

## Mechanical Behaviour of Composites Reinforced by Bamboo Strips, Influence of Seawater Aging Comportement Mécanique de Composites Renforcés de Lamelles de Bambou, Influence du Vieillessement dans l'Eau de Mer

Peter Davies<sup>1\*</sup>, Mael Arhant<sup>1</sup>, Pierre-Yves Le Gac<sup>1</sup>, Maelenn Le Gall<sup>1</sup>, Guillaume Kemlin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Comportement de Structures en Mer, IFREMER Centre Bretagne, F-29280 Plouzané, France

<sup>2</sup>Multiplast SA, F-56000 Vannes, France

Corresponding Author Email: [peter.davies@ifremer.fr](mailto:peter.davies@ifremer.fr)

<https://doi.org/10.18280/rcma.290404>

**Received:** 11 October 2018

**Accepted:** 21 January 2019

### **Keywords:**

*bamboo, density, mechanical properties, wet aging*

### **Mots-clés :**

*bambou, densité, mécanique, vieillissement*

### **ABSTRACT:**

There are more than a thousand species of bamboo and some of these contain large amounts of fibres with attractive properties. However, the extraction of the fibres without damaging them is difficult, requiring energy and special equipment. One solution is to use the bamboo in the form of thin strips taken from fibre-rich regions of the plant, as done by the Cobratex company in an innovative process. These contain the fibres but they are protected from damage and keep their alignment. This paper presents the results from a study of bamboo strips, alone and in an infused composite. The influence of seawater immersion is investigated. The composite weight gain is high, around 25 %, but most of the water is in the natural canals of the wood. The influence of water is limited, a loss of 21 % in tensile modulus and 30 % in strength after saturation. These losses are smaller than for other natural fibre composites.

### **RÉSUMÉ :**

Il existe plus de 1000 espèces de bambou et certaines plantes contiennent des quantités importantes de fibres avec des propriétés intéressantes. Cependant, l'extraction de ces fibres sans endommagement est délicate, elle nécessite de l'énergie et du matériel spécifique. Une solution est d'utiliser des lamelles de bambou, prélevées des zones riches en fibre, comme certaines gammes de produits proposées par Cobratex et issues de leur procédé innovant. Les fibres sont présentes mais protégées, et elles gardent leur alignement. Cet article présente les résultats d'une étude des propriétés mécaniques de lamelles de bambou, seules et dans un composite. L'influence de l'immersion dans l'eau de mer est également investiguée. L'augmentation de la masse des composites à saturation est importante, environ 25 %, mais cette eau se trouve principalement dans les canaux du bois. L'influence de l'eau sur les propriétés mécaniques reste limitée. La perte de module en traction est d'environ 21 % et la perte de résistance d'environ 30 %. Ces réductions sont moins importantes que celles d'autres composites à fibres naturelles.

## 1. INTRODUCTION

Depuis quelques années on constate une activité de recherche importante autour des fibres naturelles, afin de bénéficier de leur faible impact environnemental dans le renforcement de matériaux composites. Cette recherche s'est focalisée sur les fibres de lin [1, 2], mais on s'intéresse également à d'autres sources de fibres, comme le chanvre, le jute, le sisal [3]. Le bambou est un des matériaux de construction le plus ancien, exploité depuis plus de 5000 ans [4, 5]. Il existe une littérature très fournie sur sa microstructure et sur les liens entre microstructure et propriétés mécaniques [6-8]. Cependant, étant donné le nombre d'espèces important (>1200) il est difficile de tirer des conclusions génériques sur le potentiel de ce matériau, et en particulier sur sa durabilité. En ce qui concerne l'influence du vieillissement dans l'eau sur le comportement mécanique du bambou et de ses composites on trouve quelques références. Par exemple, Chen et al. [9] ont indiqué des résistances et allongements à la rupture plus élevés pour des

fibres humides. Kushwaha & Kumar [10] ont quantifié l'influence de revêtements sur la reprise en eau de composites renforcés de bambou, et Kumar et al. [11], ont relié la prise en eau à la densité de lamelles de bambou reconstitués et densifiés. Dans cet article on présente les premiers résultats d'une étude de lamelles de bambou et de leur comportement mécanique après saturation dans l'eau de mer.

