

Development of Bio-composite Reinforced by Sugarcane Fibres Développement d'un Bio-composite Renforcé par des Fibres de Canne à Sucre

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

DRIVE EA1859, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F58000 Nevers, France

Corresponding Author Email: geremie.postdam@univ-lille.fr

<https://doi.org/10.18280/rcma.290507>

Received: 14 March 2018

Accepted: 3 December 2018

Keywords:

*bagasse, bio-composite, sound
absorption, mechanical properties,
stereo-digital image correlation*

Mots-clés :

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

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 thermo-compression 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 shown a fragile behaviour, 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.

RÉSUMÉ :

La présente étude a pour objectif de développer 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 respectivement, 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.

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 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, Mérotte et al. [6] ont mis en évidence une relation entre la microstructure et les propriétés mécaniques d'un composite thermo-compressé 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 ayant une influence significative sur les propriétés mécaniques des composites bio-sourcés 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 leur longueur.

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 tels que 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, de composites agro-sourcés 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 due 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.

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

Tableau 1. Domaine expérimental des deux facteurs de l'étude, valeurs réduites et valeurs physiques

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

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 (cf. 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.

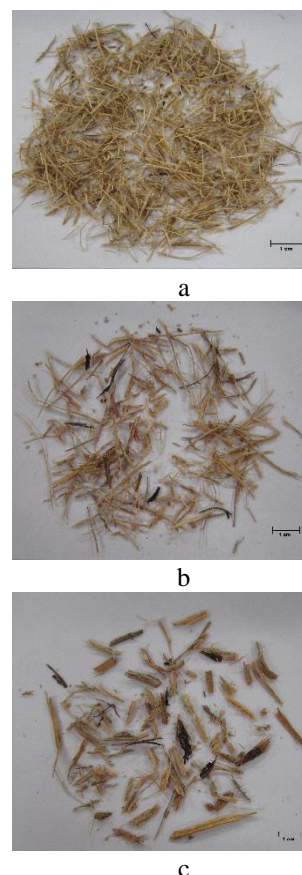


Figure 1. Amas de fibres de bagasse des classes respectivement, 0,5 à 1 mm (B05) (a), 1 à 2 mm (B1) (b) et 2 à 4 mm (B2) (c)

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/m³, 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. Il 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.

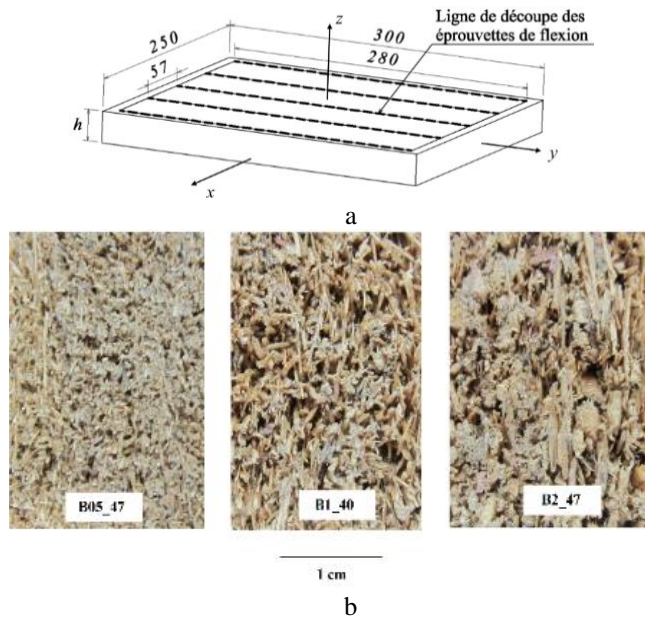


Figure 2. Géométrie des plaques composites moulées et contour des éprouvettes de flexion avec comme notations et repérage respectivement, unités en mm (a) et découpe dans le plan (yz) des matériaux B05_47, B1_40 et B2_47 (b)

La masse volumique moyenne des plaques détournées de 280 mm de long et 230 mm de large (cf. Figure 2a) est de 354 (7,74) kg/m³ 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 ρ_c , ρ_f et ρ_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 %.

