



**HAL**  
open science

# Développement d'un bio-composite multifonctionnel renforcé par des fibres de canne à sucre

Gérémie Princia Postdam

► **To cite this version:**

Gérémie Princia Postdam. Développement d'un bio-composite multifonctionnel renforcé par des fibres de canne à sucre. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621626

**HAL Id: hal-01621626**

**<https://hal.science/hal-01621626>**

Submitted on 23 Oct 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Développement d'un bio-composite renforcé par des fibres de canne à sucre

## *Development of a composite material made from sugar cane fibers*

Gérémie Postdam, Papa Birame Gning, Benoit Piezel, Alan Geslain, Stéphane Fontaine

DRIVE EA1859  
Univ. Bourgogne Franche-Comté  
F58000 Nevers, France  
e-mail : geremie.postdam@u-bourgogne.fr

### Résumé

La présente étude a pour objectif le développement d'un agro-composite multifonctionnel à base de fibres de canne à sucre, alliant de bonnes propriétés acoustiques et mécaniques. Les renforts étudiés présentent des distributions morphologiques (longueur et diamètre) pouvant être approchées par une loi log-normale. Les composites thermo-comprimés avec une matrice époxy, ont été caractérisés à l'aide d'un plan d'expériences ayant pour paramètres le diamètre des fibres (entre 0,5 et 4 mm) et leur taux massique (entre 40 et 70%). L'analyse des propriétés acoustiques a montré que l'absorption acoustique augmente avec le diamètre des fibres, tout en diminuant avec leur proportion massique, sur une gamme de fréquences comprises entre 500 et 1000 Hz. La caractérisation mécanique par des essais de flexion a montré un comportement fragile. L'analyse par stéréo-corrélation d'images, a permis de discuter de l'hétérogénéité des champs de déformation, relativement à l'observation des faciès de rupture.

### Abstract

The aim of the present study is to develop a multifunctional sugarcane fibres reinforced epoxy porous composite combining good acoustic and mechanical properties. The study of the bagasse fibres geometry has shown that fibres' length and diameter distribution can be fitted by lognormal laws. Composites manufactured by thermocompression process with an epoxy matrix were characterized using an experimental design whose parameters were the diameter of the fibres (between 0.5 and 4 mm) and their mass ratio (between 40 and 70%). The study of acoustic properties showed that the sound absorption increases with the diameter of the fibres, while decreasing with their mass proportion, over a frequency range between 500 and 1000 Hz. Mechanical characterisation by bending tests, has showed a fragile behavior, with deviations of stiffness and maximum stress around 36%. The stereo-correlation image analysis confirmed the heterogeneity of the strain fields throughout the thickness, in relation to the fracture observation.

**Mots Clés :** bagasse, bio-composite, matériaux absorbants, propriétés mécaniques, stéréo-corrélation

**Keywords :** Bagasse, bio-composite, sound absorption, mechanical properties, stereo-digital image correlation

## 1. Introduction

Les constructions modernes exigent des matériaux performants, alliant de bonnes propriétés mécaniques et de hautes caractéristiques d'isolation acoustique. Dans le même temps, l'industrie du bâtiment intègre de plus en plus les matériaux issus de la biomasse, en raison de considérations environnementales. C'est ainsi que ces dernières années, de nombreux auteurs se sont intéressés à la fabrication de bétons renforcés de fibres naturelles, de jute, chanvre, coco, bambou ou sisal [1-2].

De ce fait, l'utilisation dans le génie civil des fibres de canne à sucre, abondantes dans la région des tropiques, semble pertinente. Initialement cultivée pour la production d'alcool, de sucre et de biocarburant, la transformation industrielle de la plante de canne de sucre génère un résidu fibreux appelé bagasse qui représente 30% de la masse de la matière première. Aussi, la

valorisation de plus de 500 millions de tonnes de bagasse produites annuellement à l'échelle mondiale autrement que par combustion pour la production d'énergie, pour l'alimentation animale ou pour l'industrie papetière, représente un défi écologique et économique majeur dans les zones où la culture de cette plante prédomine. Plus récemment, des études ont porté sur l'intégration de la bagasse comme constituant pour des matériaux de construction [3] ou des matériaux composites [4]. Ces études ont montré que le renforcement des composites à fibres de bagasse augmente la résistance à la flexion 14% et de 30% la résistance au choc.

Plusieurs travaux ont montré que les paramètres du procédé de fabrication du composite ont une forte influence sur ses propriétés en flexion et en compression [5]. Ainsi, Merotte et al. [6] ont mis en évidence une relation entre la microstructure et les propriétés mécaniques d'un composite thermocompressé lin/polypropylène. Ils ont montré une chute drastique des propriétés en traction avec l'augmentation de la porosité. L'étude a révélé que lorsque cette dernière est élevée, l'adhérence fibre/matrice est le principal facteur régissant le comportement mécanique du composite. Par conséquent, les propriétés en traction des fibres ont un impact limité sur la tenue globale du composite par rapport à l'interface fibre/matrice. D'un autre côté, la géométrie des fibres est également un paramètre pouvant avoir une influence significative sur les propriétés des biocomposites renforcés par des fibres courtes. En effet, Arnaud et al. [7] ont justifié l'amélioration des résultats en compression obtenus sur des bétons de chanvre par un meilleur enrobage des fibres lorsqu'elles sont courtes et fines. Cette observation est également partagée par Le et al. [5], qui ont travaillé sur les composites chanvre/amidon. De plus, l'étude a révélé qu'une augmentation du rapport volumique des fibres réduit la résistance en traction et flexion 4 points, mais augmente la déformabilité des matériaux [5]. Compte tenu de la nature poreuse de ces matériaux, de nombreux auteurs se sont également intéressés à leurs propriétés acoustiques. C'est ainsi que Glé et al. [8] ont mis en évidence la prédominance de l'influence du taux de compaction, par rapport au diamètre de fibres, sur l'absorption acoustique des bétons de chanvre. Le et al. [5] montrent également, que cette absorption augmente avec la proportion de fibres mais diminue avec la longueur des fibres.