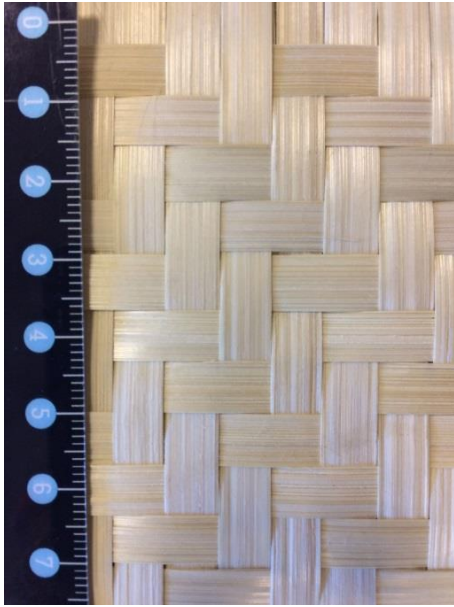
## 2. MATERIAUX

La société Cobratex® a fourni à Multiplast des renforts en forme de lamelles de bambou tissés en sergés 2-2, de poids surfacique de 380 et 500 g/m<sup>2</sup>, Figure 1.

A partir de ces renforts la société Multiplast a fabriqué 4 plaques de composites par infusion, Figure 2, avec une post-cuisson de 10h à 60 °C.

Le Tableau 1 présente les détails. La résine est la Sicomin 8500 avec le durcisseur 8601 présentant une température de

transition vitreuse ( $T_g$ ) de 70 °C.



**Figure 1.** Renforts de lamelles de tissés (0/90° sergé)



**Figure 2.** Plaques de bambou/époxy fournies

Le Tableau 1 présente les détails des 4 matériaux fournis.

**Tableau 1.** Plaques fournies

Séquence	0/90/±45°	0/90/±45°	0/90°	±45°
Épaisseur, mm	6,3	2,7	2,9	2,3
Taux de renfort massique, %	34	49	41	46

### 3. METHODES

Les méthodes de caractérisation suivantes ont été employées pendant l'étude :

- Analyse par DSC.

Afin de vérifier la cuisson, des essais DSC sont réalisés sur une machine Q100 de chez TA Instrument avec une vitesse de chauffe de 10 °C/min sous atmosphère inerte (N<sub>2</sub> à 50mL/min)

- Densité.

Deux techniques ont été utilisées pour mesurer la densité des matériaux

i) par pesées

Des mesures de densité sur composites ont été faites en utilisant le principe d'Archimède, en pesant dans l'air et dans l'eau les échantillons avec une balance Sartorius™.

ii) par pycnomètre a gaz

Un pycnomètre à gaz de type AccuPyc II 1340 de chez Micrometrics™ utilisant de l'hélium a été employé pour la mesure de densité. Cet équipement réalise 10 cycles de purge (environ 10 min) et effectue ensuite 30 mesures sur une heure. Les valeurs indiquées ici sont la moyenne des 30 mesures. L'étalonnage a été effectué avec une sphère d'acier avant chaque série.

- Essais mécaniques.

Des essais de traction ont été réalisés suivant la norme ISO 527 sur une machine de capacité 1 tonne à une vitesse de 2 mm/min sur des éprouvettes orientées à 0/90° et ±45°, de dimensions 250 x 20 mm<sup>2</sup>. La déformation a été mesurée par deux méthodes, à savoir un extensomètre mécanique et/ou par corrélation d'images. Des essais de cisaillement interlaminaire (flexion 3 points poutre courte) ont été réalisés selon la norme ASTM D2344 sur matériau quasi-isotrope épais de dimensions 30 x 10 mm<sup>2</sup>. Les essais ont été réalisés à une vitesse de 5 mm/minute.

