

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Caractérisation ultrasonore et mécanique d'un matériau  
bio-composite à base de farine de bois d'olivier et de polypropylène**

N. Bouhamed<sup>a,b</sup>, S. Souissi<sup>b</sup>, P. Marechal<sup>a</sup>, M. Ben Amar<sup>b</sup>, O. Lenoir<sup>a</sup>, R. Leger<sup>c</sup> et A.  
Bergeret<sup>c</sup>

<sup>a</sup>LOMC, Normandie Univ, LE HAVRE, CNRS, 75 rue Bellot, 76600 Le Havre, France

<sup>b</sup>ENIS, route sokra km 3, 3038 Sfax, Tunisie

<sup>c</sup>Ecole des Mines d'Alès, C2MA, 6 avenue de Clavières, 30319 Alès, France  
bouhamednesrine4@gmail.com

Cette étude traite de l'évaluation des propriétés mécaniques d'un matériau bio-composite à base de polypropylène (PP) renforcé par des fibres végétales farine de bois d'olivier (FBO). Dans un premier temps, divers bio-composites PP/FBO avec des teneurs variables en FBO (0, 10, 20 et 30% en masse), ont été mis en œuvre par extrusion bi-vis puis mis en forme par moulage par injection. L'effet de la teneur en FBO d'une part et de la modification chimique de cette dernière par l'ajout du silane comme agent de couplage d'autre part, sont les deux paramètres qui font l'objet de la présente étude de sensibilité. Dans un second temps, les propriétés ultrasonores des bio-composites et leur variabilité sont mesurées et discutées. Le protocole expérimental de caractérisation ultrasonore en immersion est détaillé. Pour ces premiers résultats, l'hypothèse d'homogénéité et d'isotropie du matériau est discutée. Les résultats d'évaluation non-destructive ultrasonore sont alors comparés avec ceux obtenus avec des essais destructifs de traction mécanique. Enfin, les résultats de caractérisation via ces deux méthodes sont comparés et discutés. L'influence significative du traitement de la FBO avec l'agent de couplage silane est mise en évidence, démontrant nettement que le silane favorise l'adhésion de la charge d'origine végétale qu'est la FBO avec la matrice polymère en PP.

## 1 Introduction

La Tunisie est l'un de ces principaux pays producteurs d'olives avec plus de 65 millions d'oliviers, cultivés sur 16 800 km<sup>2</sup>. Cependant, le système d'extraction d'huile génère un grand volume de déchets de bois d'olivier sous forme de farines ce qui représente un problème potentiel de pollution de l'environnement. Une des façons de résoudre le problème est de valoriser ces farines de bois d'olivier (FBO) en les incorporant dans un polymère [1], en l'occurrence du polypropylène (PP) [2-3]. Des contrôles non destructifs (CND) sont de plus en plus souvent utilisés pour évaluer les propriétés mécaniques de ces matériaux composites à base de polymères [4-6]. Certaines méthodes de CND sont mises en œuvre pour suivre leurs propriétés élastiques en conditions réelles d'utilisation [7-9]. Dans ce papier, nous nous intéressons particulièrement à des contrôles ultrasonores [10]. Ils nous permettent de faire des mesures de vitesses d'ondes se propageant dans des plaques de bio-composites. Sous certaines hypothèses, ces mesures permettent de remonter à l'estimation de grandeurs mécaniques telles que le module d'Young et le coefficient de Poisson [11]. Ces estimations, sous certaines conditions, peuvent être comparées aux résultats d'essais mécaniques traditionnels mécaniques.

Dans une première partie, le protocole d'élaboration de plaques bio-composites est décrit. Dans une seconde partie, les différentes méthodes de contrôle ultrasonores sont présentées. Les mesures des vitesses longitudinale et transversale des ondes se propageant dans les plaques de bio-composites sont discutées. Dans la troisième partie, les résultats des essais mécaniques par mesures ultrasonores et par test destructif sont présentés. En conclusion, les résultats présentés sont discutés et ouvrent des perspectives.

## 2 Elaboration des bio-composites

### 2.1 Matériaux utilisés

Le polypropylène (PP) utilisé dans cette étude est un homopolymère standard PP H9069 (Braskem, Brésil). La FBO est récupérée à partir des déchets de bois engendrés lors de travaux agricoles. Elle est tamisée et stockée de sorte à la protéger contre l'humidité. Deux types de FBO ont été utilisés comme charges de renforcement, celle non traitée (FBO) et celle traitée (FBOT) à 3% en masse avec un agent de couplage [12], l'amino-propyl-triéthoxy-silane

(FBOT). Pour la FBOT, l'agent de couplage est ajouté par étapes: gazéification de la farine brute pour éliminer les traces d'esters, puis mélange et intégration du silane pendant 3 heures à une température de 180°C.

