

Détermination de la conductivité thermique d'une plaque isolante fabriquée par le ciment et les fibres de palmier : Modélisation et expérimentation

Ines AMARA , Ines BOULAOUED , Maryem BAHLOUL, Abdallah MHIMID

ines.amara@live.fr
ines_boulaoued_01@yahoo.fr
maryem.bahloul@gmail.com
abdmhmid@yahoo.fr

*Laboratoire d'Etudes des Systèmes Thermiques et Energétiques (LESTE)
Avenue Ibn Jazzar, 5019 Ecole Nationale d'ingénieur de Monastir, Tunis.
Université de Monastir*

Résumé— Ce travail porte sur l'étude des propriétés thermophysiques notamment la conductivité thermique effective des matériaux composites. Les matériaux étudiés sont constitués des fibres de palmier dattier dispersées dans une matrice de ciment, à différents taux massiques allant de 5% à 60%. Une confrontation entre les résultats expérimentaux et les valeurs théoriques tirées des différents modèles sont étudiés (modèle série, modèle parallèle et modèle de Krischer).

Mots clés— *Conductivité thermique effective; ciment; Fibres de palmier; modélisation et mesure.*

I. INTRODUCTION

De nos jours, la caractérisation des matériaux composites demeure, par excellence, la tâche qui occupe le plus grand intérêt dans un processus industriel. C'est ainsi la nécessité de mettre en place et développer des outils de mesures et des codes de calcul menés au sein des entreprises servant à améliorer les performances des matériaux et en lui empêchant d'évoluer dans un sens inconnu ou imprévu. L'un des matériaux qui attire l'attention de tous les industriels de tous les domaines physiques et thermophysiques, comme par exemple les domaines nucléaire et aéronautique, est celui utilisé à la construction. Une telle augmentation vient du fait

qu'il est possible de développer de nouveaux matériaux avec des propriétés adaptées à une application bien précise. Ces matériaux permettent de combiner les propriétés physiques des différents matériaux utilisés pour leur fabrication. Dans ce travail, nous nous intéressons seulement à l'étude du comportement thermophysique de composites constitués de fibres naturelles dans une matrice polymère. Le problème de la détermination des valeurs de la conductivité thermique des matériaux composites à base de fibres naturels et d'autres matériaux (matrices) a fait l'objet de nombreuses études bibliographiques, permettant de caractériser ses propriétés thermiques afin de les intégrer et les utiliser dans les applications de bâtiment.

Driss Taoukil et al. [1] ont examiné les potentiels d'isolation thermique de l'incorporation de la laine de bois dans un mortier de sable, afin de valoriser l'utilisation de ce type de matériaux allégés comme un béton léger isolant. Il a été montré d'après leur travail que l'incorporation de laine de bois dans le mortier diminue considérablement sa conductivité

thermique et sa densité. D'autre part, ils ont remarqué que la conductivité thermique de mortier renforcée par la laine de bois a été fortement influencée par la teneur en eau du matériau. Même comportement a été remarqué par A. Djoudi et al. [2] qui ont étudié l'utilisation d'un nouveau matériau composite de construction de plâtre, sable, gravier concassé et les fibres de palmier dattier. Les auteurs ont prouvé également une diminution de la conductivité thermique en fonction des taux massiques des fibres végétales. Une autre étude a été effectuée par I. Boulaoued et al [3], qui ont caractérisé expérimentalement les propriétés thermiques des isolants en utilisant la méthode des boîtes. Les résultats montrent que la conductivité thermique décroît en fonction du taux des fibres. Bederina et al. [4] ont étudié l'effet de l'ajout de copeaux de bois sur les propriétés thermiques de béton de sable. Leurs résultats montrent que l'ajout de copeaux de bois réduit la densité du matériau et améliore la conductivité thermique. F. Barreca et al. [5] proposent l'utilisation de la pierre d'olive afin d'améliorer les performances d'isolation thermique de mortier de ciment et de réduire sa densité finale. Ils ont montré que l'ajout de 70% du poids sec de la pierre d'olive a permis de réduire la conductivité thermique de mortier de ciment. D'après leurs études, ils ont constaté que les caractéristiques thermophysiques améliorées résultant de l'addition des pierres d'olive au ciment permettent l'utilisation de ces matériaux comme des composants de construction.