- Vieillissement.

La prise en eau des échantillons a été étudiée par suivi gravimétrique sur une balance Sartorius LA310 S d'une précision de 0.1 mg. Pour ce faire, des échantillons de dimensions 50 x 50 mm<sup>2</sup> ont été immergés dans des bacs d'eau de mer naturelle renouvelée à trois températures différentes (25, 40 et 60 °C) sur une durée totale de 1 an.

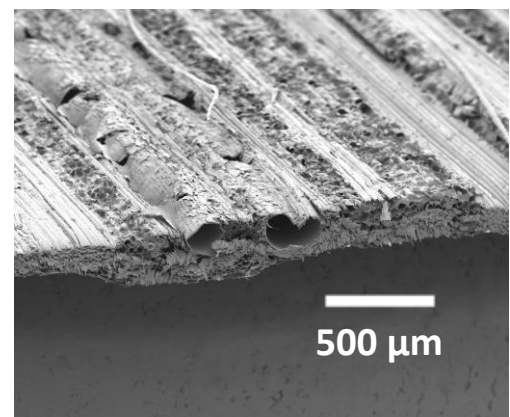
- Microscopie

Trois microscopes différents ont été utilisés : Un microscope optique (Leica®), un microscope numérique (Keyence®), ainsi qu'un microscope électronique à balayage (MEB).

## 4. COMPORTEMENT DU RENFORT

### 4.1 Microstructure

Dans un premier temps, la microstructure des renforts, en forme de lamelles, a été mise en évidence par microscopie optique et par MEB. La Figure 3 présente une image du renfort.



**Figure 3.** Image MEB d'une section du renfort

## 4.2 Densité

Dans un second temps, la densité du renfort a été mesurée. La détermination de la densité de fibres naturelles est assez controversée [12, 13]. Le Tableau 2 présente quelques valeurs de la littérature ainsi que les valeurs obtenues par pycnomètre à gaz sur les lamelles de bambou de cette étude.

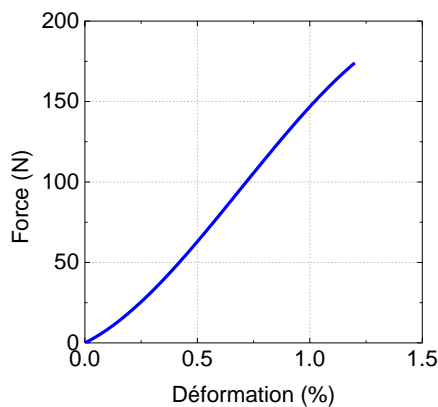
**Tableau 2.** Densité de fibres de bambou, de lamelles, et fibres de lin et de verre

Référence	Valeur	Méthode
Shito et al. [14] Paquets de fibres	1,2	Pas de détail
Trujillo et al. [15] Paquets de fibres	1,35-1,4	Pas de détail
Ovat et al. [16]	0,99	Archimède, séché
Krause et al. [7]	0,7-1,0	Pesée
Lamelles. Cette étude	0,97 (0,8-1,1)	Pycnomètre à gaz
Fibres de lin	1,3-1,6	-
Fibres de verre	2,5-2,7	-

Le Tableau 2 présente également des valeurs typiques de densité de renforts de lin et de verre. On constate une différence importante, surtout par rapport aux fibres de verre ; la densité de ces renforts en bambou est très faible, ce qui reflète la quantité importante de canaux dans les lamelles (Figure 3), et pourrait offrir des avantages importants dans les composites pour le transport.

## 4.3 Comportement mécanique

Le comportement en traction du renfort a été mesuré, les résultats sont présentés sur la Figure 4.