### 2.2 Fabrication des échantillons

Afin d'éliminer toute l'humidité absorbée et d'éviter la formation d'agglomérats, les FBO ont été pré-séchées à 105°C pendant 24 h avant extrusion. Le polymère PP et les fibres FBO ont été mélangés dans une mini extrudeuse bi-vis co-rotatives (DSM Xplore Netherlands) avec 3 zones de chauffage. La vis de diamètre 10 mm a été réglée à une vitesse de rotation de 100 tr/min. Le mélange est extrudé à travers une matrice cylindrique de diamètre 1 mm à un débit de 200 g/h. Le jonc est refroidi, puis découpé en granulés qui sont à leur tour séchés pendant 24 h à 60°C. Après extrusion, les granulés séchés sont moulés par injection en utilisant une machine de moulage (Demag Plastic Group Extra 50-200). L'injection est produite à une température de 180°C et une pression de 1000 bars pour réaliser les échantillons de bio-composites nécessaires aux essais, sous forme de plaques et d'éprouvettes. Différents taux de charge, de 0, 10 20 ou 30% ont été élaborés. Des plaques d'épaisseur  $e_p = 4$  mm et de dimension  $l = 100$  mm et  $L = 120$  mm en largeur et longueur respectivement ont été moulées pour les essais ultrasonores (Figure 1).



Figure 1 : Plaques de dimensions  $L \times l \times e_p = 120 \times 100 \times 4$  mm<sup>3</sup> de bio-composites PP/FBO avec une fraction massique croissante de FBO de 0 à 30%.

Dans le même temps, des éprouvettes ont été injectées avec les mêmes compositions de PP/FBO de 0 à 30%, avec la géométrie normalisée en haltère au format ISO 1/2 conformément aux conditions d'essai spécifiées dans la norme ISO 527-2 [13] pour des essais de traction conventionnels. En procédant par lot (injection simultanée de plaques et d'éprouvettes), on s'assure ainsi de limiter la dispersion des propriétés effectives du mélange PP/FBO.

## 3 Mesures des vitesses par ultrasons

### 3.1 Dispositif expérimental

Afin de pouvoir réaliser les mesures des vitesses longitudinale et transversale de propagation de l'onde dans les plaques de composite et d'en déduire les propriétés élastiques des plaques, ces dernières ainsi que des transducteurs ont été disposés dans une cuve remplie d'eau (Figure 2). Les plaques ne restent immergées que le temps de la mesure afin d'éviter tout phénomène de reprise hydrique [8, 9, 14].

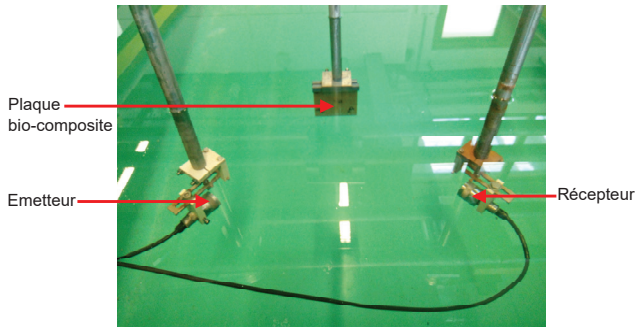


Figure 2 : Dispositif expérimental en incidence oblique.

Pour les mesures des vitesses longitudinales, un seul transducteur (Panametrics) de diamètre 19 mm est disposé en incidence normale et utilisé alternativement en émetteur et récepteur et de fréquence centrale 5 MHz. Pour les mesures des vitesses transversales dans les plaques, le dispositif expérimental utilisé en incidence oblique est illustré par la Figure 2. Dans cette configuration, deux transducteurs ont été utilisés, dont l'un est l'émetteur et l'autre le récepteur. L'angle, repéré par rapport à la normale, fait par les faisceaux générés ou reçus par les deux transducteurs est réglé suivant la loi de Snell-Descartes. Dans cette étude, on a déterminé un angle critique longitudinal de  $34^\circ$  à partir duquel les ondes longitudinales ne se propagent plus tandis que les ondes transversales se propagent.

Les transducteurs sont excités à l'aide d'un générateur d'impulsions à large bande (Sofranel) et les signaux sont acquis à l'aide d'un oscilloscope numérique (Yokogawa). Ils sont moyennés sur 1024 acquisitions, la moyenne étant enregistrée sur 125 k points.

### 3.2 Analyse des résultats

Les signaux ont été traités à l'aide du logiciel Matlab suivant deux méthodes d'estimation : le temps de vol et la méthode spectrale.

#### 3.2.1 Mesure du temps de vol

Le calcul de la vitesse de propagation de l'onde dans un matériau par des mesures de temps de vol se fait à partir des deux premiers échos réfléchis par les parois de la plaque. La Figure 3 suivante représente l'allure du signal réfléchi par un échantillon à 10 % de FBO non traitée. On observe principalement deux échos, liés aux interfaces.