L'objectif de ce travail, porte d'une part sur la modélisation de la conductivité thermique d'un matériau composite constitué de fibres de palmier dattier dans une matrice de ciment et de discuter l'influence de la concentration des fibres de palmier dattier sur la conductivité thermique de ce bio composite. Les résultats obtenus sont être comparés aux résultats théoriques.

II. ETUDE EXPERIMENTALE

A. Préparation des échantillons

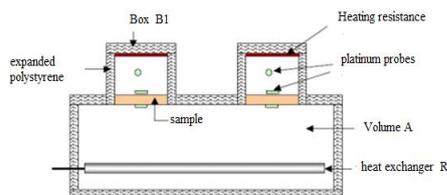
On a réalisé des nouvelles briques isolantes fabriquées localement en mélangeant les fibres de palmier dans une

matrice cimentaire avec les fraction massique suivantes 5,20, 30, 40 et 60%. [6], [7].

B. Description du dispositif et mode opératoire

Le dispositif de mesure utilisé, est basé sur la méthode des boîtes [3]. Ce dispositif représente par la figure 2. Il est formé d'un volume (A), jouant le rôle d'une ambiance froide, et de deux boîtes (B1) et (B2) où règne une ambiance chaude. Ces deux boîtes vont permettre de mesurer simultanément la conductivité thermique de deux échantillons placés respectivement entre chacune des boîtes et le volume (A). L'échantillon doit être de forme parallélépipédique de 27 cm de côté et d'épaisseur comprise entre 2 et 7 cm. Le volume (A), de dimension $1.81 \times 0.74 \times 0.26 \text{ m}^3$, est fortement isolé grâce au polystyrène expansé. Il contient un échangeur de chaleur (R) alimenté par de l'eau glycolée à température régulée. Les deux boîtes (B1) et (B2) sont équipées d'éléments chauffant de puissance faible et réglable à l'aide d'un autotransformateur variable.

Fig. 1. Schéma représentatif de la méthode des boîtes



Le principe de cette méthode consiste à réaliser un flux de chaleur unidirectionnel à travers l'échantillon. Cette chaleur est générée par la résistance électrique de chauffage qui a pour expression :

$$Q = \frac{U^2}{R} \quad (1)$$

Une partie de cette quantité de chaleur est transmise par conduction à travers l'échantillon et le reste est perdu par les parois latérales ;

Une fois le régime permanent est atteint, on relève les températures et la tension aux bornes de la résistance chauffante pour déterminer la conductivité thermique à l'aide de l'expression suivante :

$$\lambda_{ex} = \frac{e}{A(T_c - T_f)} \left(\frac{U^2}{R} - C(T_b - T_a) \right) \quad (2)$$

Avec :

T_c : Température de la face chaude de l'échantillon, K

T_f : Température de sa face froide, K

T_b : Température de la boîte, K

T_a : Température ambiante de la salle, K

C est le coefficient global de déperdition thermique déterminé expérimentalement avec un échantillon de référence dont la conductivité thermique λ est connue. Plusieurs mesures ont été réalisées avec différents échantillons de référence pour obtenir la valeur de C (le coefficient est $C=0.16W/K$).

III. MODELISATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE EFFECTIVE

D. MODÉLISATION

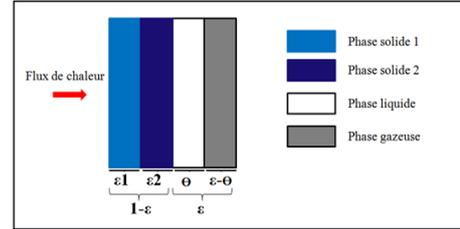
La conductivité thermique de l'échantillon dépend des différents constituants (solide1, solide2, gaz et liquide).