Il apparaît ainsi clairement que les mécanismes mis en jeu dans les composites à fibres courtes, lors des sollicitations mécaniques et acoustiques, sont influencés par les paramètres de mise en œuvre pouvant être la proportion massique des renforts ( $M_f$ ) et la géométrie des fibres. En vue de contribuer à la compréhension de ces phénomènes, la présente étude a pour objectif d'identifier les caractéristiques morphologiques des fibres de bagasse, puis de caractériser le comportement acoustique et en flexion, d'agro-composites épais développés à partir des fibres de bagasse.

## 2. Plan d'expériences

L'utilisation des plans d'expériences pour la caractérisation des matériaux composites est courante [9]. Cette méthodologie donne des conditions expérimentales qui permettent l'interprétation optimale des résultats d'essais en minimisant le nombre de tests. Elle permet d'établir des polynômes de réponses empiriques décrivant, par interpolation des mesures, les solutions analytiques dans un domaine expérimental [10]. En particulier, les plans de Doehlert permettent d'identifier des polynômes du second ordre dont l'expression mathématique a la forme de l'équation 1, dans laquelle  $Y$  représente la réponse mesurée et  $x_i$  les variables codées qui sont associées aux  $k$  facteurs d'entrée. Les coefficients  $b_0$ ,  $b_i$  et  $b_{ij}$  correspondent respectivement à la valeur de la réponse au centre du domaine, aux termes du premier et aux non-linéarités du second ordre. Les  $b_{ij}$  traduisent les interactions entre deux variables d'entrée. Les variables  $x_1$  et  $x_2$  exprimées en coordonnées réduites, sont normalisées et centrées à l'intérieur de l'intervalle  $[-1 ; 1]$ . Elles correspondent respectivement au taux massique et au diamètre de fibres, dont les valeurs centrales et extrêmes sont données dans le Tableau 1. Les

---

limites du taux massique de fibres ( $M_f$ ), déterminées lors d’essais préliminaires, conduisent respectivement à des composites non poreux, en raison d’une imprégnation importante du renfort (40%) et d’autre part à des matériaux friables ayant une faible cohésion entre fibres dû à la faible quantité de résine (70%). Ainsi, les valeurs complémentaires de  $M_f$  du plan d’expérience (47; 55 et 62%) sont issues de la matrice des facteurs de Doehlert. Les limites physiques des centres des classes des diamètres de fibres sont 0,5 et 4 mm, suite au tamisage de la bagasse.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j \quad (\text{Eq. 1})$$

Facteurs	Variables	Niveaux		
		-1	0	1
Taux massique de fibres (%)	$x_1$	40	55	70
Centre des classes des fibres (mm)	$x_2$	0,5	2	4

Tableau 1 : Domaine expérimental des deux facteurs de l’étude. Valeurs réduites et valeurs physiques.

### 3. Méthodes expérimentales

#### 3.1 Matériaux

Les plants de canne à sucre de variété *saccharum officinarum* ont été récoltés en mars 2014 en Martinique. Les résidus fibreux obtenus après l’extraction du jus par écrasement, sont composés d’une grande variété de faisceaux de fibres courtes. Celles-ci ont été séchées à l’air libre à 31°C et une humidité relative (HR) de 18% en moyenne pendant quatre mois avant d’être stockées pour les besoins de l’étude dans des bacs entre 20 et 25°C et 30 à 60% HR. En raison de leur importante hétérogénéité, les fibres ont été séparées en trois classes (Figure 1) par tamisage à travers une série de quatre tamis successifs de tailles 0,5 ; 1 ; 2 et 4 mm, empilés sur un tamiseur *Siebtechnik ASM 200* vibrant à 50 Hz avec une amplitude fixe de 2 mm pendant 6 minutes. La caractérisation morphologique des fibres a été réalisée par analyse d’images sur un lot de 5658 fibres techniques individualisées. Les longueurs et diamètres des fibres ont été déterminés par une approximation elliptique des grands et petits axes, avec le logiciel *ImageJ*.