Le premier écho  $s_1(t)$  arrivant au temps  $t_{1L}$  est dû à la réflexion de l'onde sur la surface de la plaque qui est face au transducteur. Le deuxième écho  $s_2(t)$  arrivant au temps  $t_{2L}$  est dû à la réflexion d'onde sur le fond de la plaque. Via l'équation (1), on obtient la vitesse longitudinale  $c_L$  des ondes dans la plaque :

$$c_L = \frac{2e_p}{\Delta t_L} \quad (1)$$

où  $e_p$  est l'épaisseur de la plaque, et  $\Delta t_L = t_{2L} - t_{1L}$  est le temps de vol d'aller-retour dans la plaque.

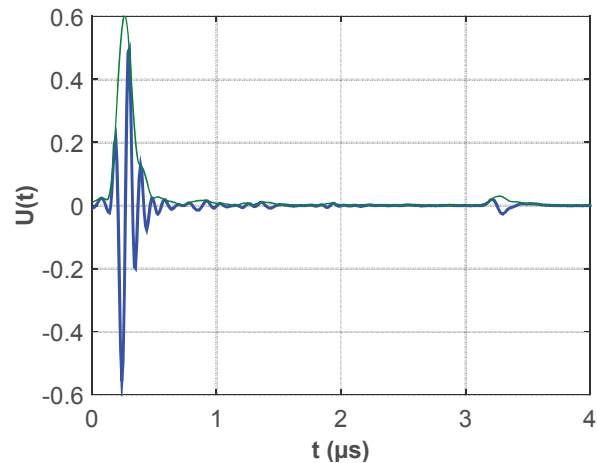


Figure 3 : Echos d'aller-retour (bleu) et enveloppe du signal (vert) dans un échantillon de PP/FBO 10%.

#### 3.2.2 Méthode spectrale

##### 3.2.2.1 Incidence normale

Le spectre de rétrodiffusion est obtenu par transformée de Fourier des échos multiples régulièrement espacés, via la FFT du signal rétrodiffusé par un échantillon (Figure 3). Le spectre de rétrodiffusion ainsi calculé présente des minimums (Figure 4) dont l'espacement régulier est caractéristique du temps de vol entre les deux échos.

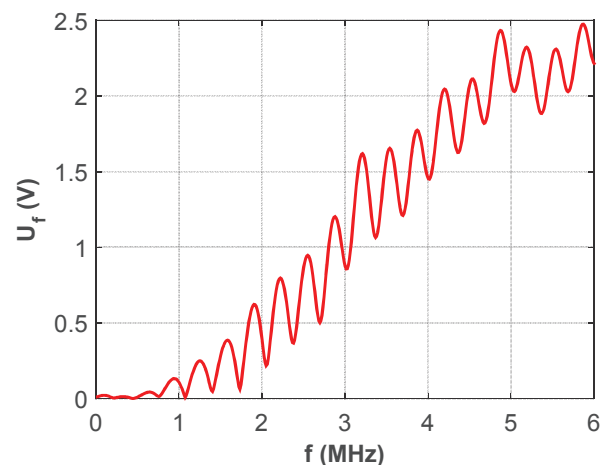


Figure 4 : Spectre de rétrodiffusion dans un échantillon de PP/FBO 10%.

On note  $\Delta f_L$  l'intervalle de fréquence observé (Figure 4). Ces minimums sont liés à la génération d'ondes longitudinales apparaissant à des fréquences de résonance multiples entières de la vitesse longitudinale  $c_L$ . L'équation (2), donne [15] :

$$c_L = 2e_p \cdot \Delta f_L \quad (2)$$

Une comparaison des équations (1) et (2), permet de vérifier la relation  $\Delta f_L = 1/\Delta t_L$ . La Figure 5 montre l'effet de la variation du pourcentage de renfort sur la vitesse longitudinale de propagation de l'onde ultrasonore dans les plaques traitées et non traitées.

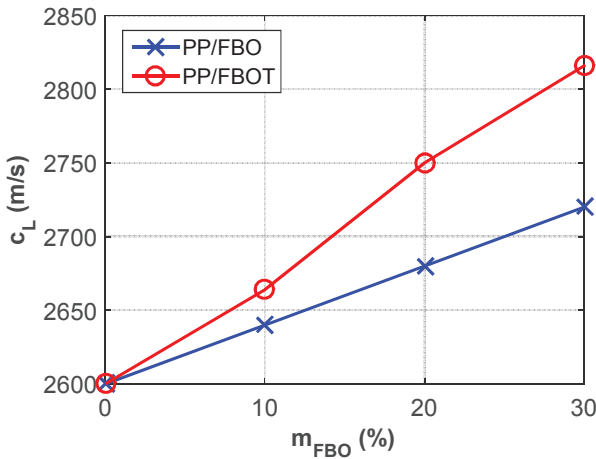


Figure 5 : Variation de la vitesse longitudinale  $c_L$  (m/s) en fonction de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$  (%) pour les bio-composites PP/FBO et PP/FBOT.

