

Etude des performances thermiques et mécaniques de matériaux à matrice cimentaire renforcés par des fibres de bois de palmier

Marwa LAHOUIOUI^{1*}, Magali FOIS², Achraf GHORBAL³, Laurent IBOS², Rim BEN ARFI¹, Ammar BEN BRAHIM¹

¹ Unité de Recherche : Thermodynamique Appliquée, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès, Université de Gabès, Rue Omar Ibn-Elkhattab, 6029 Gabès (Tunisie)

² CERTES, UPEC, 61 Avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex (France)

³ Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Gabès, Université de Gabès, Rue Omar Ibn-Elkhattab, 6029 Gabès (Tunisie)

*(auteur correspondant : marwalahouioui@yahoo.fr)

Résumé - Ce projet vise à déterminer la faisabilité technique de l'introduction de déchets de palmier à l'état brut et après traitement chimique dans du ciment afin d'élaborer un nouvel éco-composite de construction qui soit léger, bon isolant thermique et acoustique. Dans les composites, l'augmentation de la fraction massique de fibres induit une diminution progressive de la conductivité et la diffusivité thermique et s'accompagne d'une perte des propriétés mécaniques et d'une diminution de la densité. Le dégraissage des fibres améliore les propriétés mécaniques, les composites obtenus sont moins fragiles que ceux obtenus à partir de fibres brutes.

Nomenclature

a	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>
k	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$
e	épaisseur de l'échantillon, mm	<i>Indices et exposants</i>
m	masse, g	t temps t
M	variation relative de masse	0 temps initial
S	coefficient de sorption, g/g	∞ temps long
D	coefficient de diffusion de l'eau, $mm^2.s^{-1}$	
P	perméabilité, $mm^2.s^{-1}$	

1. Introduction

Face aux problèmes environnementaux et à la crise énergétique actuelle, les matériaux de construction dont le renfort est constitué de fibres végétales, font l'objet d'un intérêt grandissant, en raison de leur capacité à se substituer aux fibres synthétiques. En effet, les fibres végétales présentent de nombreux atouts : ressources renouvelables, abondantes, bon marché, propriétés mécaniques spécifiques intéressantes... Dans les pays en voie de développement, le renforcement de matériaux par des fibres végétales est une voie à explorer, ces pays possèdent en effet d'énormes quantités de déchets agricoles à valoriser. La Tunisie est l'un des pays d'Afrique du Nord qui dispose d'une grande quantité de palmiers dattiers plantés. Il n'existe cependant aucune filière de valorisation des déchets issus de palmiers en Tunisie.

L'objectif de ce projet est d'apporter une contribution à la valorisation des ressources locales et de l'intégrer d'une façon rationnelle dans le domaine de la construction. Ces nouveaux éco-composites présentent des propriétés thermiques et acoustiques intéressantes. L'incorporation de fibres végétales dans le ciment a été étudiée depuis longtemps mais ces matériaux posent encore des problèmes à cause de l'incompatibilité renfort-matrice [1], de la

grande quantité d'eau absorbée et de leur faible résistance mécanique. Dans ce contexte plusieurs composites ont été réalisés à partir de pétioles de palmiers dattiers broyés, traités ou non traités. L'observation de la surface des fibres avant et après traitement chimique a été réalisée par MEB. La masse volumique, les cinétiques de sorption d'eau, les propriétés thermiques et mécaniques des composites ont été mesurées.

2. Fabrication des échantillons

Les déchets utilisés sont issus de l'oasis de Gabes (Tunisie). Les fibres sont extraites du pétiole (partie renouvelable du palmier). Après séchage dans des conditions normales, les tiges de pétiole sont coupées en petits morceaux puis broyées. La granulométrie et la séparation en fibres de différents diamètres a été réalisée par une bande de Tamis. Les fibres choisies sont de 200 μm . Elles ont ensuite été mélangées avec du ciment portland II 32.5 N de la société de ciment de Gabes, du sable, de l'eau et un pourcentage massique compris entre 0 et 30% de fibres naturelles avant et après traitement alcoolique dans une soxhlet.

Le tableau 1 présente les résultats du traitement chimique effectué sur les fibres et le pourcentage des impuretés enlevées après 8h de lavage.