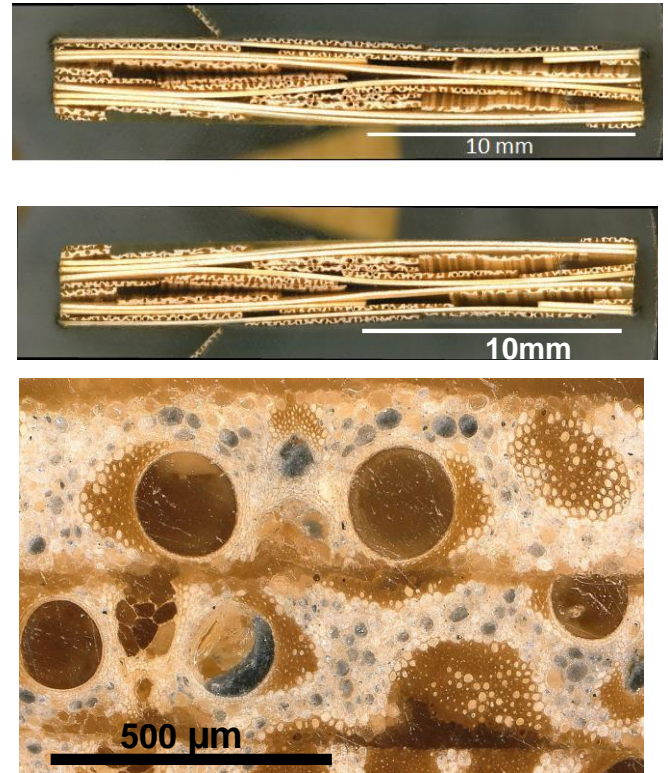
**Figure 4.** Essais de traction sur lamelle de bambou. Exemple de courbe force-déformation

A partir de la courbe de Figure 4 on peut estimer le module en traction, mais il faut quantifier la section sollicitée. L'épaisseur nominale mesurée par pied-coulisse est de 0,3 mm, ce qui fournit une valeur de module apparente moyenne (5 essais) de 12 GPa. Cependant, cette valeur est une sous-estimation puisque l'analyse de la section MEB (Figure 3) montre que l'épaisseur est assez variable. On peut également appliquer une approche « textile », à partir de la force divisée par la masse linéique mesurée (N/tex). Dans ce cas les valeurs de module obtenues varient de 13 à 26 GPa.

## 5. COMPORTEMENT DU COMPOSITE

### 5.1 Microstructure

L'examen de sections de composites par microscopie optique, numérique, et par MEB permet de révéler la microstructure du composite. La Figure 5 présente des images du renfort, et souligne la complexité de la microstructure.



**Figure 5.** Section du composite 0/90°, images microscope numérique, En haut : éprouvette de traction (22x3) mm². En bas : détail montrant canaux entourés de fibres dans 3 lamelles après imprégnation

### 5.2 Densité

Ensuite la densité du composite a été mesurée par deux méthodes, Tableau 3.

**Tableau 3.** Mesures de densité du composite

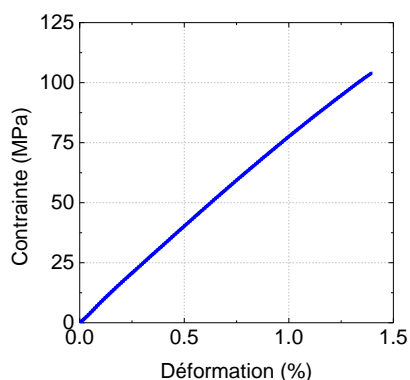
Pycnomètre	1,04
Pesée	1,01

Ces valeurs sont très faibles ; pour comparaison un composite verre/époxy aura une densité dans la gamme 1,7-2,0. A partir de ces valeurs et celles de renfort et résine on peut estimer un taux volumique de renfort autour de 40 %.