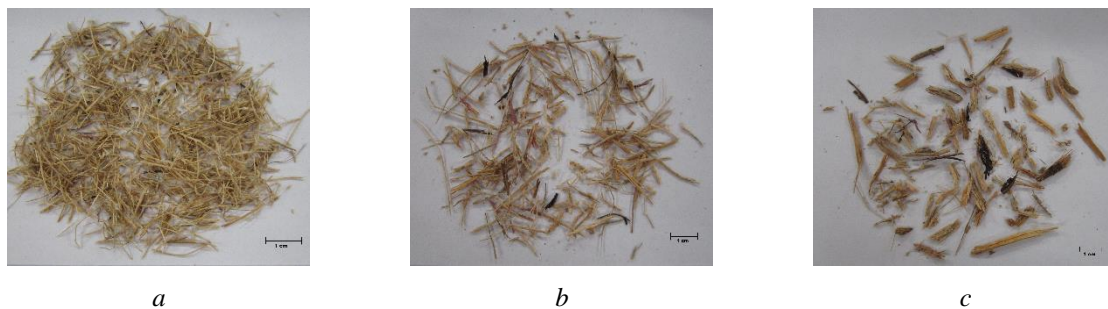


Figure 1 : Amas de fibres de bagasse des classes 0,5 à 1 mm (B05) (a), 1 à 2 mm (B1) (b) et 2 à 4 mm (B2) (c).

Avec deux facteurs, les sept types de matériaux du plan d’expérience de Doehlert permettant de couvrir le domaine d’étude sphérique [10] ont été fabriqués. Le Tableau 2 détaille la nomenclature de chaque matériau nommé par  $B$  (faisant référence à la bagasse) suivi de la classe de fibres (05 ; 1 et 2) et de  $M_f$  (40; 47; 55; 62; 70). Les valeurs réduites des variables et leur équivalence physique  $y$  sont également mentionnées. La matrice qui est un système époxy résine/durcisseur (SR 8500/SR 8525) fourni par Sicomin, avec une masse volumique de 1113 kg/m<sup>3</sup>, est mélangée aux fibres sans traitement préalable dans un pétrin à 130 tr/min pendant 90 secondes de façon à produire des matériaux les plus homogènes possibles. Le mélange est ensuite versé dans un moule métallique rigide spécialement développé pour l’étude dont les

surfaces sont protégées par un revêtement anti-adhérent (*Fluoref® 80*) pour faciliter le démoulage. L'ensemble est comprimé entre les deux plateaux chauffants d'une presse de thermocompression. Le cycle de polymérisation débute par une montée à 2°C/min jusqu'à la température de 80°C qui est maintenue constante pendant une heure, s'en suit un refroidissement à température ambiante. La pression assure le contact entre les butées mécaniques des parties supérieure et inférieure du moule, fixant l'épaisseur des plaques composites.

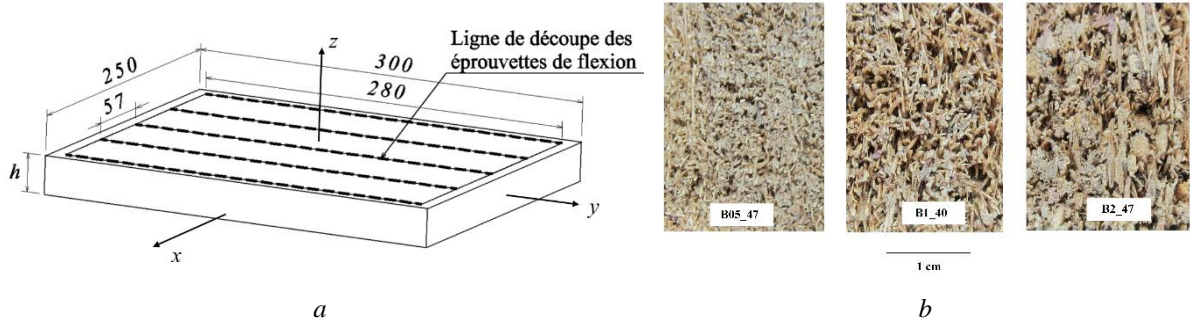


Figure 2 : Géométrie des plaques composites moulées et contour des éprouvettes de flexion. Notations et repérage. Unités en mm (a). Découpe dans le plan (yz) des matériaux B05\_47, B1\_40 et B2\_47 (b).

La masse volumique moyenne des plaques détournées de 280 mm de long et 230 mm de large (Figure 2a) est de 354 (7,74) kg/m<sup>3</sup> avec une épaisseur (*h*) de 28 (0,47) mm. Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses. Les taux volumiques de fibres ( $V_f$ ) et de porosité ( $V_P$ ) sont calculés à partir des relations 2 et 3, dans lesquelles  $\rho_c$ ,  $\rho_f$  et  $\rho_r$  représentent les masses volumiques respectives du composite, des fibres et de la résine.  $M_f$  correspond à la valeur du mélange initial. Les valeurs de  $V_f$  sont données dans le Tableau 4. La porosité globale se situe autour de 71 %.

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} M_f \quad (\text{Eq. 2})$$

$$V_P = 1 - \rho_c \left( \frac{M_f}{\rho_f} + \frac{(1-M_f)}{\rho_r} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Matériaux #	Nomenclature	Taux massiques de fibres (%)		Classes de fibres (mm)	
		Réduits	Physiques	Réduits	Physiques
1	B05_47	-0,5	47	-0,866	0,5 – 1
2	B05_62	0,5	62	-0,866	0,5 – 1
3	B1_40	-1	40	0	1 – 2
4	B1_55	0	55	0	1 – 2
5	B1_70	1	70	0	1 – 2
6	B2_47	-0,5	47	0,866	2 – 4
7	B2_62	0,5	62	0,866	2 – 4

Tableau 2 : Nomenclature et valeurs des paramètres de fabrication du plan d'expériences. Coefficients réduits et paramètres physiques correspondants.