	Masse échantillon avant traitement	Masse échantillon après traitement	Taux d'extractible
	g	g	%
Essai 1	2,0004	1,6846	15,8
Essai 2	2,0008	1,6693	16,6
Essai 3	2,0009	1,6898	15,5

Tableau 1. : Résultats d'extraction éthanol-toluène pour les fibres de pétiole



Figure 1 : Pétiole de bois de palmier broyé ; (a) Fibres brutes, (b) Fibres Traitées

Enfin le mélange obtenu (fibre-sable-ciment) a été mis dans des moules de dimension ($44 \times 44 \times 10 \text{ mm}^3$). Les échantillons de ciment ont ensuite été conservés dans des conditions humides pendant 28 jours.

3. Méthodes de caractérisation

Les observations par microscope électronique à balayage ont été réalisées pour des fibres traitées et non traitées. Cette étude a permis de connaître la forme des fibres utilisées et d'avoir une idée de leur dispersion dans les mélanges réalisés. Le dispositif utilisé pour l'observation de la microstructure est un microscope électronique à balayage JEOL 6301 F.

Les mesures de sorption d'eau ont été réalisées grâce à un montage simple composé d'une balance placée au-dessus d'un bain d'eau dans lequel trempe un échantillon. Le poids de l'échantillon initialement séché a été ensuite enregistré en fonction du temps. Le coefficient d'absorption d'eau, la sorption et la perméabilité ont ensuite été calculés.

La conductivité thermique k et la diffusivité thermique a ont été mesurées en utilisant le dispositif de mesures DICO. Cette technique de mesure thermique a été développée au CERTES. Le principe de mesure est basé sur l'utilisation d'une excitation thermique périodique d'un bloc comprenant un échantillon pris en sandwich entre deux plaques métalliques. Un suivi temporel de l'évolution de la température des plaques avant et arrière métalliques est effectuée en utilisant des thermocouples. À partir de ces mesures, la fonction de transfert thermique expérimentale du matériau est calculée par FFT. Une modélisation des transferts thermiques dans le porte-échantillon est effectuée en utilisant la méthode des quadripôles thermiques [2]. Les propriétés thermophysiques des échantillons (conductivité et diffusivité thermique) sont identifiées à partir de la minimisation de l'écart quadratique entre les deux fonctions de transfert thermiques (expérimentale et théorique) en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Ce dispositif est décrit en détail dans la référence [3].

Les mesures de la résistance mécanique ont été effectuées avec un dynamomètre à compression Edibon EEU/20KN. Les tests ont été réalisés sur des échantillons cubiques de dimension $(1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3)$. Le dispositif est réalisé selon la norme DIN 50106 et l'essai utilisé pour déterminer la résistance des matériaux est principalement destiné aux charges de compression pour les matériaux fragiles. La résistance à la compression d'un matériau fragile qui se brise lorsqu'il est comprimé peut être déterminée au moyen du logiciel.

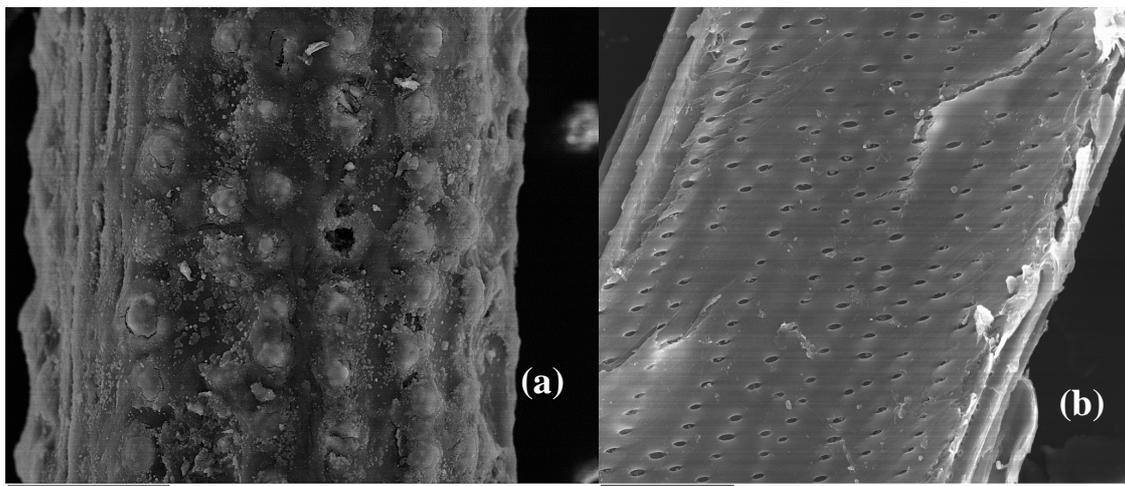


Figure 2 : Image MEB d'une fibre de pétiole de palmier ; (a) Fibre brute (b) Fibre traitée