D'après ces résultats de mesure, on remarque que plus la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$  augmente, plus la vitesse longitudinale  $c_L$  de propagation de l'onde dans les plaques augmente. On remarque aussi que les  $c_L$  pour les plaques non traitées (PP/FBO) sont légèrement plus inférieures à celles des plaques traitées (PP/FBOT).

### 3.2.2.2 Incidence oblique

Des mesures avec un transducteur émetteur et un transducteur récepteur ont été faites sous un angle d'incidence de  $40^\circ$ . La FFT du signal réfléchi est effectuée. On obtient un spectre de diffusion qui présente des minimums régulièrement espacés, avec un intervalle de fréquence  $\Delta f_T$ . La vitesse des ondes transversales  $c_T$  est obtenue via l'équation (3) [16] :

$$c_T = \frac{2e_p \cdot \Delta f_T}{\sqrt{1 + \left( 2e_p \cdot \Delta f_T \frac{\sin \theta}{c_F} \right)^2}} \quad (3)$$

où  $e_p$  est l'épaisseur de la plaque,  $c_F = 1470$  m/s la vitesse dans l'eau à  $T = 20^\circ\text{C}$ .

La Figure 6 montre l'effet de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$  (%) sur la vitesse transversale  $c_T$  (m/s) de l'onde ultrasonore dans les plaques traitées et non traitées.

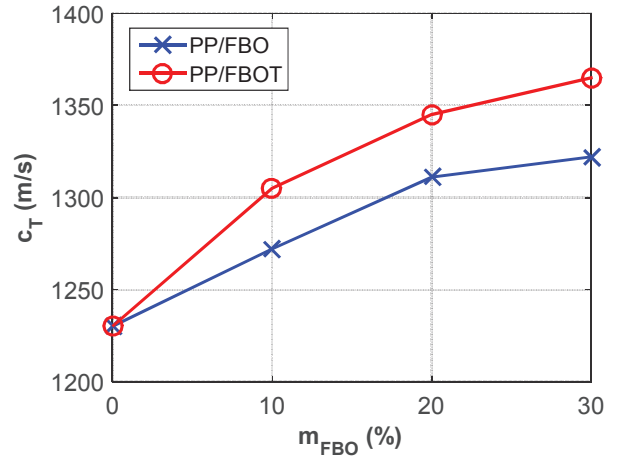


Figure 6 : Variation de la vitesse transverse  $c_T$  (m/s) en fonction de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$  (%) pour les bio-composites PP/FBO et PP/FBOT.

On peut remarquer ici aussi que plus le pourcentage du renfort augmente, plus la vitesse de propagation de l'onde transversale dans les plaques augmente. On remarque aussi que les  $c_T$  pour les plaques traitées sont plus importantes que celles des plaques non traitées. Comme pour les vitesses longitudinales, ces résultats pour les vitesses transversales peuvent être expliqués par le fait que la rigidité du composite augmente quand on ajoute plus de renfort en présence de l'agent de couplage.

En faisant l'hypothèse que les échantillons caractérisés se comportent comme des plaques homogènes et isotropes, on peut estimer les valeurs dites "ultrasonores" du module d'Young  $E_u$  et du coefficient de Poisson  $\nu_u$  à partir de celles des vitesses  $c_L$  et  $c_T$  grâce aux relations suivantes [17] :

$$\begin{cases} E_u = \rho c_T^2 \frac{3c_L^2 - 4c_T^2}{c_L^2 - c_T^2} \\ \nu_u = \frac{c_L^2 - 2c_T^2}{2(c_L^2 - c_T^2)} \end{cases} \quad (4)$$

où  $(E_u, \nu_u)$  sont le module de Young et le coefficient de Poisson déduits des mesures ultrasonores,  $(c_L, c_T)$  sont les mesures ultrasonores des vitesses longitudinale et transversale et  $\rho$  est la masse volumique. Cette dernière dépend du matériau composite étudié (équation (5)), en lien direct avec les fractions massiques de chacun des constituants  $\{m_{f,matrice}, m_{f,renfort}, m_{f,charge}\}$  et de leur masse volumique  $\{\rho_{matrice}, \rho_{renfort}, \rho_{charge}\}$  selon la formulation suivante [18] :

$$\rho = \frac{1}{\frac{m_{f,matrice}}{\rho_{matrice}} + \frac{m_{f,renfort}}{\rho_{renfort}} + \frac{m_{f,charge}}{\rho_{charge}}} \quad (5)$$

Dans cette étude, trois constituants sont en présence: la matrice PP, le renfort FBO et la charge silane. Les masses volumiques associées sont respectivement données par  $\rho_{matrice} = \rho_{PP} = 905$  kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_{renfort} = \rho_{FBO} = 1213$  kg/m<sup>3</sup>, et  $\rho_{charge} = \rho_{silane} = 1340$  kg/m<sup>3</sup>.