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

$$V_p = 1 - \rho_c \left(\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{(1-M_f)}{\rho_r} \right) \quad (3)$$

Tableau 2. Nomenclature et valeurs des paramètres de fabrication du plan d'expériences avec les coefficients réduits et paramètres physiques correspondants

Matériaux	Nom	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

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 (cf. Figure 3b). L'échantillon ainsi constitué est placé dans le tube à impédance sur une paroi rigide (cf. 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 (α) est ainsi déterminé.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (4)$$

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

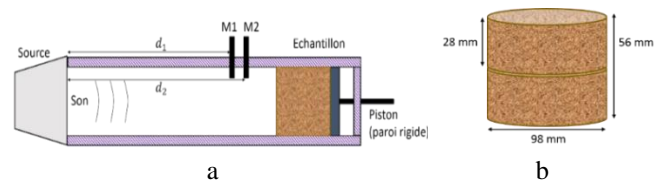


Figure 3. Dispositif de mesure des pressions acoustiques dans un tube à impédance (a) et vue de l'échantillon d'épaisseur doublée (b)

3.3 Essais de flexion 3 points

Quatre éprouvettes de 280 mm de long et 57 mm de large sont découpées dans chaque plaque (cf. Figure 2a) à l'aide d'une scie 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° C avec une humidité relative (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 8,5. 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). Les contraintes normales, déformations et modules d'élasticité moyens sont calculés à partir des relations 6 à 8 dans lesquelles b est la largeur de l'éprouvette, v le déplacement de la traverse et s la pente de la courbe force-déplacement.

$$\sigma_y = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon_y = \frac{6hv}{L^2} \quad (7)$$

$$E_y = \frac{L^3}{4bh^3} * s \quad (8)$$

4. MORE 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 exclut 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/m³. La dispersion entre les différentes classes est de 10 % (Tableau 3).

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

Désignation	BE	B05	B1	B2	B4
Proportion massique (%)	100	28 (11%)	32 (6%)	19 (11%)	21 (19%)
ρ_f (kg/m ³)	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%)

4.2 Caractérisation acoustique

Les coefficients d'absorption acoustique des composites

renforcés par les fibres classées dans le Tableau 2 sont présentés sur la Figure 4. Ces coefficients présentent une évolution classique de matériaux fibreux [8, 11]. Deux types de comportement 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. Le matériau de 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].

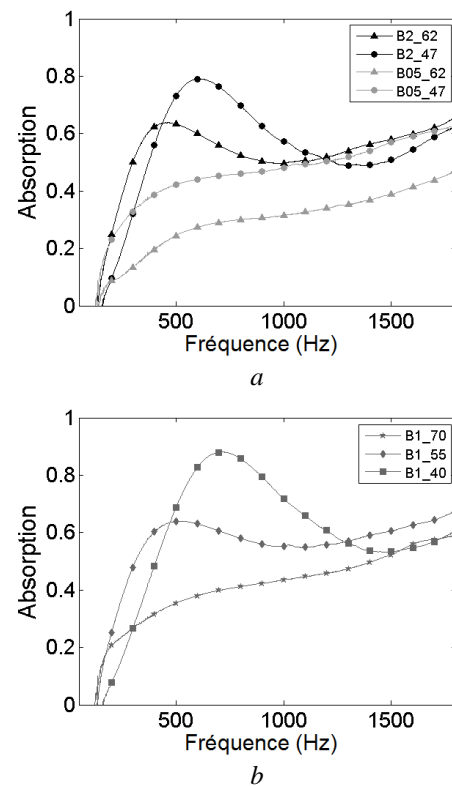


Figure 4. Mesures de l'absorption acoustique en fonction de la fréquence (F) avec l'influence de la géométrie des fibres (a) et de leur teneur (b)

4.3 Caractérisation mécanique

Les courbes d'évolution de la contrainte en fonction de la déformation 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 contrainte maximale avant une chute brutale. La tenue en

flexion de ces composites bio-sourcés poreux est assimilable à un comportement fragile. Les propriétés mécaniques croissent avec le taux de fibres (cf. Figure 5a) et leur diamètre (cf. Figure 5b). Les modules de flexion (E_y), mesurés sur la partie linéaire, entre 0,40 et 0,80 MPa, la contrainte maximale (σ_y^{max}) et la déformation correspondante (ε_y^{max}) sont présentés le Tableau 3.