### 3.2 Essais acoustiques

Les mesures d'absorption acoustique ont été réalisées à l'aide d'un tube à impédance Brüel & Kjaer (4206-T) de diamètre 100 mm. Ce dispositif expérimental est schématisé sur la Figure 3a. La source est un bruit blanc large bande (50 Hz - 1600Hz) et un nombre de 50 moyennes est effectué pour chaque mesure. Les échantillons sont découpés à l'aide d'une scie cloche, sans

lubrification, à un diamètre de 98 mm portés à 100 mm par un adhésif enroulé sur leur circonférence. Les mesures sont réalisées sur des paires d'éprouvettes superposées sans collage. L'épaisseur totale est portée à 56 mm (Figure 3b). L'échantillon ainsi constitué est placé dans le tube à impédance sur une paroi rigide (Figure 3a). La fonction de transfert totale ( $H_{12}^T$ ), donnée dans l'équation 5, est mesurée à partir des pressions acoustiques incidentes et réfléchies ( $p_1$  et  $p_2$ ), des distances ( $d_1$  et  $d_2$ ) respectives entre les microphones (M1 et M2) et la source, du nombre d'onde acoustique  $k$  et du coefficient de réflexion acoustique  $R$  sur la surface du matériau. Le coefficient d'absorption acoustique ( $\alpha$ ) est ainsi déterminé.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$H_{12}^T = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{-jkd_2} + Re^{jkd_2}}{e^{-jkd_1} + Re^{jkd_1}} \quad (\text{Eq. 5})$$

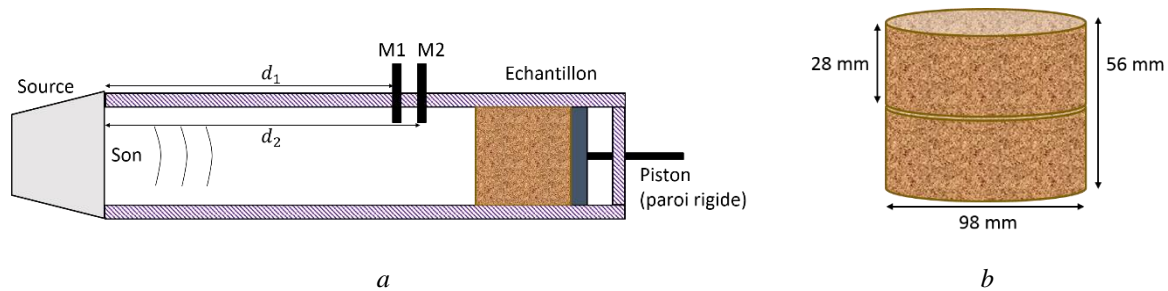


Figure 3 : Dispositif de mesure des pressions acoustiques dans un tube à impédance (a). Vue de l'échantillon d'épaisseur doublée (b).

### 3.3 Essais de flexion 3 points

Quatre éprouvettes de 280 mm de long et 57 mm de large sont découpées dans chaque plaque (Figure 2a) à l'aide d'une à ruban en vue des essais de flexion. L'un des bords de chaque éprouvette, parallèle au plan ( $yz$ ), est recouvert d'une fine couche de gel de silicone avant la réalisation d'un mouchetis pour la mesure des champs de déformation par stéréo-corrélation d'images avec le dispositif *GOM Aramis 5M*. Ces images ont été prises avec une résolution de 2448\*2050 pixels sur une surface de 125\*28 mm. Les échantillons sont conservés à 24(2)° C avec HR comprise entre 20 et 28%. Les essais de flexion 3 points sont réalisés sur une machine de traction universelle MTS équipée d'un capteur de 10 kN, à une vitesse de traverse de 2 mm/min (ISO 14125). Le rapport de forme des éprouvettes ( $L/h$ ) est de 9.  $L$  est la distance entre les appuis inférieurs et est fixée à 240 mm. Tous les essais sont réalisés trois fois pour chacun des matériaux (Tableau 2).

## 4. Résultats et discussion

### 4.1 Caractérisation des fibres

La bagasse est constituée de fibres individuelles agrégées sous forme de faisceaux. Les valeurs moyennes et coefficients de variation (CV) des propriétés des différentes classes sont répertoriés au Tableau 3. *BE* désigne la totalité de la bagasse de l'étude, reconstituée à partir de ces différentes classes et qui exclue les fibres qui ont traversé le tamis de taille la plus faible (0,5 mm). Ces dernières sont assimilées à des poussières et ne sont pas intégrées dans la fabrication des composites. On remarque que le diamètre des fibres augmente avec la taille des tamis, tout comme leur longueur, avec une variabilité importante. Les histogrammes de leurs distributions peuvent être adaptés de façon satisfaisante par des lois log-normales. Le recensement a révélé que les fibres de la *BE* ont en moyenne, une longueur de 6,34 mm et un diamètre de 1,04 mm. On peut noter au regard des proportions massiques que les fibres de petites dimensions (*B05* et *B1*) sont les plus représentées dans la bagasse. La masse volumique

moyenne de la bagasse mesurée par pycnométrie à hélium est de 1315 (0,7%) kg/m<sup>3</sup>. La dispersion entre les différentes classes est de 10% (Tableau 3).