Les valeurs obtenues pour chaque composition étudiée sont résumées dans le Tableau 1 suivant:

Tableau 1 : Valeur théorique (équation (5)) de la masse volumique  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) des bio-composites PP/FBO et PP/FBOT en fonction de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$  (%).

$m_{FBO}$ (%)	0	10	20	30
PP/FBO	905	928	953	979
PP/FBOT	905	930	955	981

Les valeurs du module d'Young  $E_u$  (Figure 7) et du coefficient de Poisson  $\nu_u$  (Figure 8) sont déduites des mesures ultrasonores (équation (4)) et représentées en fonction de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$  (%) pour les bio-composites PP/FBO et PP/FBOT.

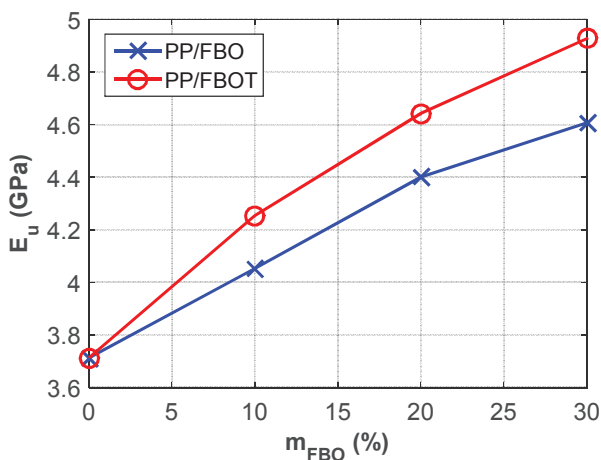


Figure 7 : Variation du module d'Young  $E_u$  (GPa) en fonction de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$  (%) pour les bio-composites PP/FBO et PP/FBOT.

Au regard de ces courbes (Figure 7), on remarque que l'augmentation du taux de FBO a pour effet d'entraîner une augmentation du module d'Young. Les plaques PP/FBOT, dont la FBO a été traitée par le silane, montrent un module d'Young plus important que celles PP/FBO non traitées, ce qui montre l'importance de cet agent de couplage sur la rigidité des plaques. Cette évolution du module d'Young  $E_u$  en fonction de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$  (%) peut s'expliquer par l'équation (4).

Sur les Figures 5 et 6, on observe que le rapport des vitesses transverse et longitudinale  $c_T/c_L \approx 1/2$ , et que ce ratio dépend très peu de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$ . Dans ces conditions, on montre que le module d'Young  $E_u$  tend vers  $(2/3) \cdot \rho c_L^2$ , et que le coefficient de Poisson :  $\nu_u$  tend vers  $1/3$ . La Figure 8 illustre l'évolution du coefficient de Poisson  $\nu_u$  en fonction de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$ . On constate une très faible variation de  $\nu_u$ , entre 0,342 à 0,356, soit une moyenne à  $\nu_u \approx 0,349$  et un écart relatif de  $\pm 2$  %. Une approche analytique fait ressortir que le coefficient de Poisson  $\nu_u$  décroît en fonction du rapport  $c_T/c_L$ . On observe expérimentalement que le coefficient de Poisson  $\nu_u$  suit une variation non monotone en fonction de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$ .

Cela va dans le sens des observations faites sur les mesures (Figures 5 et 6), i.e.  $c_T/c_L \approx 0,48 \pm 2$  %, ce qui conduit à  $\nu_u \approx 0,35 \pm 2$  %.

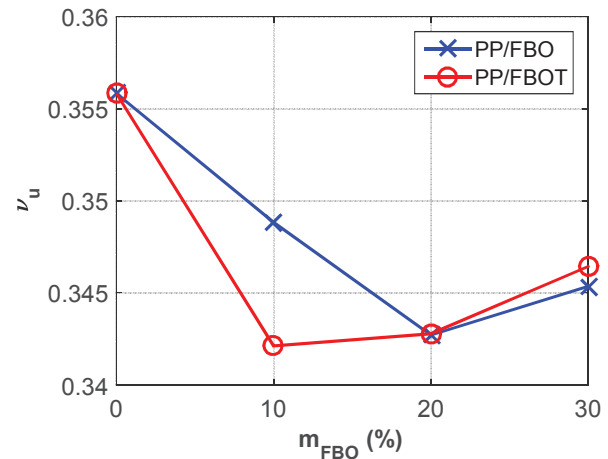


Figure 8 : Variation du coefficient de Poisson  $\nu_u$  en fonction de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$  (%) pour les bio-composites PP/FBO et PP/FBOT.