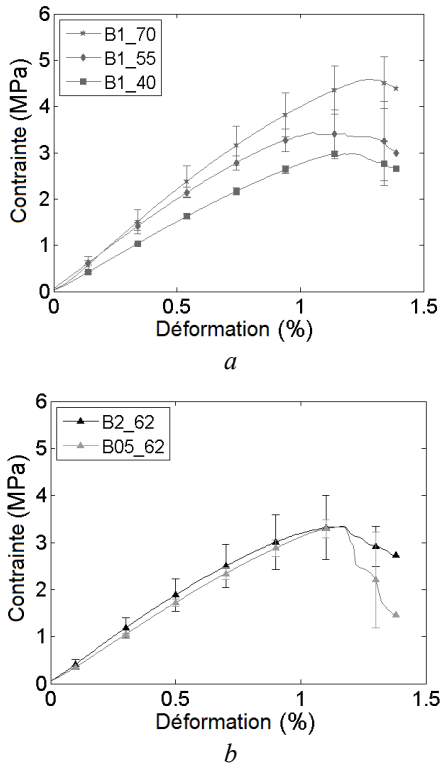


Figure 5. Influence du taux de fibres (a) et du diamètre de fibres (b) sur l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation en flexion 3 points

Dans l'épaisseur, sous l'appui central, les mesures de déformations normales ε_y , d'une éprouvette B1_40, fléchiée de 2,5 mm (cf. Figure 6a) sont comparées aux valeurs théoriques données par l'expression (9) établie pour des matériaux homogènes, dans laquelle z et δ représentent respectivement la position 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 (cf. 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 apparaissent très rapidement des sur-contraintes. On constate les mêmes phénomènes en cisaillement (cf. Figure 7a). Ces concentrations se traduisent in fine par la rupture via une fissuration oblique dont une géométrie typique est présentée sur la Figure 7b. A contrario au voisinage du plan neutre, sur lequel les déformations sont nulles (cf. 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 ε_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.

$$\varepsilon_y(z) = \frac{12z\delta}{L^2} \quad (9)$$

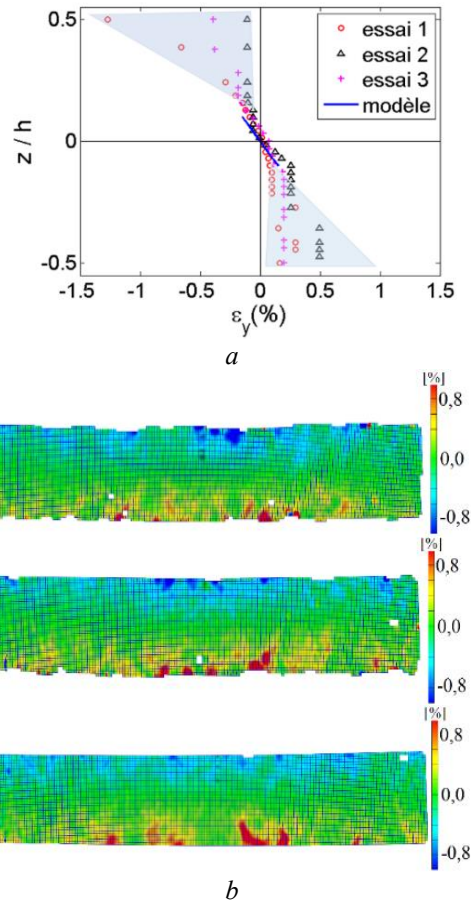


Figure 6. Evolution et variabilité de ε_y d'une éprouvette B1_40 en flexion 3 points dans l'épaisseur totale (a) et champs de déformations des trois essais (b) pour une flèche de 2,5 mm