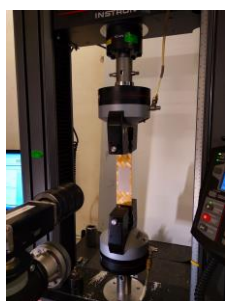
### 5.3 Comportement mécanique

Le comportement en traction et en cisaillement interlaminaire des composites a été mesuré. Les essais de traction ont été réalisés sur les éprouvettes avec les orientations 0/90° et ±45°. Les Figures 6 et 7 présentent les essais et les résultats.

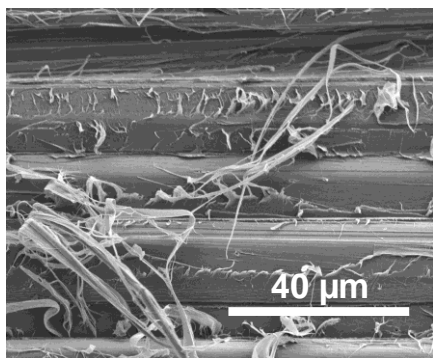




**Figure 6.** Comportement en traction du composite 0/90°. En haut montage d'essai, éprouvette après rupture. En bas exemple de courbe contrainte-déformation



**Figure 7.** Comportement en cisaillement dans le plan du composite, mesuré par essais de traction sur éprouvette  $\pm 45^\circ$ . A gauche ; montage d'essai. A droite ; exemple de courbe contrainte-déformation



**Figure 8.** Faciès de rupture, cisaillement dans le plan

L'examen de faciès de rupture d'éprouvettes de cisaillement au MEB indique une rupture dans les parois des fibres de bambou, qui semble être le maillon faible sous ce

type de sollicitation.

Les éprouvettes quasi-isotropes épaisses ont été testées en cisaillement interlaminaire. Pour beaucoup de composites à fibres naturelles les résultats de ce type d'essai ne sont pas valables ; la rupture se fait par écrasement et déformation plastique et non par délaminage. Ici on note des fissures dans l'épaisseur.

Le Tableau 4 résume les propriétés mécaniques de ces composites.

**Tableau 4.** Résumé des propriétés mécaniques de composites à lamelles de bambou

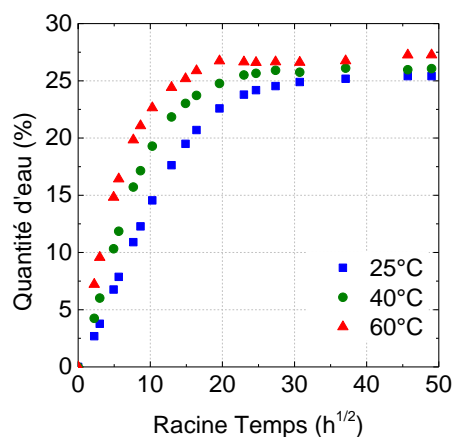
Essai	Traction	Cisaillement dans le plan	Cisaillement hors plan
Séquence	0/90°	$\pm 45^\circ$	0/90/ $\pm 45^\circ$
Valeurs	$E_1 = 8,4$ (1,3) GPa $\sigma_{1t} = 98$ (13) MPa	$G_{12} = 1$ GPa $\tau_{12} = 20$ (2) MPa	$\tau_{13} = 33$ (6) MPa

Afin d'obtenir une valeur de module  $E_1$  du composite 0/90° de 8,4 GPa, et avec un  $V_f$  autour de 40 %, le module de la lamelle,  $E_{UD}$  renfort devrait être autour de 35 GPa.

## 6. INFLUENCE DU VIEILLISSEMENT DANS L'EAU DE MER

### 6.1 Prises en eau

La cinétique de la diffusion d'eau de mer dans le matériau a été étudiée par prises de masse à différentes températures. La Figure 9 présente un exemple, pour le composite 0/90°.



**Figure 9.** Prises en eau dans l'eau de mer à différentes températures

On constate une saturation assez rapide pour ces coupons, suivi d'une stabilisation de la masse autour de 25 %. Des valeurs similaires ont été obtenues pour les autres séquences d'empilement.