## 4 Caractérisation mécanique

### 4.1 Modus operandi

Nous avons réalisé des éprouvettes normalisées (ISO 1/2) (Figure 9) avec la même matière et les mêmes portions de renfort de nos plaques de composites. Ces éprouvettes ont été soumises à des essais de traction au moyen d'une machine de traction préparée conformément aux conditions d'essai normalisées ISO 527-1&2 [13] avec une machine de traction appropriée (Figure 9).



Figure 9 : Eprouvettes PP/FBO avec  $m_{FBO} = 10\%$  avant et après l'essai de traction.

Les essais mécaniques destructifs ont été réalisés à l'aide d'un dispositif de traction à une vitesse de 1 mm/min (Figure 10). Les déformations sont mesurées avec un extensomètre laser MTS LX500 (précision 1  $\mu$ m) et les contraintes sont obtenues grâce à un capteur de force de 1 kN. Les courbes de traction  $\sigma = f(\epsilon)$  présentant la contrainte  $\sigma$  (MPa) en fonction de la déformation  $\epsilon$  (%) nous permettent de déterminer le module d'Young mécanique  $E_m$ . Selon la norme ISO 527-1 [13], ce module est mesuré sur la plage de déformation 0,05 à 0,25 %.

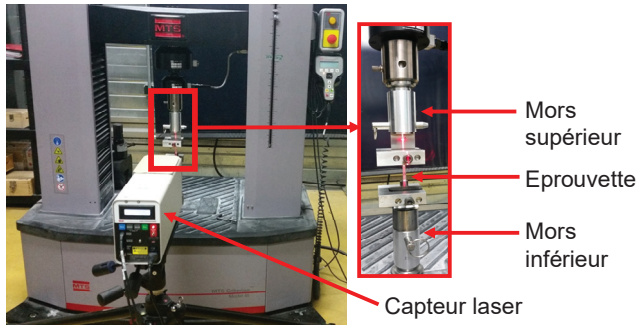


Figure 10 : Dispositif de traction.

En résumé, la Figure 11 présente l'effet de la variation de la fraction massique de renfort sur le module d'Young mécanique  $E_m$  moyenné sur 4 éprouvettes de PP/FBO et PP/FBOT. L'erreur relative mesurée a été estimée à  $\pm 10\%$ .

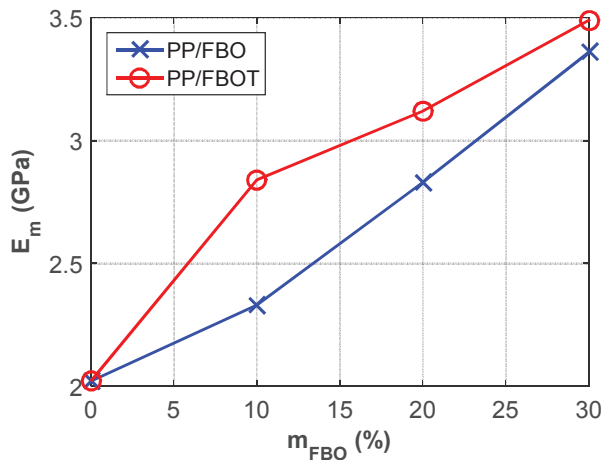


Figure 11 : Variation du module d'Young mécanique  $E_m$  (GPa) de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$  (%) pour les bio-composites PP/FBO et PP/FBOT.

D'après les résultats de mesure, on constate que :

- Comme pour les essais ultrasonores, plus la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$  (%) augmente, plus le module d'Young  $E_m$  (GPa) est élevé, i.e. la rigidité des plaques est accrue. La croissance observée est estimée pour le PP/FBO par régression linéaire autour de  $\partial(E_m/E_{m,ref})/\partial m_{FBO} \approx 2$ , i.e.  $m_{FBO} = 10\%$  entraîne une augmentation de  $E_m \approx 1,2 \cdot E_{m,ref} \approx 2,4$  GPa.
- De même que pour les essais ultrasonores, les plaques de composition avec traitement au silane PP/FBOT possèdent un module d'Young plus important que celles non traitées PP/FBO. Ce résultat est conforme à la tendance observée par ultrasons pour l'évolution de la vitesse longitudinale  $c_L$  plus élevée pour les plaques PP/FBOT que pour celles PP/FBO.

Comme l'illustre la Figure 12, les modules d'Young de la méthode ultrasonore  $E_u$  sont plus élevés que les modules d'Young de la méthode mécanique  $E_m$  avec un rapport  $E_u/E_m$  qui varie entre 1,36 et 1,83 pour les bio-composites PP/FBO. On observe des résultats similaires avec un rapport  $E_u/E_m$  qui varie entre 1,42 et 1,83 pour les bio-composites PP/FBOT.