4. Résultats et discussion

4.1 Microscopie électronique

Des images obtenues par Microscopie Electronique à Balayage (MEB) des fibres élémentaires de pétiole brutes et traitées sont présentées dans la figure 2. Sur la figure 2-(a) on peut observer la fibre non traitée, on constate que la surface de la fibre est cylindrique, rugueuse et recouverte d'impuretés [1] ; c'est une surface typique de fibre naturelle. La cuticule qui entoure les fibres est riche en pectines et en cires qui rendent la surface des fibres totalement hydrophobe. La figure 2-(b) présente la fibre après un lavage alcoolique qu'on appelle dégraissage. Le dégraissage nettoie la surface des fibres en enlevant les cires. Il

modifie la composition, la rugosité et l'hydrophobicité de la surface des fibres. La surface des fibres devient plus lisse. Chaque fibre végétale est constituée d'un groupement de microfibrilles qui sont creuses. Ce type de bois présente une porosité importante ce qui explique la faible masse volumique des échantillons étudiés.

4.2 Masse volumique

Il est important de mesurer la masse volumique des composites afin de savoir si l'on a bien obtenu des bétons « légers ». La figure 3 montre l'effet du pourcentage de fibres sur la masse volumique. L'augmentation du pourcentage de fibres réduit progressivement la masse volumique. La masse volumique obtenue avec les fibres traitées est plus importante. La modification chimique des fibres qui a permis d'éliminer des impuretés, semble également réduire la porosité. En effet, le fait que les composites à matrice cimentaire soient renforcés par des fibres peut modifier la prise du ciment. L'eau absorbée par les fibres limite la quantité d'eau disponible lors de la prise du ciment ce qui peut changer la porosité du matériau final.

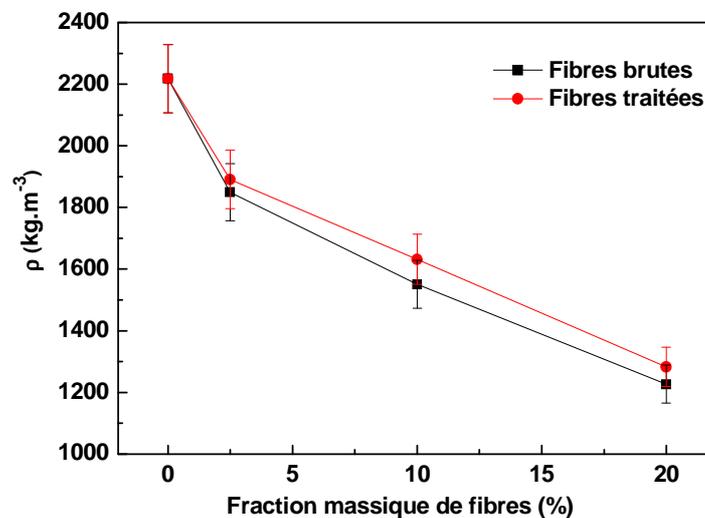


Figure 3 : Variation de la masse volumique en fonction du pourcentage massique de fibres

4.3 Cinétique de sorption d'eau

La fraction d'eau absorbée M_t au temps t a été calculée de la manière suivante :

$$M_t = \frac{m_t - m_o}{m_o} \quad (1)$$

Où m_o est le poids initial de l'échantillon sec et m_t est le poids de l'échantillon hydraté au temps t . La fraction d'eau absorbée exprimée en pourcent a été tracée en fonction de la racine carrée du temps divisée par l'épaisseur de l'échantillon. Les courbes de sorption d'eau sont présentées sur figure 4 pour des composites ne contenant que 2,5% de fibres. L'absorption d'eau des composites fibre/ciment présente bien un comportement Fickien avec une partie initiale linéaire et un plateau à l'équilibre.

A partir de ces courbes, la valeur du coefficient de diffusion peut être calculée en utilisant l'équation :

$$D = \pi \left(\frac{\theta}{4M_\infty} \right)^2 \quad (2)$$

où θ est la pente de la partie linéaire des courbes de sorption (calculée en prenant en compte toutes les valeurs de $M_t < 0.6.M_\infty$) et M_∞ est la fraction d'eau absorbée à l'état d'équilibre. Les valeurs du coefficient de diffusion sont données dans le tableau 2. Le coefficient de diffusion est plus important pour les fibres dégraissées, puis vient le béton et enfin les fibres brutes.