### 6.2 Comportement mécanique après vieillissement

Des essais de traction et de cisaillement interlaminaire ont été réalisés sur des éprouvettes saturés en eau de mer à 40 °C (sans séchage). La Figure 10 présente un exemple de courbe de traction avant et après saturation.

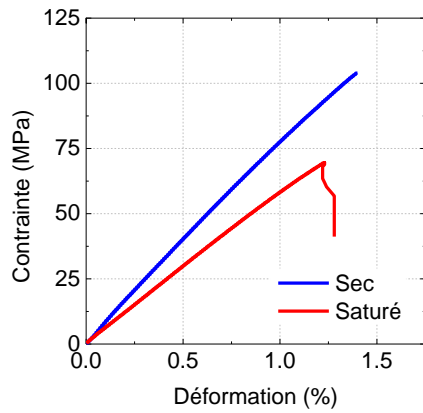
## 7. CONCLUSIONS

Ce document présente les résultats d'une étude préliminaire des propriétés de composites utilisant des fibres naturelles de bambou et une résine époxy. Il faut souligner que les matériaux utilisés ici n'ont pas, pour l'instant, été optimisés notamment au niveau de l'interface fibre/matrice.

Dans un premier temps, le renfort a été caractérisé du point de vue de sa densité et ses propriétés en traction. Puis, son comportement dans des composites sollicités dans le plan (traction 0/90° et ±45°) et hors plan (quasi-isotrope) a été évalué. Les résultats montrent que le bambou peut présenter des propriétés spécifiques intéressantes.

Finalement l'influence de l'immersion dans l'eau de mer est quantifiée. La prise en masse est importante mais son influence sur le comportement mécanique reste limitée ; les pertes de module (-21 %) et de résistance (-30 %) en traction après saturation sont plus faibles que celles d'autres fibres naturelles.

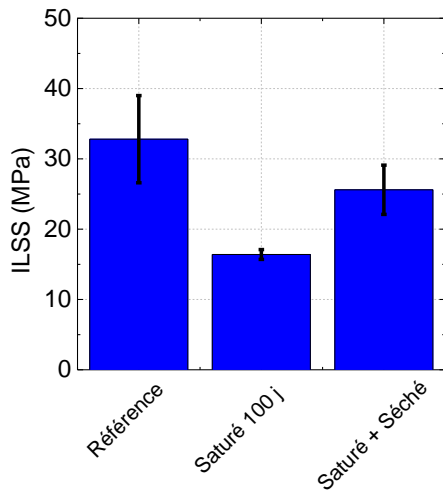
Ces résultats préliminaires indiquent un potentiel de l'utilisation du bambou pour des applications marines. Il sera intéressant d'étendre l'étude à d'autres propriétés, notamment leur comportement au choc et en fatigue.



**Figure 10.** Influence de la saturation en eau de mer sur le comportement en traction d'éprouvettes 0/90°

On note une réduction du module et de la résistance après 100 jours dans l'eau de mer. Cependant, ces réductions (-21 et -30 % pour le module et la résistance) sont nettement inférieures à celles mesurées par Chilali et al. [17] sur des composites lin/époxy (un sergé 2/2 Vf 0,32) après 30 jours d'immersion (-58 et -42 % pour le module et la résistance respectivement).

La Figure 11 présente les résultats d'essais de cisaillement interlaminaire. Une partie importante de la perte de résistance après saturation est récupérée après séchage.



**Figure 11.** Influence du vieillissement en eau de mer à 40 °C pendant 100 jours sur le comportement de composite quasi-isotrope épais en cisaillement interlaminaire, testés à l'état mouillé et après séchage

Le Tableau 5 résume l'influence de l'immersion dans l'eau de mer sur la résistance des composites.