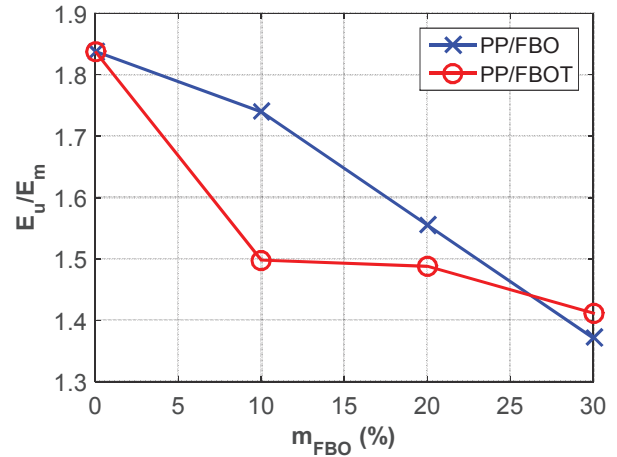


Figure 12 : Variation du rapport des modules d'Young ultrasonore et mécanique  $E_u/E_m$  en fonction de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$  (%).

Ces résultats sont attendus et peuvent être expliqués par le fait que ni le domaine de déformation  $[\epsilon_{min}, \epsilon_{max}]$  (Figure 13) [13; 18], ni la vitesse de déformation  $\partial\epsilon/\partial t$  [19-20] ne sont les mêmes pour les deux méthodes. A cela, on peut aussi ajouter le fait que bien que les compositions et procédés d'élaboration soient strictement les mêmes pour les éprouvettes et les plaques, les géométries, les épaisseurs et les sections de sollicitations sont différentes pour les essais ultrasonores et mécaniques. Pour ce qui est de la décroissance observée du rapport des modules d'Young  $E_u/E_m$  (Figure 12), elle peut s'expliquer par le fait que l'augmentation de la fraction massique de renfort  $m_{FBO}$  a pour effet d'augmenter la rigidité du matériau bio-composite et d'en étendre le comportement élastique linéaire (Figure 13).

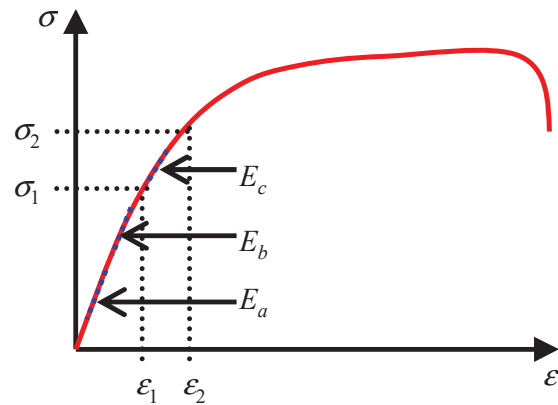


Figure 13 : Courbe de déformation élasto-plastique  $\sigma(\epsilon)$ .

Pour la méthode mécanique, le domaine d'identification du module d'Young  $E_c$  (Figure 13) est celui défini selon la norme ISO 527-1 [13], par les contraintes  $[\sigma_1, \sigma_2]$  mesurées pour des déformations  $[\epsilon_1, \epsilon_2] = [0,05\%, 0,25\%]$ . Pour la méthode ultrasonore, le domaine de sollicitation n'est pas connu précisément, mais se situe dans une zone de petites déformations compris entre  $\epsilon_{a1} = 0\%$  et  $\epsilon_{a2} < \epsilon_1 = 0,05\%$ , et le module d'Young mesuré  $E_a$ , est celui correspondant à cette déformation infinitésimale.

Cette évolution du module d'Young normalement défini par un constante  $E = \partial\sigma/\partial\varepsilon$  dans la zone linéaire évolue ici de façon décroissante, comme l'illustre la Figure 13. Ce comportement élasto-plastique pour lequel la courbe de déformation  $\sigma(\varepsilon)$  ne présente pas de zone strictement linéaire est typique de nombreux polymères. Ainsi, dans ce domaine des petites déformations, la pente de la courbe de traction mesurée  $[\partial\sigma/\partial\varepsilon]_a = E_a$  est plus importante que celle du domaine de déformations supérieures  $[\partial\sigma/\partial\varepsilon]_c = E_c$ . Cela explique encore la différence entre les valeurs des deux méthodes ultrasonore et mécanique, donnant un module d'Young ultrasonore  $E_u$  supérieur à celui dit mécanique  $E_m$ .

## 5 Conclusion

Dans ce travail, nous avons élaboré et caractérisé un matériau bio-composite à base de polypropylène (PP) comme matrice polymère et de farine de bois d'olivier (FBO) comme renfort. Les propriétés élastiques que sont le module d'Young et le coefficient de Poisson ont été évaluées par des méthodes ultrasonores, et étudiées en fonction du taux de renfort et de l'ajout d'un agent de couplage. La caractérisation ultrasonore du composite montre que l'augmentation du taux de FBO entraîne un accroissement des vitesses longitudinales et transversales de propagation de l'onde dans le bio-composite, et une augmentation de la rigidité par l'augmentation du module d'Young des plaques de bio-composite. Cette étude n'a pas permis de tirer de conclusion claire quant à la stagnation du coefficient de Poisson qui semble rester insensible au taux de FBO. L'ajout de l'agent de couplage apporte aussi une augmentation des vitesses ultrasonores et des propriétés élastiques des plaques de PP/FBO.