Désignation	BE	B05	B1	B2	B4
Proportion massique (%)	100	28 (11%)	32 (6%)	19 (11%)	21 (19%)
$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	1315 (0,7%)	1305 (0,3%)	1323 (0,3%)	1310 (0,5%)	1375 (0,6%)
Longueur (mm)	6,34 (100%)	5,06 (76%)	6,60 (83%)	7,7 (106%)	13,08 (103%)
Diamètre (mm)	1,04 (113%)	0,60 (57%)	1,01 (63%)	1,67 (85%)	3,33 (90%)

Tableau 3: Propriétés de la bagasse par classe de fibres et de la totalité de la bagasse d'étude (BE). CV entre parenthèses.

#### 4.2 Caractérisation acoustique

Les coefficients d'absorption acoustique des composites renforcés par les fibres classés dans le Tableau 2 sont présentés sur la Figure 4. Ces coefficients présentent une évolution classique de matériaux fibreux [8-11]. Deux types de comportements distincts peuvent être décrits. Les matériaux *B1\_40*, *B1\_55*, *B2\_62* et *B2\_47* possèdent un maximum d'absorption à la première fréquence de résonance (1/4 de longueur d'onde) dans la configuration échantillon sur paroi rigide. Cette fréquence distingue un régime diffusif et un régime inertiel. L'éprouvette *B1\_40* possède le coefficient d'absorption le plus important et est considéré comme le matériau de référence. Les matériaux *B05\_62*, *B05\_47* et *B1\_70* ont un coefficient d'absorption dégradé. Cette différence de comportement s'explique par la diversité de la géométrie des pores des matériaux. Un examen de la microstructure révèle que le diamètre moyen des pores du matériau *B1\_40* est de 2,61 (25 %) mm, de 2,07 (25%) mm pour *B2\_47* le matériau le plus proche de la référence et de 1,03 (30%) mm pour *B05\_47*, le plus éloigné de celle-ci. Ainsi l'absorption est maximale quand le diamètre des pores est proche de 2,6 mm et reste correcte pour une diminution de 20% de la taille moyenne des pores. En revanche des pores trop fermés, 60% plus petits que les pores de l'éprouvette de référence, produisent des pertes visco-thermiques trop importantes qui annihilent l'absorption à la fréquence de résonance [11].

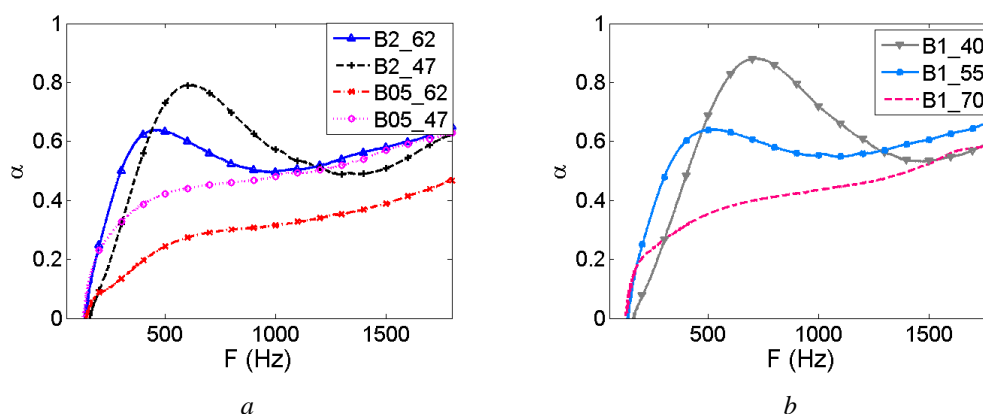


Figure 4 : Mesures de l'absorption acoustique en fonction de la fréquence ( $F$ ) : influence de la géométrie des fibres (a) et de leur teneur (b).

#### 4.3 Caractérisation mécanique

Les courbes d'évolution de l'effort en fonction du déplacement de la traverse en flexion 3 points de certains échantillons sont présentées dans la Figure 5. Le comportement des éprouvettes est d'abord linéaire puis suivi d'une non linéarité jusqu'à une force maximale avant une chute brutale. La tenue en flexion de nos biocomposites poreux est assimilable à un comportement fragile. Les propriétés mécaniques croissent avec le taux de fibres (Figure 5a) et leur diamètre (Figure 5b). Les rigidités de flexion ( $K$ ), mesurées sur la partie linéaire, entre 50 et 100 N, l'effort maximal ( $F_{max}$ ) et la flèche correspondante ( $\delta_{max}$ ) sont présentées le Tableau 3.

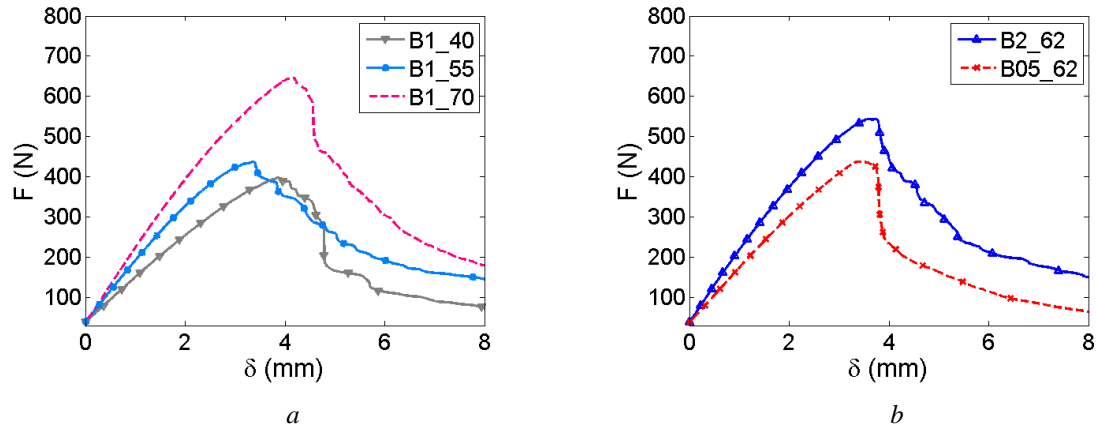


Figure 5 : Influence du taux de fibres (a) et du diamètre de fibres (b) sur l'évolution de la force en fonction du déplacement en flexion 3 points.

