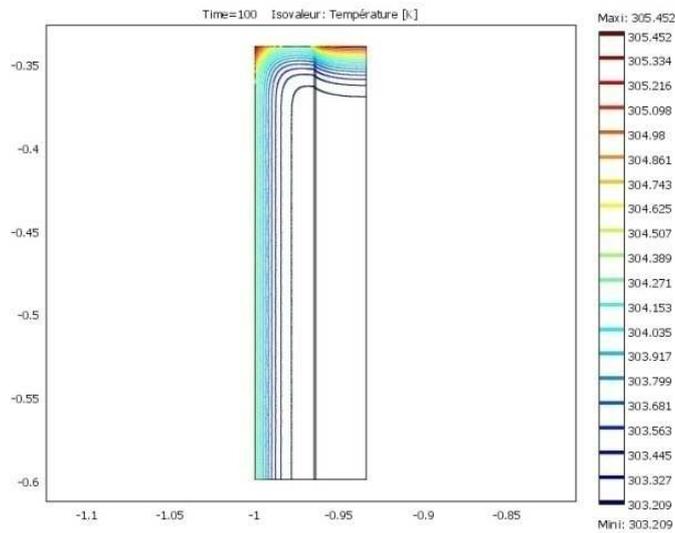


Figure 8a : Isothermes dans le tri-couche avec le bois blanc à t = 100s

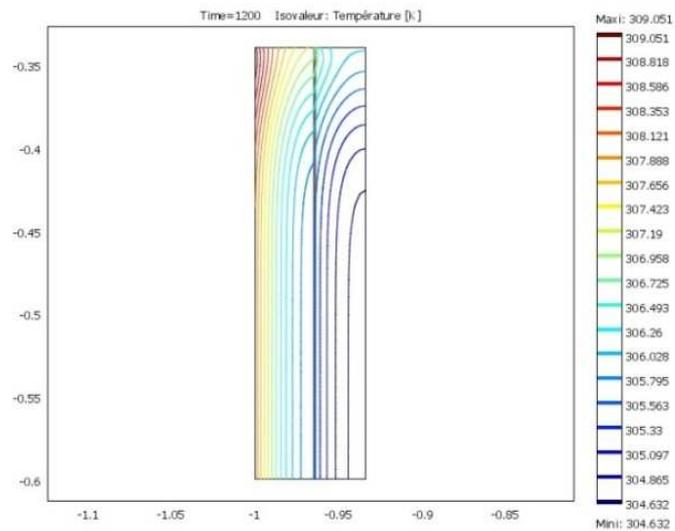


Figure 8b : Isothermes dans le tri-couche avec le bois blanc à t = 1200s

4. Conclusion

L'étude nous a conduits à déterminer les propriétés thermophysiques d'un panneau isolant confectionné avec de la chaux et des fibres végétales de l'hibiscus sabdariffa, arbre très répandu au Burkina Faso et du bois blanc tropical, le *Triplochiton scleroxylon* ou Wawa par la méthode du plan chaud. Afin de s'assurer que les essais sont non destructifs nous avons déterminé, expérimentalement, les densités maximales de flux à délivrer par la résistance chauffante. Ce flux maximal est $\varphi_{\max} = 254 \text{ w/m}^2$ pour le bois Samba et $\varphi_{\max} = 63,5 \text{ w/m}^2$ pour le panneau isolant. Pour une valeur de la densité du flux $\varphi_0 = 28,22 \text{ W/m}^2$ nous avons déterminé l'effusivité et la conductivité du panneau isolant, à l'aide des thermogrammes en phases instationnaire et stationnaire, puis avons utilisé la méthode d'optimisation de l'effusivité par la minimisation de l'écart quadratique pour trouver la valeur optimisée de l'effusivité $E = 245,13 \text{ J.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$. A l'aide de la modélisation bidimensionnelle du transfert de chaleur par conduction dans un milieu tri-couche constitué du matériau à caractériser, une lame d'air et du polystyrène, nous avons pu vérifier que l'hypothèse du milieu semi-infini et du transfert unidirectionnel utilisée par la méthode du plan chaud est vérifiée pendant la durée nécessaire à l'acquisition du thermogramme instationnaire. Nous avons pu montrer, en étudiant l'influence de la teneur en eau dans le bois Wawa ainsi que de la densité de flux de résistance, que l'effusivité, la conductivité, la diffusivité sont d'autant plus élevées que la teneur en eau et la densité sont grandes.

Remerciements: Les auteurs remercient Monsieur Jean-Hugues THOMASSIN, Professeur émérite pour leur avoir confié les panneaux isolants pour une caractérisation thermique.

Bibliographie

- [1] Bardet S., Gril J., Modelling the transverse viscoelasticity of green wood using a combination of two parabolic elements, Comptes Rendus Mécanique, (2002), vol. 330, 8, 549-556.
- [2] Clair B., Ruelle J., Thibaut B. Relationship between growth stresses, mechano-physical properties and proportion of fibres with gelatinous layer in chestnut (*Castanea Sativa* Mill.), *Holzforschung*, 2003, vol. 57, 2, 189-195.
- [3] Kouchade A.C., Détermination en routine de la diffusivité massique dans le bois par méthode inverse à partir de la mesure électrique en régime transitoire, Thèse soutenue publiquement le 23 septembre 2004 à l'ENGREF, Centre de Nancy, 138 pages
- [4] Chereches M. et al., Etude Expérimentale sur la Conductivité Thermique des Matériaux Humides, XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Nancy, 4 au 6 juin 2008, 8 pages.
- [5] Institut National de Développement de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôts, DRA - FMs/FMs - 2001 - P25430, 48 pages
- [6] Crabbé Claude, Diagnostic et améliorations thermiques de l'enveloppe des bâtiments, Séminaire des 03 et 10 mai 2007, 262 pages.
- [7] D.Y.K. Toguyeni et F. Zoma, Thermal characterization of cement mortar and roofing insulation boards and study their performance in a typical building of a tropical dry climate, The 4th IUPAP International Conference On Women in Physics 05 - 08 April 2011, page 174, South Africa.