1) Modèle série:

On suppose que le matériau est formé d'une matrice solide 1 (ciment) d'une autre matrice solide 2 (fibres de palmier dattier). Dans ce matériau, le vide est représenté par des pores remplis exclusivement avec de l'air et de l'eau. Durant ce

travail on suppose que le milieu considéré est formé des volumes identiques. Chaque volume est formé de 4 couches comme le montre la Fig. 2. Soient e_1, e_2, e_l et e_g les épaisseurs des différentes couches de résistances thermiques R_{s1}, R_{s2}, R_l, R_g et de coefficients de conductivité thermique $\lambda_{s1}, \lambda_{s2}, \lambda_l$ et λ_g .

Fig. 2. Modèle série



La résistance thermique effective du matériau considéré est R_T , de coefficient de conductivité thermique λ_{effsr} , d'épaisseur e et de surface S perpendiculaire au flux thermique q . on écrit :

$$R_T = R_{s1} + R_{s2} + R_l + R_g \quad (3)$$

Par conséquent la conductivité thermique effective s'écrit finalement sous la forme

$$\lambda_{effsr} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{s1}} \frac{e_1}{e} + \frac{1}{\lambda_{s2}} \frac{e_2}{e} + \frac{1}{\lambda_l} \frac{e_l}{e} + \frac{1}{\lambda_g} \frac{e_g}{e}} \quad (4)$$

Tenant compte des pourcentages des différents constituants de l'échantillon ($\varepsilon_{s1} = \frac{e_1}{e}, \varepsilon_{s2} = \frac{e_2}{e}, \varepsilon_l = \frac{e_l}{e}, \varepsilon_g = \frac{e_g}{e}$)

L'expression (4) s'écrit :

$$\lambda_{\text{effsr}} = \frac{1}{\frac{\varepsilon_{s1}}{\lambda_{s1}} + \frac{\varepsilon_{s2}}{\lambda_{s2}} + \frac{\varepsilon_l}{\lambda_l} + \frac{\varepsilon_g}{\lambda_g}} \quad (5)$$

Le pourcentage de la phase liquide et celui de la phase gazeuse s'écrivent en fonction de la porosité totale du matériau et de la teneur en eau comme suit

$$\varepsilon_l = \theta \quad (6)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon - \theta \quad (7)$$

On obtient finalement :

$$\lambda_{\text{effsr}} = \frac{1}{\frac{\varepsilon_{s1}}{\lambda_{s1}} + \frac{\varepsilon_{s2}}{\lambda_{s2}} + \frac{\theta}{\lambda_l} + \frac{(\varepsilon - \theta)}{\lambda_g}} \quad (8)$$

En introduisant le rapport massique entre le solide 1 et le solide 2 défini par :

$$R_m = \frac{m_{s2}}{m_{s1}} \quad (9)$$

L'expression de la conductivité thermique effective de l'échantillon devient

$$\lambda_{\text{effsr}} = \frac{1}{\left(\frac{1 - \varepsilon}{1 + R_m \frac{\rho_{s1}}{\rho_{s2}}} \right) \frac{1}{\lambda_{s1}} + \frac{1 - \varepsilon - \varepsilon_{s1}}{\lambda_{s2}} + \frac{\theta}{\lambda_l} + \frac{(\varepsilon - \theta)}{\lambda_g}} \quad (10)$$

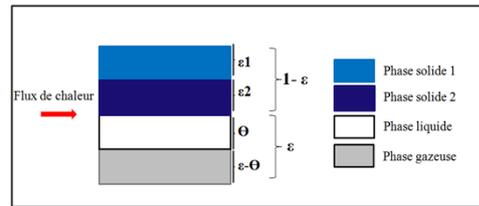
Lorsque le matériau est sec, on prend la teneur en eau nulle, l'expression de la conductivité thermique effective de l'échantillon devient :

$$\lambda_{\text{effsr}} = \frac{1}{\left(\frac{1 - \varepsilon}{1 + R_m \frac{\rho_{s1}}{\rho_{s2}}} \right) \frac{1}{\lambda_{s1}} + \frac{1 - \varepsilon - \varepsilon_{s1}}{\lambda_{s2}} + \frac{\varepsilon}{\lambda_g}} \quad (11)$$