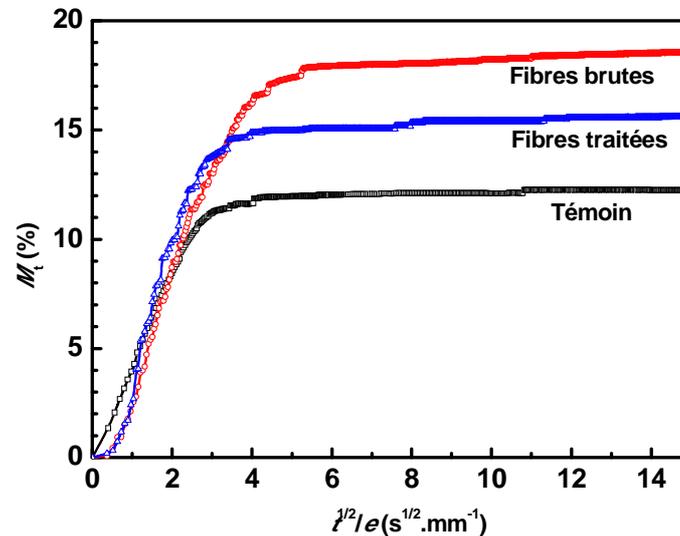


Figure 4 : Cinétiques de sorption d'eau par la matrice et les composites contenant 2.5% de fibres.

	D	S	P
	mm ² /s	g/g	mm ² /s
Béton	0.0264	0.1223	0.0032
Béton + Fibre brute 2,5%	0.0207	0.1845	0.0038
Béton + Fibre dégraissée 2,5%	0.0522	0.1553	0.0081

Tableau 2 : Coefficient de diffusion, coefficient de sorption et perméabilité du béton et des composites contenant 2.5% de fibres.

Le coefficient de sorption est calculé en utilisant l'équation suivante :

$$S = \frac{m_\infty - m_o}{m_o} = M_\infty \quad (3)$$

où m_o est la masse initiale de l'échantillon. Les valeurs des coefficients de sorption sont présentées dans le tableau 2. D'après les valeurs du coefficient de sorption, il est clair que les composites renforcés par les fibres absorbent plus d'eau que le béton seul. Cela peut s'expliquer d'une part, par le caractère hydrophile des fibres végétales [4] et d'autre part, par le taux élevé des pores, leur structure et leur distribution dans le composite [5]. On observe également que les composites réalisés avec les fibres brutes absorbent plus d'eau que les composites réalisés avec les fibres traitées.

Finalement, la perméabilité P des composites aux molécules d'eau peut être considérée comme l'effet combiné de la sorption et de la diffusion :

$$P = D.S \quad (4)$$

Les valeurs de la perméabilité sont données dans le tableau 2. La perméabilité des composites à base de fibres brutes est légèrement plus grande que celle du béton, par contre la perméabilité des composites à base de fibres dégraissées est deux fois plus grande que celle

des fibres brutes. Ces échantillons sont alors bien plus perméables même s'ils sont moins poreux (puisque leur densité est plus grande) que ceux incluant des fibres brutes. Dans des composites fibre de lin/époxy la diminution de la perméabilité est considérée comme étant une bonne indication de l'amélioration de l'adhésion fibre/matrice [6].

4.5 Propriétés thermophysiques

Les figures 5 et 6 présentent l'évolution de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique en fonction du pourcentage massique de fibres traitées et non traitées. On remarque que l'ajout de ces fibres réduit progressivement et simultanément la conductivité thermique et la diffusivité des composites. La conductivité thermique du béton passe de $1.4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à $0.11 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour 30% de fibres. Le dégraissage des fibres n'a pas d'influence sur les propriétés thermiques. Les composites sont donc bien plus isolants dès 5% d'ajout de fibres. D. Taoukil *et al* [7] qui ont étudié l'effet de l'ajout de copeaux de bois et de laine de bois sur les propriétés thermiques des bétons ont également conclu que l'ajout de fibres naturelles améliore les caractéristiques d'isolation des bétons.