Dans l'épaisseur, sous l'appui central, les mesures de déformations normales  $\epsilon_y$ , d'une éprouvette B1\_40, fléchie de 2,5 mm (Figure 6a) sont comparées aux valeurs théoriques données par l'expression 6 établie pour des matériaux homogènes, dans laquelle  $z$  et  $\delta$  représentent respectivement la côte dans l'épaisseur et la flèche. On constate que les champs de déformations normales sont très hétérogènes sur les bords supérieurs et inférieurs des éprouvettes (Figure 6b). Ceci se traduit par une variabilité importante entre les essais 1, 2 et 3 lorsque  $z/h > 0,1$  ou  $z/h < -0,1$ . Sur les bords supérieurs de l'éprouvette s'amorcent, très rapidement des sur-contraintes. On constate les mêmes phénomènes en cisaillement (Figure 7a). Ces concentrations se traduisent in fine par la rupture par fissuration oblique dont une géométrie typique est présentée Figure 7b. A contrario, au voisinage du plan neutre, sur lequel les déformations sont nulles (Figure 6a), pour  $z/h$  appartenant à l'intervalle  $[-0,1 ; 0,1]$ , soit entre -2,8 et 2,8 mm les résultats montrent comme le modèle, que  $\epsilon_y$  évolue linéairement, mais les valeurs mesurées s'écartent de 36% des valeurs calculées suggérant ainsi que l'hétérogénéité du matériau et / ou le faible rapport de forme ( $L/h$ ) de l'éprouvette complexifient l'identification de son comportement mécanique.

$$\epsilon_y(z) = \frac{12 z \delta}{L^2} \quad (\text{Eq. 6})$$

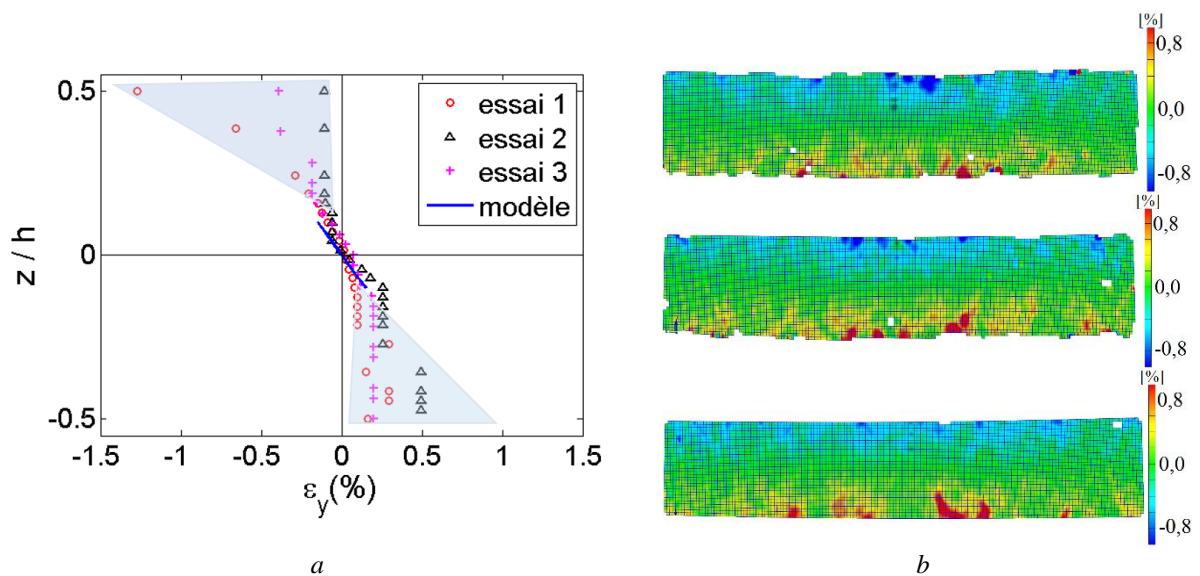


Figure 6: Evolution et variabilité de  $\epsilon_y$  d'une éprouvette B1\_40 en flexion 3 points dans l'épaisseur totale (a) et champs de déformations des trois essais (b) pour une flèche de 2,5 mm.