2) Modèle parallèle

Le milieu considéré est toujours supposé formé des volumes identiques. Chaque volume est formé de 4 couches placées en parallèles comme le montre la Fig. 3. soient S_1 , S_2 , S_l et S_g les surfaces des différentes couches de résistances thermiques R_{s1} , R_{s2} , R_l , R_g et de coefficients de conductivité thermique λ_{s1} , λ_{s2} , λ_l et λ_g .

Fig. 3. Modèle parallèle



La résistance thermique effective du composite est R_T , de coefficient de conductivité thermique λ_{effp} , et d'épaisseur e et de surface S est :

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{s1}} + \frac{1}{R_{s2}} + \frac{1}{R_l} + \frac{1}{R_g} \quad (12)$$

On obtient par conséquent

$$\lambda_{\text{effp}} = \lambda_{s1} \frac{S_1}{S} + \lambda_{s2} \frac{S_2}{S} + \lambda_l \frac{S_l}{S} + \lambda_g \frac{S_g}{S} \quad (13)$$

Tenant compte des pourcentages des différents constituants de l'échantillon ($\varepsilon_{s1} = \frac{S_1}{S}, \varepsilon_{s2} = \frac{S_2}{S}, \varepsilon_l = \frac{S_l}{S}, \varepsilon_g = \frac{S_g}{S}$), l'expression (13) s'écrit :

$$\lambda_{\text{effp}} = \varepsilon_{s1}\lambda_{s1} + \varepsilon_{s2}\lambda_{s2} + \varepsilon_l\lambda_l + \varepsilon_g\lambda_g \quad (14)$$

De même en utilisant l'expression de la teneur en eau et la porosité totale du matériau, on obtient :

$$\lambda_{\text{effp}} = \varepsilon_{s1}\lambda_{s1} + \varepsilon_{s2}\lambda_{s2} + \theta\lambda_l + (\varepsilon - \theta)\lambda_g \quad (15)$$

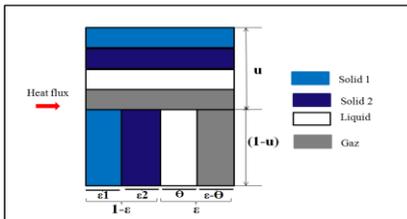
Lorsque le matériau est sec, on a la teneur en eau nulle, et l'expression de la conductivité thermique effective de l'échantillon prend la forme suivante

$$\lambda_{\text{effp}} = \varepsilon_{s1}\lambda_{s1} + \varepsilon_{s2}\lambda_{s2} + \varepsilon\lambda_g \quad (16)$$

3) Modèle de Krischer

Le modèle de Krischer(proposé en 1956) [9] modélise le matériau par une combinaison de résistances en série et en parallèle (Fig. 4).

Fig. 4. Modèle de Krischer



L'équation suivante présente le modèle de Krischer :

$$\lambda_{\text{effk}} = \frac{1}{\frac{u}{\lambda_{\text{effp}}} + \frac{(1-u)}{\lambda_{\text{effsr}}}} \quad (35)$$

Le paramètre noté u sur la figure tend vers 1, lorsque les résistances sont placées en parallèle uniquement. Inversement, si ce même paramètre tend vers 0, on a les résistances sont placées en série. Dans la réalité, le paramètre u, se situe entre ces deux valeurs. Avec λ_{effsr} et λ_{effp} représentent respectivement la conductivité thermique des couches disposées en série et celles disposées en parallèle.