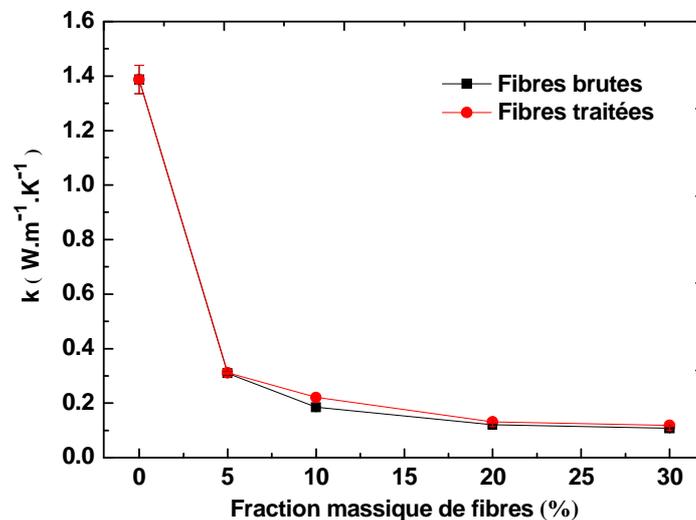


Figure 5 : Conductivité thermique des composites

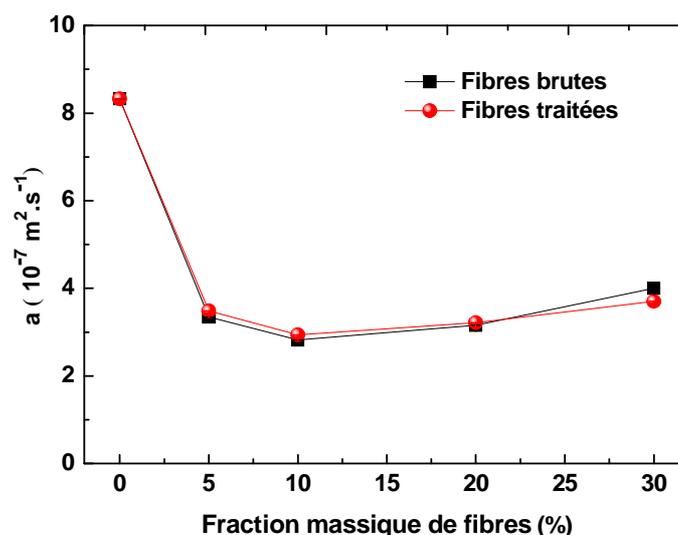


Figure 6 : Diffusivité thermique des composites

La réduction de la conductivité était prévisible, à cause du caractère poreux des fibres qui possèdent une conductivité thermique plus faible que celle du ciment [8] mais également à cause de l'augmentation de la porosité du ciment lors de l'ajout des fibres. L'augmentation de porosité dans la matrice et par conséquent la réduction de la masse volumique peut être considérée comme l'un des avantages de l'utilisation de fibres naturelles mélangées aux ciments, en effet les ciments obtenus sont beaucoup plus légers. Cet effet a déjà été noté par Aouadja *et al.* [9] sur le béton renforcé par des résidus de bois.

4.4 Propriétés Mécaniques

La figure 7 présente la variation de la résistance à la compression en fonction de la fraction massique de fibres traitées et non traitées. Ces essais ont été réalisés sur de petits échantillons cubiques de dimension ($1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$). Dès l'ajout de 10% de fibres, une brusque chute de la résistance est observée par rapport à matrice de référence. On note une diminution de 44% pour les fibres brutes et 30% pour les fibres traitées. La réduction de la résistance à la compression dans le cas de fibres brutes peut être expliquée par l'augmentation de la taille et de la quantité de pores dans le ciment ainsi que par une mauvaise adhésion entre les fibres et le ciment. Ainsi le béton obtenu est isolant et léger mais ne supportera pas de charge, de ce fait il pourra seulement être utilisé comme revêtement de mur.