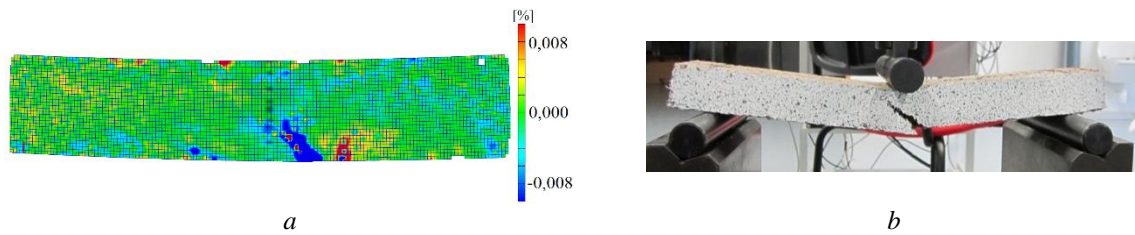


Figure 7 : Déformation  $\gamma_{zy}$  à une flèche de 4,7 mm (a) et rupture (b) d'une éprouvette B1\_40 en flexion 3 points.

Les mesures de  $K$  montrent un écart de 33% entre les composites renforcés à 40% (B1\_40) et à 70% (B1\_70) (Figure 5a). De façon générale, l'écart de raideur est de 36% entre les matériaux les plus (B1\_70) et moins (B05\_47) rigides. Le même constat peut être fait avec les forces maximales. Les rigidités, résistance à la flexion et l'absorption acoustique croissent avec le diamètre des fibres. Cependant, si les propriétés mécaniques augmentent avec le taux de fibres, l'absorption acoustique diminue avec ce dernier. La flèche maximale ( $\delta_{max}$ ) n'évolue pas de manière significative pour les matériaux. Les CV sont compris entre 4 et 24% et restent acceptables au regard de la variabilité intra-classe du diamètre des fibres considérées dans cette étude, pouvant aller jusqu'à 85% (Tableau 3).

Echantillon	$V_f$ (%)	$K$ (N/mm)	$F_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$\alpha_{min}$ (350-1000 Hz)	$\alpha_{max}$ (350-1000 Hz)
B05_47	13	114 (11%)	362 (24%)	4,2 (18%)	0,36	0,48
B05_62	16	127 (6%)	434 (7%)	4,5 (8%)	0,16	0,32
B1_40	11	118 (8%)	410 (4%)	4,6 (12%)	0,38	0,88
B1_55	15	150 (5%)	462 (14%)	4,3 (10%)	0,55	0,64
B1_70	19	177 (11%)	599 (12%)	4,7 (3%)	0,29	0,44
B2_47	13	128 (11%)	418 (9%)	4,4 (11%)	0,44	0,79
B2_62	17	161 (18%)	457 (19%)	4,2 (4%)	0,50	0,64

Tableau 4 :  $K$ ,  $F_{max}$ ,  $\delta_{max}$ ,  $\alpha_{min}$  et  $\alpha_{max}$  sur l'intervalle [350 - 1000] Hz des matériaux issus du plan d'expériences. CV entre parenthèses.

#### 4.4 Surfaces de réponses

Les réponses  $Y_1$ ,  $Y_2$  et  $Y_3$  du Tableau 5 sous la forme du polynôme (équation 1) correspondent respectivement à  $K$ ,  $F_{max}$ , et  $\delta_{max}$ . On remarque que pour la rigidité et la force maximale, les coefficients  $b_1$  sont respectivement 2 et 3,5 fois plus élevés que les coefficients  $b_2$ . De ce fait, le taux de fibres a une influence beaucoup plus importante sur ces propriétés que le diamètre de fibres. Les termes  $b_{12}$ , du même ordre de grandeur que les  $b_1$  et  $b_2$ , indiquent qu'il existe un couplage important de la contribution des deux paramètres.

Réponse	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{12}$
$Y_1$ (N/mm)	149,90	27,57	13,54	-2,30	-22,71	11,30
$Y_2$ (N)	462,06	81,38	23,00	42,94	-73,02	-19,10
$Y_3$ (mm)	4,30	0,04	-0,04	0,32	-0,13	-0,31

Tableau 5 : Coefficients des polynômes des réponses  $K$ ,  $F_{max}$  et  $\delta_{max}$ .

Les surfaces de réponses de la rigidité et de la résistance en fonction du taux et du diamètre de fibres sont représentées dans la Figure 8. Ces résultats confirment les constats précédents selon lesquels l'optimum des propriétés mécaniques est atteint pour un taux de fibres élevé. Cependant, pour les taux de fibres élevés, la rigidité croît avec le diamètre de fibres tandis que les meilleures résistances à la rupture sont obtenues pour un diamètre de fibres moyen.

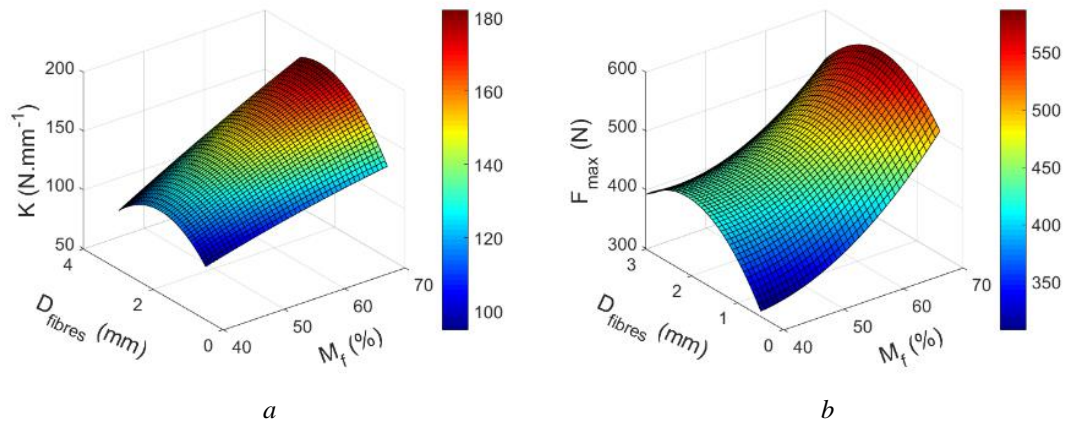


Figure 8 : Surfaces de réponses des propriétés issues de flexion 3 points en fonction du diamètre et du taux de fibres :  $K$  (a) et  $F_{max}$  (b).