L'ajout de renfort FBO et de l'agent de couplage silane ont donc permis d'améliorer la rigidité du polymère PP utilisé comme matrice. Ce type de matériau bio-composite qu'est le PP/FBO, a permis de répondre aux exigences économiques et environnementales et de contribuer à un développement durable.

## Références

- [1] A. Gharbi, R. B. Hassen, S. Boufi, Composite materials from unsaturated polyester resin and olive nuts residue: The effect of silane treatment. *Industrial Crops and Products*, **62**, 491-498, 2014.
- [2] I. Naghmouchi, P. Mutjé, S. Boufi, Olive stones flour as reinforcement in polypropylene composites: A step forward in the valorization of the solid waste from the olive oil industry. *Industrial Crops and Products*, **72**, 183-191, 2015.
- [3] B. Amar, K. Salem, D. Hocine, Study and characterization of composites materials based on polypropylene loaded with olive husk flour. *Journal of Applied Polymer Science*, **122**, 1382-1394, 2011.
- [4] T. Kundu (ed.). *Ultrasonic and Electromagnetic NDE for Structure and Material Characterization: Engineering and Biomedical Applications*. CRC Press, 2012.
- [5] J.H. Gieske, R.E. Allred, Elastic constants of B-A1 composites by ultrasonic velocity measurements. *Experimental Mechanics*, **14**, 158-165, 1974.
- [6] A. El-Sabbagh, L. Steuernagel, G. Ziegmann, Characterisation of flax polypropylene composites using ultrasonic longitudinal sound wave technique. *Composites Part B*, **45**, 1164-1172, 2013.
- [7] N. Ghodhiani, P. Maréchal, H. Duflo, Ultrasound monitoring of the cure kinetics of an epoxy resin: Identification, frequency and temperature dependence. *Polymer Testing*, **56**, 156-166, 2016.
- [8] M. Berges, R. Léger, V. Placet, V. Person, S. Corn, X. Gabrion, J. Rousseau, E. Ramasso, P. Ienny, S. Fontaine, Influence of moisture uptake on the static, cyclic and dynamic behaviour of unidirectional flax fibre-reinforced epoxy laminates. *Composites Part A*, **88**, 165-177, 2016.
- [9] A. Regazzi, S. Corn, P. Ienny, J.C. Bénézet, A. Bergeret, Reversible and irreversible changes in physical and mechanical properties of biocomposites during hydrothermal aging. *Industrial Crops and Products*, **84**, 358-365, 2016.
- [10] K. Balasubramanian, S. Whitney, Ultrasonic through-transmission characterization of thick fiber-reinforced composites. *NDT & E International*, **4**, 225-236, 1996.
- [11] R. Kono, The dynamic bulk viscosity of polystyrene and polymethyl methacrylate. *Journal of the Physical Society of Japan*, **14**, 718-725, 1960.
- [12] A. Arbelaiz, B. Fernandez, G. Cantero, R. Llano-Ponte, A. Valea, I. Mondragon, Mechanical properties of flax fibre/polypropylene composites. *Composites: Part A*, **36**, 1637-1644, 2005.
- [13] ISO 527-1&2, Plastics-determination of tensile properties, *International Standard Organization*, 2012.
- [14] S.A. Nielsen, H. Toftegaard, Ultrasonic measurement of elastic constants in fiber-reinforced polymer composites under influence of absorbed moisture. *Ultrasonics*, **38**, 242-246, 2000.
- [15] L.M. Brekhovskikh, *Waves in layered media*, Academic Press, New York (1960).
- [16] J. Laperre, W. Thys, O. Lenoir, J.L. Izbicki, Experimental determination of the transversal wave velocity in plates. *Journal d'Acoustique*, **5**, 161-170, 1992.
- [17] E. Dieulesaint, D. Royer, *Ondes élastiques dans les milieux solides*, Masson (1974).
- [18] D.R.H. Jones, M. Ashby, *Engineering Materials: An Introduction to Properties, Applications and Design*, Butterworth-Heinemann (2012).
- [19] B.J. Yang, B.R. Kim, H.K. Lee, Predictions of viscoelastic strain rate dependent behavior of fiber-reinforced polymeric composites. *Composite Structures*, **94**, 1420-1429, 2012.
- [20] D. Notta-Cuvier, M. Nciri, F. Lauro, R. Delille, F. Chaari, F. Robache, G. Haugou, Y. Maalej, Coupled influence of strain rate and heterogeneous fibre orientation on the mechanical behaviour of short-glass-fibre reinforced polypropylene. *Mechanics of Materials*, **100**, 186-197, 2016.