DI. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie nous avons essayé de faire une synthèse sur les propriétés thermophysiques de certaines fibres de palmier et de ciment trouvées dans la littérature. D'après l'étude de Boodjemaa AGOODJI et al. [8] les propriétés thermiques des différentes variétés de bois de palmier dattier présentent des valeurs faibles dont la conductivité thermique varie entre 0.04 et 0.08 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Dans ce travail nous avons étudié le cas d'un mélange de fibres de palmier et du ciment dont la porosité globale $\varepsilon = 0.4$. Le ciment possède une masse volumique $\rho_{s1} = 3030 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et une conductivité thermique $\lambda_{s1} = 1.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [7]. Le matériau à base des fibres de palmier a une masse volumique $\rho_{s2} = 200 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et une conductivité thermique $\lambda_{s2} = 0.04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

La mesure de conductivité thermique est réalisée par la méthode des boîtes des plaques isolantes de dimension $(27*27*2) \text{ cm}^3$ à des taux massiques variant de 5% à 60% [7].

Le tableau I présente les différentes valeurs obtenues de la conductivité thermique en fonction du taux massique de fibres de palmier.

TABLE I. VALEURS MESURES DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

Rapport massique (%)	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
60	0.033
40	0.036
30	0.046
20	0.056
5	0.091

E. Validation de la simulation

La conductivité thermique calculée à partir du modèle de Krischer pour différentes valeurs de u est présenté en fonction du rapport massique dans le tableau II. Ces valeurs de la conductivité thermique effective qui sont calculées pour différentes valeurs de u (0,1 ; 0,25 ; 0,3 ; 0,5 ; 0,75) sont comparés avec celles obtenues expérimentalement.

TABLE II. DIFFÉRENTES VALEURS DE CONDUCTIVITÉ THERMIQUES

Rapport massique (%)	5	20	30	40	60	Erreur moyenne
$\lambda_{ex}(W.m^{-1}.K^{-1})$	0.091	0.056	0.046	0.036	0.033	-
$\lambda_{effK}(u=0.75)$	0.133	0.099	0.087	0.078	0.066	
$\frac{ \lambda_{ex} - \lambda_{effK} }{\lambda_{ex}}$	46.15	76.78	89.13	116.67	100	85.746
$\lambda_{effK}(u=0.50)$	0.076	0.064	0.06	0.057	0.052	
$\frac{ \lambda_{ex} - \lambda_{effK} }{\lambda_{ex}}$	15.38	14.28	30.43	58.33	57.57	41.732
$\lambda_{effK}(u=0.30)$	0.057	0.05	0.048	0.046	0.044	
$\frac{ \lambda_{ex} - \lambda_{effK} }{\lambda_{ex}}$	37.36	10.71	4.34	27.77	33.33	22.702
$\lambda_{effK}(u=0.25)$	0.054	0.047	0.045	0.044	0.042	
$\frac{ \lambda_{ex} - \lambda_{effK} }{\lambda_{ex}}$	40.65	16.07	2.17	22.22	27.27	21.676

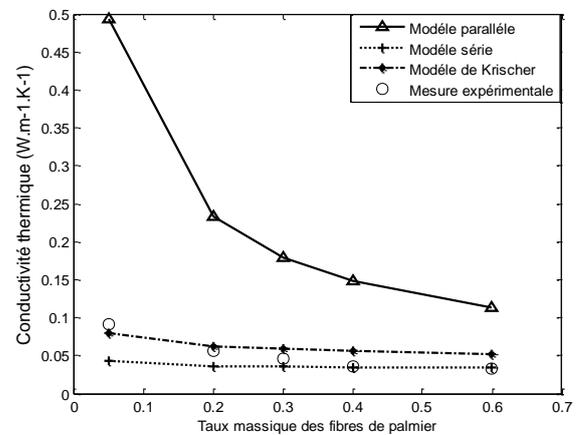
Rapport massique (%)	5	20	30	40	60	Erreur moyenne
$\lambda_{effK}(u=0.10)$	0.046	0.041	0.040	0.039	0.038	22.55
$\frac{ \lambda_{ex} - \lambda_{effK} }{\lambda_{ex}}$	49.45	26.78	13.04	8.33	15.15	

Cette étude montre que l'erreur relative moyenne calculée entre les valeurs théoriques et expérimentales est la plus petite pour u=0,25. Par la suite nous retenons l'expression les modèles théoriques suivantes : modèle série, modèle parallèle et le modèle de Krischer pour u=0,25.