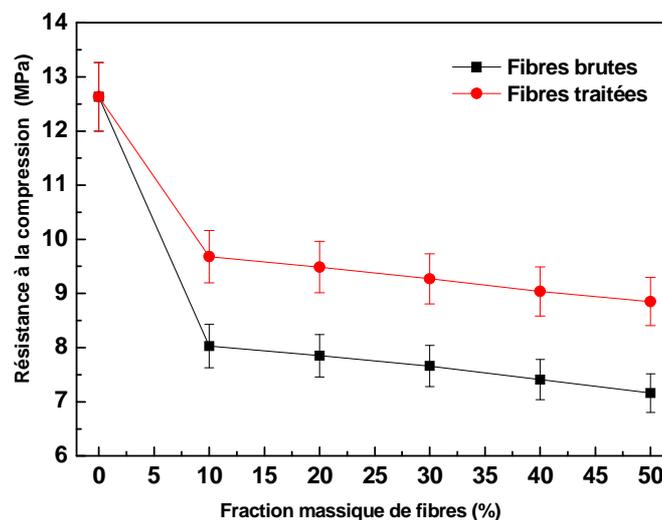


Figure 7 : Propriétés mécaniques des composites

5. Conclusion

Dans le domaine du bâtiment, les matériaux utilisés doivent répondre à différentes contraintes, ils doivent en particulier posséder certaines propriétés mécaniques pour assurer la durabilité structurelle du bâtiment. Le choix d'utiliser des matériaux isolants permet par ailleurs de limiter les pertes de chaleurs et de réduire la consommation d'énergie. Dans ce contexte énergétique et économique, il est intéressant d'envisager des formulations de bétons possédant de bonnes propriétés thermiques.

Plusieurs études ont été effectuées sur l'étude du comportement mécanique de composites renforcés par des fibres naturelles. Elles ont montré que l'interaction fibre/matrice dépend des propriétés surfaciques des fibres. C'est pourquoi nous avons opté pour des traitements chimiques des fibres afin de nettoyer la surface des impuretés et de modifier leur composition et leur hydrophobicité. De cette manière la quantité d'eau absorbée par les fibres peut différer et modifier la prise du ciment. Le traitement chimique de la fibre peut également modifier l'interface fibre/ciment [10].

Afin d'optimiser le couple résistance / pouvoir isolant, ce travail expérimental montre bien que la conductivité thermique diminue avec l'ajout de fibres ce qui confirme que ce composite possède le caractère d'un bon isolant thermique.

Le dégraissage des fibres a permis d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques des composites sans modifier les propriétés thermiques. L'amélioration des propriétés mécaniques survient en même temps que l'augmentation de la masse volumique, elle peut donc être interprétée comme étant liée à la porosité. Bien que ces composites fibreux aient des propriétés mécaniques très inférieures par rapport au témoin, les propriétés mécaniques restent toujours acceptables et dans les normes [5].

En conséquence, ces nouveaux éco-composites plus isolants thermiquement que les bétons classiques, possèdent en outre une résistance mécanique acceptable et une faible masse volumique.

Références

- [1] A. Alawar AM. Hamed, k. Al-Kaabi, Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement, *Composites Part B: Engineering*, 40 (2009), 601-606.
- [2] D. Maillat, A. Degiovanni, J.C. Batsale, C. Moyne, S. André, *Thermal quadrupoles: Solving the heat equation through integral transforms*, John Wiley & Sons (2000).
- [3] A. Boudenne, L. Ibos, E. Géhin, Y. Candau, A simultaneous characterization of thermal conductivity and diffusivity of polymer material by a periodic method, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 37 (2004), 132-139.
- [4] Z. Cherif, C. Poilane, A. Vivet, J. Chen., Prepregs Lin/Epoxy : influence des paramètres d'élaboration sur les propriétés mécaniques, *AMAC, 17^{èmes} Journées Nationales sur les Composites (JNC17)*, Poitiers-Futuroscope, France, Juin 2011, 111.
- [5] J. Khedri, B. Suttisonk, N. Pratinthong, J. Hirunlabh, New Lightweight composite construction materials with low thermal conductivity, *Cement & concrete composites*, 23 (2001), 65-70.
- [6] Z. Cherif, C. Poilane, T. Falher, A. Vivet, N. Ouail, B. Ben Doudou, J. Chen, *Polymer composites*, 34 (2013), 1761-1773.
- [7] D. Taoukil, A. Albouardi, T. Ajzoul, H. Ezbakhe, Caractérisation mécanique et Hydrique d'un béton allège avec les résidus de bois, *Revue internationale d'héliotechnique*, n° 43 (2011), 1-7.
- [8] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood, *Energy and Buildings* 43 (2011) 491-497
- [9] F. Z. Aouadja, M. Mimoune, and M. Laquerbe, Etude expérimentale sur les bétons à Base de résidus de bois, *Revue Algérie-Equipement*, (1995) 24-27.
- [10] P.J. Herrera-Franco, A. Valadez-Gonzalez, A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites Part B : engineering*, 36 (2005), 597-608.

Remerciements

Les auteurs remercient Mr Patrick Ausset, ingénieur de recherche au LISA, pour avoir effectué les observations des fibres avec le MEB.