La Figure 9 présente les coefficients d'absorption acoustique minimum et maximum calculés sur un intervalle de 350 Hz à 1000 Hz en fonction de la variabilité de la rigidité de ces matériaux. Au regard de ces résultats, un compromis acoustico-mécanique médian peut être obtenu pour les matériaux  $B1_{55}$  et  $B2_{62}$ . Toutefois, si on souhaite maximiser les propriétés mécaniques le choix se portera sur  $B1_{70}$  tandis qu'une maximisation de l'absorption acoustique privilégie le matériau  $B1_{60}$ .

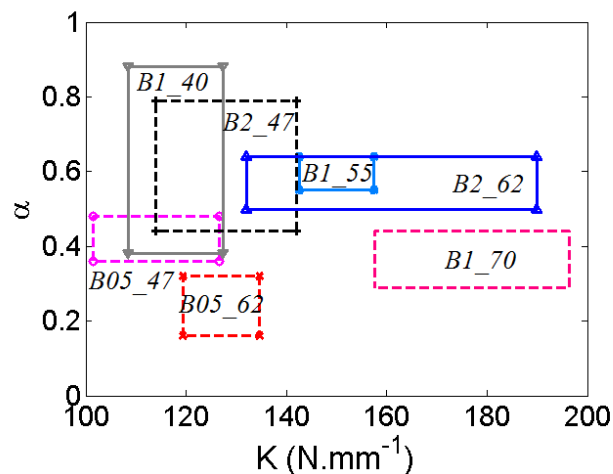


Figure 9: Absorption minimale et maximale sur un intervalle [350 - 1000] Hz en fonction de la variabilité de la rigidité des matériaux.

### 5. Conclusion

L'étude présentée a permis de caractériser les fibres de canne à sucre comme renfort à fibres courtes, dont les distributions en longueur et diamètre sont approchées par une loi log-normale. Les composites renforcés par ces fibres en thermocompression ont été caractérisés acoustiquement et mécaniquement. L'analyse acoustique a montré que l'absorption acoustique augmente avec le diamètre des fibres, tout en diminuant avec leur proportion massique. Cependant, la rigidité et la résistance à la rupture en flexion augmentent avec ces paramètres, le taux de fibres ayant l'influence la plus élevée. Afin d'obtenir un matériau dont les propriétés acoustiques et mécaniques sont maximales, la suite de ces travaux a pour but de développer une structure sandwich avec une âme composée de bagasse et de peaux en lin/époxy.

## Remerciements

Les auteurs remercient la Région Martinique pour le financement de ces travaux de recherche.

## Références

- [1] H. S. Ramaswamy, B. M. Ahuja, S. Krishnamoorthy. Behaviour of concrete reinforced with jute, coir and bamboo fibres. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 134, pp. 452-461, 1983.
- [2] P. Darsana, R. Abraham, A. Joseph, A. Jasheela, P.R. Binuraj, J. Sarma Development of Coir-fibre Cement Composite Roofing Tiles. *Procedia Technology*, 24, pp. 169-178, 2016.
- [3] C. Onésippe, N. Passe-Coutrin, F. Toro, S. Delvasto, K. Bilba, M.A Arsène. Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: Thermal considerations. *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41, (4), pp. 549-556, 2010.
- [4] Y. Cao, S. Shibata, I. Fukumoto. Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments. *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37, (3), pp. 423-429, 2006.
- [5] A. T. Le, A. Garcoin, A. Li, T.H. Mai, N. El Wakil. Influence of various starch/hemp mixtures on mechanical and acoustical behavior of starch-hemp composite. *Composite Part B*, 75, pp. 201-211, 2015.
- [6] J. Merotte, A. Le Duigou, A. Bourmaud, K. Behlouli, C. Baley. Mechanical and acoustic behaviour of porosity controlled randomly. *Polymer Testing*, 51, pp. 174-180, 2016.
- [7] L. Arnaud, E. Gourlay, Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 28, (1), pp.50-56, 2012.
- [8] P. Glé, E. Gourdon, L. Arnaud, Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Applied Acoustics*, 72, pp. 249 - 259, 2011.
- [9] P. B. Gning, S. Liang, L. Guillaumat, W. J. Pui, Influence of process and test parameters on the mechanical properties of flax/epoxy composites using response surface methodology. *Journal of Materials Science*, 46, 2011.
- [10] J. Goupy, L. Creighton. Introduction aux plans d'expériences. Dunod (Ed.) *L'usine Nouvelle*, 2 10 049744 8, 2006.
- [11] J.F Allard, N. Atalla. Propagation of sound in porous media: Modelling sound absorbing materials, second edition. Wiley, 978-0-470-74661-5, 2009.