F. Effet de la conductivité thermique effective en fonction du rapport massique Rm

Cette étude avait pour but de déterminer la conductivité thermique effective de composite renforcé par les fibres de palmier pour les concentrations de 5%, 30%, 40% et 60% à l'état sec à celle du ciment.

Fig. 5. Evolution de la conductivité thermique effective en fonction du pourcentage massique des fibres de palmier



A la Fig.5. On présente l'évolution de la conductivité thermique effective mesurée expérimentalement ainsi que celle obtenue théoriquement en appliquant le modèle série, le modèle parallèle et celui de Krischer (u=0.25).

Les résultats montrent que la conductivité thermique effective de matériau composite diminue avec l'augmentation de la concentration des fibres de palmier, alors leurs propriétés thermophysiques peuvent être améliorées en ajoutant la teneur en fibres de palmier. Ce qui nous permet de conclure que ce bi composite montre les bonnes performances thermiques qui lui permettent d'être appliqué en tant qu'un matériau d'isolation thermique.

Le premier apport tiré de cette comparaison serait de démontrer que quel que soit la conductivité thermique mesurée le modèle série et le modèle de Krischer prédit correctement les mesures expérimentales de la conductivité thermique, alors que le modèle parallèle ne prédit pas bien les valeurs expérimentales du composite étudié. On observe ainsi que l'évolution des valeurs du modèle mixte (de Krischer) sont toujours entre les bornes maximum (parallèle) et minimum (série). On voit clairement que les résultats du modèle de Krischer concordent mieux avec les résultats expérimentaux.

CONCLUSION

Ce papier présente le comportement thermophysique notamment la conductivité thermique effective de différents composites à base de ciment et des fibres de palmier. L'influence de la concentration de fibres sur la conductivité thermique.

Nous avons conclu que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la concentration des fibres, en effet l'échantillon devient plus isolant lorsque la quantité des fibres augmente.

Références

- [1] Driss Taoukil, Abdelmajid El bouardi, Friedrich Sick, Abdelaziz Mimmet, Hassan Ezbakhe, Taib Ajzoul, "Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood-concrete composite", *Construction and Building Materials*, 48 (2013) 104-115.
- [2] A. Djoudi, M.M. Khenfer , A. Bali , E.H. Kadri and G. Debicki, "Performance of date palm fibers reinforced plaster concrete", *International Journal of Physical Sciences Vol. 7(21)*, pp. 2845-2853, 30 May, 2012.
- [3] I. Boulaoued et al, "*Experimental determination of the thermo-physical properties of building insulating materials*", *Special Topics & Reviews in Porous Media – An International Journal*, 3(2),pp 97-108 ,2012.
- [4] M. Bederina , L. Marmoret , K. Mezreb , M.M. Khenfer , A. Bali , M. Quéneudec, "Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modeling", *Construction and Building Materials* 21 (2007) 662–668.
- [5] F. Barreca, C.R. Fichera, "Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation", *Energy and Buildings* 62 (2013) 507–513.
- [6] Ines Boulaoued, Contribution a l'étude des isolants thermiques des bâtiments : réalisation et caractérisation d'une brique isolante, Thèse de Doctorat en génie énergétique, (2014).
- [7] Inès Boulaoued, Faycel Khemili, Abdallah Mhimid, "Thermal characterization of insulating materials", *International Journal of Heat and Technology* 30 (2), pp. 63-68 (2012).
- [8] Boudjemaa Agoudjil, Adel Benchabane, Abderrahim Boudenne, Laurent Ibos, Magali Fois, "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood", *Energy and Buildings* 43 (2011) 491–497.
- [9] Krischer O, Kroll K. *Technique du séchage*. Berlin: Centre Technique des Industries Aérouliques et Thermiques (CETIAT). Traduction Springer-Verlag; 1963.