**Tableau 5.** Influence de la saturation dans l'eau de mer sur la résistance des composites

Propriété	Influence de la saturation dans l'eau de mer
Résistance en Traction 0/90°, $\sigma_{1t}$	-30 %
Résistance cisaillement dans le plan, $\tau_{12}$	-42 %
Résistance cisaillement interlaminaire, $\tau_{13}$	-50 %

## REFERENCES

- [1] Baley, C. (2002). Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Compos: Part A*, 33(7): 939-948. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00040-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00040-4)
- [2] Yan, L., Chouw, N., Jayaraman, K. (2014). Flax fibre and its composites – A review. *Composites Part B: Engineering*, 56: 296-317. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.014>
- [3] Mohanty, A.K., Misra, M., Drzal, L.T. (2005). *Natural Fibers Biopolymers & Biocomposites*. 1st edition, CRC Press, USA.
- [4] Abdul Khalil, H.P.S., Bhat, I.U.H., Jawaid M, Zaidon A, Hermawan, D., Hadi, Y.S. (2012). Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review. *Materials & Design*, 42: 353-368. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.015>
- [5] Platts, J. (2018). Living bamboo treasure. *Materials World*, December, 34-35.
- [6] Osorio, L., Trujillo, E., Van Vuure, A.W., Verpoest, I. (2011). Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 30(5): 396-408. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684410397683>
- [7] Krause, J.Q., de Andrade Silva, F., Ghavami, K., da Fonseca Martins Gomes, O., Dias Toledo Filho, R. (2016). On the influence of *Dendrocalmus giganteus* bamboo microstructure on its mechanical behavior. *Construction and Building Materials*, 127: 199-209. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.104>
- [8] Mannan, S., Knox, J.P., Basu, S. (2018). Correlation between axial stiffness and microstructure of a species of bamboo. *Proc. Royal Soc. Open Sci.*, 4: 160412.
- [9] Chen, G., Luo, H., Yang, H., Tsang, T., Li, S. (2018). Water effects on the deformation and fracture behaviors of the multi-scaled cellular fibrous bamboo. *Acta Biomaterialia*, 65: 203-215.

- [10] Kushwaha Kumar, A. (2010). Studies on water absorption of bamboo-epoxy composites: Effect of silane treatment of mercerized bamboo. *J. Appl. Polymer Science*, 115: 1846-1852.
- [11] Kumar, A., Vlach, T., Laiblova., L., Hrouda, M., Kasal, B., Tywoniak, J., Hajek, P. (2016). Engineered bamboo scrimber: Influence of density on the mechanical and water absorption properties. *Construction and Building Materials*, 127: 815-827. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.069>
- [12] Amiri, A., Triplett, Z., Moreira, A., Brezinka, N., Alcock, M., Ulven, C.A., (2017). Standard density measurement method development for flax fiber. *Industrial Crops & Products*, 96: 196-202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.060>
- [13] Le Gall, M., Davies, P., Martin, N., Baley, C., (2018). Recommended flax density values for composite property predictions. *Industrial Crops & Products*, 114: 52-58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.065>
- [14] Shito, T., Okubo, K., Fujii, T. (2002). Development of eco-composites using natural bamboo fibres. paper from Paper from: *High Performance Structures and Composites*, CA Brebbia and WP de Wilde (Editors). WIT Press, Southampton, UK.
- [15] Trujillo, E., Moesen, M., Osorio, L., Van Vuure, A.W., Ivens, J., Verpoest, I. (2014). Bamboo fibres for reinforcement in composite materials: Strength. *Composites: Part A*, 61: 115-125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.02.003>
- [16] Ovat, F.A., Obot, O.W., Fakorede, D.O., Markson, I.E. (2015). Determination of Density of Nigerian bamboo fiber as an Engineering property using maceration method. *Int J. Scientific & Engineering Research*, 6(9): 1811-1822.
- [17] Chilali, A., Assarar, M., Zouari, W., Kebir, H., Ayad, R. (2017). Effect of geometric dimensions and fibre orientation on 3D moisture diffusion in flax fibre reinforced thermoplastic and thermosetting composites. *Composites Part A*, 95: 75-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.12.020>