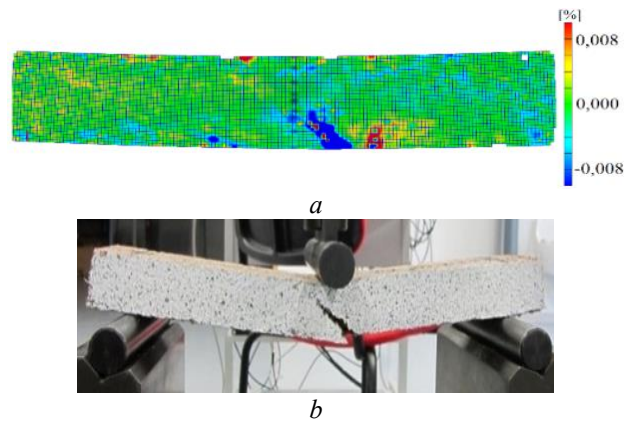


Figure 7. Déformation γ_{zy} à une flèche de 4,7 mm (a) et rupture (b) d'une éprouvette B1_40 en flexion 3 points

Les mesures de E_y montrent un écart de 33 % entre les composites renforcés à 40 % (B1_40) et à 70 % (B1_70) (cf. Figure 5a). De façon générale, l'écart de rigidité est de 36 % entre les matériaux les plus (B1_70) et moins (B05_47) rigides. Le même constat peut être fait avec les contraintes maximales. Les rigidités, résistance à la flexion et absorptions acoustiques 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 déformation maximale (ε_y^{max}) n'évolue pas de manière

significative pour les matériaux. Les CV sont compris entre 3 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).

Tableau 4. E_y , σ_y^{max} , ε_y^{max} , α_{min} et α_{max} sur l'intervalle [350 - 1000] Hz des matériaux issus du plan d'expériences avec CV entre parenthèses

Echantillon	V_f (%)	E_y (MPa)	σ_y^{max} (MPa)	ε_y^{max} (%)	α_{min} (350-1000 Hz)	α_{max} (350-1000 Hz)
B05_47	13 (2%)	308 (10%)	2.87 (24%)	1.22 (18%)	0,36	0,48
B05_62	16 (4%)	348 (5%)	3.46 (7%)	1.30 (8%)	0,16	0,32
B1_40	11 (1%)	309 (5%)	3.19 (5%)	1.34 (11%)	0,38	0,88
B1_55	15 (1%)	403 (6%)	3.65 (15%)	1.26 (10%)	0,55	0,64
B1_70	19 (1%)	466 (12%)	4.65 (13%)	1.37 (3%)	0,29	0,44
B2_47	13 (1%)	342 (11%)	3.29 (10%)	1.28 (11%)	0,44	0,79
B2_62	17 (2%)	395 (19%)	3.40 (19%)	1.26 (4%)	0,50	0,64

4.4 Surfaces de réponses

Les réponses Y1 et Y2 du Tableau 5 sous la forme du polynôme (équation 1) correspondent respectivement à E_y , et σ_y^{max} . On remarque que, pour la rigidité et la contrainte maximale, les coefficients b_1 sont respectivement 3 et 5,4 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.

Tableau 5. Coefficients des polynômes des réponses E_y et σ_y^{max}

Réponse	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
Y_1 (MPa)	402,66	67,92	23,26	-15,30	-67,70	7,58
Y_2 (MPa)	3,65	0,60	0,11	0,27	-0,61	-0,28

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.

La Figure 9 présente les coefficients d'absorption acoustique minima et maxima 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_40.

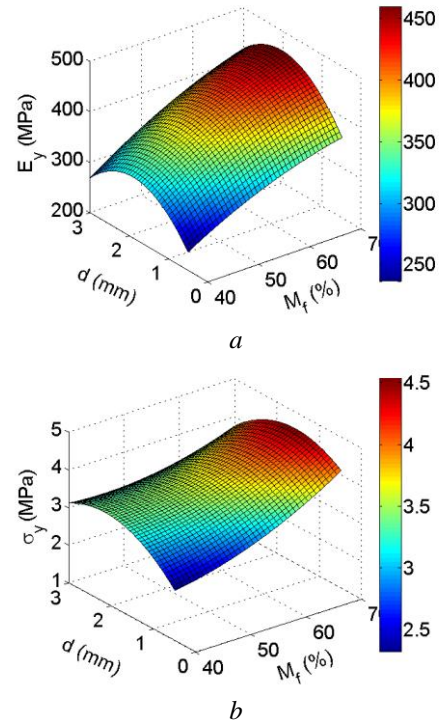


Figure 8. Surfaces de réponses des propriétés issues de flexion 3 points en fonction du diamètre et du taux de fibres avec E_y (a) et σ_y^{max} (b)

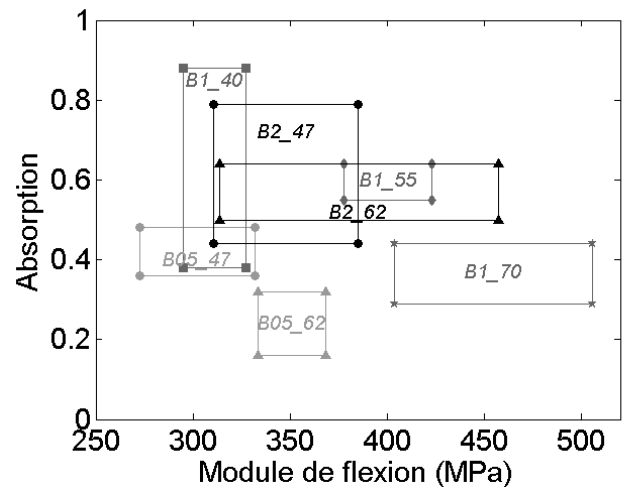


Figure 9. Absorption minimale et maximale sur un intervalle [350 - 1000] Hz en fonction de la variabilité de la rigidité des matériaux

5. CONCLUSIONS

L'étude présentée a permis de caractériser les fibres de canne à sucre comme renforts 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

L'étude présentée a permis de caractériser les fibres de canne à sucre comme renforts 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.

REFERENCES

- [1] Ramaswamy, H.S., Ahuja, B.M., Krishnamoorthy, S. (1983). Behaviour of concrete reinforced with jute, coir and bamboo fibres. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 134: 452-461. [http://dx.doi.org/10.1016/0262-5075\(83\)90044-1](http://dx.doi.org/10.1016/0262-5075(83)90044-1)
- [2] Darsana, P., Abraham, R., Joseph, A., Jasheela, A., Binuraj, P.R., Sarma, J. (2016). Development of coir-fibre cement composite roofing tiles. *Procedia Technology*, 24: 169-178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.024>
- [3] Onésippe, C., Passe-Coutrin, N., Toro, F., Delvasto, S., Bilba, K., Arsène, M.A. (2010). Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: Thermal considerations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(4): 549-556. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.01.002>
- [4] Cao, Y., Shibata, S., Fukumoto, I. (2006). Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments. *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(3): 423-429. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.045>
- [5] Le, A.T., Garcoin, A., Li, A., Mai, T.H., El Wakil, N. (2015). Influence of various starch/hemp mixtures on mechanical and acoustical behavior of starch-hemp composite. *Composite Part B: Engineering*, 75: 201-211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.038>
- [6] Merotte, J., Le Duigou, A., Bourmaud, A., Behlouli, K., Baley, C. (2016). Mechanical and acoustic behaviour of porosity controlled randomly. *Polymer Testing*, 51: 174-180.
- [7] Arnaud, L., Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 28(1): 50-56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>
- [8] Glé, P., Gourdon, E., Arnaud, L. (2011). Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Applied Acoustics*, 72: 249-259.
- [9] Gning, P.B., Liang, S., Guillaumat, L., Pui, W.J. (2011). Influence of process and test parameters on the mechanical properties of flax/epoxy composites using response surface methodology. *Journal of Materials Science*, 46(21): 6801-6811. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-011-5639-9>
- [10] Goupy, J., Creighton, L. (2006). Introduction aux plans d'expériences. Dunod (Ed.) L'usine Nouvelle.
- [11] Allard, J.F., Atalla, N. (2009). Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials, second edition. Wiley.