

Évaluation du comportement et de l'endommagement d'un composite thermoplastique renforcé par des fibres courtes de bois

Lotfi Toubal¹, Demagna Koffi¹,

Agbelenko Koffi¹, Mahdi Mejri¹,

Alencar Bravo¹, Fouad

Erchiqui²

¹ " Centre de recherche sur les matériaux lignocellulosiques, Université du Québec à Trois-Rivières, QC, Canada, lotfi.toubal@uqtr.ca, demagna.koffi@uqtr.ca, Agbelenko.Koffi@uqtr.ca, Mahdi.Mejri@uqtr.ca, alencar.soares.bravo@uqtr.ca "

² " Laboratoire de Nanotechnologie et Bioplasturgie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, QC, Canada, fouad.erschiqui@uqat.ca "

Résumé :

Les plastiques les plus utilisés pour la conception des éléments de machines sont des plastiques standards ou techniques. Ces derniers offrent une meilleure performance, mais leur prix reste trop élevé comparé aux plastiques standards tels que le polyéthylène et le polypropylène. La hausse du prix du pétrole par son épuisement, la non-renouvelabilité et la pollution engendrée par ces plastiques imposent de trouver d'autres sources de matières premières pour les remplacer en tout ou en partie (matériaux composites). L'alternative proposée dans cette étude consiste à renforcer le polyéthylène par des fibres de bois, en particulier les fibres de bouleau très répandues au Québec, ce qui permettra de valoriser les ressources forestières, tout en diminuant l'utilisation du plastique. Ce travail a comme objectif d'élargir le champ d'application des éco-matériaux pour des pièces structurales. Les résultats montrent une amélioration du module de Young et de la contrainte maximale en fonction de l'augmentation du taux des fibres. L'utilisation de l'émission acoustique a permis de suivre le comportement et l'endommagement de notre matériau. De plus, les résultats ont montré une bonne endurance en fatigue de ce matériau.

1. Introduction

Dans le domaine des matériaux, les plastiques, présentent des qualités intéressantes : ils sont très abondants, peu coûteux, légers, durables, résistants à la corrosion, en plus d'avoir des propriétés d'isolation thermique et électrique élevées. Vu ces caractéristiques, le succès commercial des plastiques n'est pas totalement surprenant. La diversité des matériaux plastiques et la polyvalence de leurs propriétés sont utilisées pour réaliser une vaste gamme de produits qui apportent des progrès technologiques à l'industrie, des économies aux entreprises et de nombreux avantages à la société [1]. La fabrication d'articles en plastique a ainsi augmenté considérablement au cours des 60 dernières années, passant d'environ 0,5 million de tonnes en 1950 à plus de 260 millions de tonnes aujourd'hui [2]. Presque tous les aspects de la vie quotidienne impliquent des plastiques : dans les transports, les télécommunications, les matériaux d'emballage qui facilitent le transport d'une large gamme de produits alimentaires, etc., [2]. Il existe un potentiel considérable pour de nouvelles applications de matières plastiques qui apporteront des avantages à l'avenir [1].

Actuellement, l'engrenage qui est d'emblée choisi pour une application donnée est souvent en plastique. À cet égard, selon une analyse du Groupe Freedonia, les applications d'engrenages en plastique ont augmenté de 83 % entre 2003 et 2013. Cette augmentation représente 1300 M\$ en 2013, contre 710 M\$ en 2003 [3]. Cependant, malgré leurs multiples avantages, l'usage intensif des matériaux plastiques et composites de base polymérique pose des problèmes de développement durable du fait de l'épuisement des ressources pétrolières et de la pollution qu'elles engendrent. La pollution associée à des matières plastiques nous amène à considérer des applications où les plastiques pourraient être remplacés par d'autres matériaux, à tout le moins partiellement [4].

Alors que l'utilisation d'engrenages en plastique est également en constante augmentation [5], il est plus facile de trouver un matériau de substitution ou une alternative lorsqu'il s'agit d'une pièce où les propriétés mécaniques ne sont pas cruciales ou que la fonction première est purement esthétique. Ce n'est, hélas, pas le cas des engrenages en plastique. L'industrie apprécie que ces pièces soient fabriquées en utilisant des polymères techniques ou de très hautes performances, ce que permettra de fonctionner sans graisse ou lubrification, faible coût de production, faible densité, haute résistance et bonne capacité d'amortissement interne [6-7]. Nous chercherons, à travers ce présent travail, une solution plus adaptée au niveau environnemental, solution autre que les traditionnels nylon et acétal, pour les engrenages plastiques. Nous savons que la principale raison de l'utilisation des engrenages plastiques (faisant appel au nylon et à l'acétal) est leurs propriétés mécaniques élevées comparées aux autres plastiques. De ce fait, la solution la plus adéquate serait d'utiliser un plastique de base ordinaire et de le renforcer avec des fibres naturelles ce qui lui conférerait des propriétés mécaniques comparables à celles des plastiques d'ingénierie ou techniques tout en étant plus écologique et plus économique.

Dans ce travail, un matériau biocomposite est développé avec des fibres de bois de l'industrie papetière (bouleau) en mélange avec une matrice thermoplastique de polyéthylène (HDPE). Le bouleau est un arbre feuillu commun qui pousse dans les régions froides où les précipitations sont abondantes. Dans la province de Québec, il y a environ 50 pour cent du volume de bois du bouleau jaune en Amérique du Nord [8]. En ce qui concerne les autres polymères semi-cristallins, le polyéthylène est l'un des polymères ayant la ductilité la plus importante [9] à la température ambiante. Des éprouvettes ont été testées en traction monotone en flexion et en flexion cyclique et la résistance à la rupture, le module de Young, la déformation maximale et la durée de vie ont été mesurés. Des engrenages ont été testés pour évaluer leur durabilité. Les résultats obtenus montrent une amélioration des performances mécaniques du matériau de l'étude avec l'augmentation du taux des fibres.

2. Matériaux et méthodes

1. Matériaux

La matrice utilisée pour la fabrication du matériau est la HDPE (SCLAIR® 2909) offerte par Nova Chemicals. Le MAPE (polyéthylène maléate, G2010), fabriqué par Eastman Chemical Company (Kingsport, TN, É.-U.), a servi comme agent de couplage (AC). L'utilisation d'AC en quantités au-delà de 4 % en poids peut conduire à l'auto-enchevêtrement entre les chaînes d'AC plutôt que la matrice de polymère [10]. Pour cette raison, nous avons utilisé de l'AC à 3 % en poids. Dans cette étude, des fibres courtes industrielles (TMP, 35 mesh) de bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*) ont été employées comme renfort pour le biocomposite. Les fibres de bois ont été produites par le Centre de Recherche sur les Matériaux Lignocellulosiques (CRML) et ont été séchées à 60 °C dans un four à circulation d'air pendant 24 heures avant utilisation.

2. Préparation des composites

La technique de moulage par compression est utilisée pour la fabrication des éprouvettes. Tous les échantillons ont été préparés dans un broyeur à deux cylindres (Thermon CW Brabender, modèle T-303) avec un rapport de démultiplication de 0,6. Les grains de la matrice ont été fondus sur des rouleaux à 170 °C, et la fibre a ensuite été ajoutée au rapport pondéral désiré (de 0 à 40 % en poids). Les échantillons ont été produits au moyen du procédé de moulage à une température de 205 °C en utilisant une presse hydraulique pendant 20 minutes, à une pression de 10 MPa. Enfin, le moule a été refroidi à 60 °C et les échantillons ont été extraits avec soin. La Fig. 1 résume le processus de fabrication des échantillons.

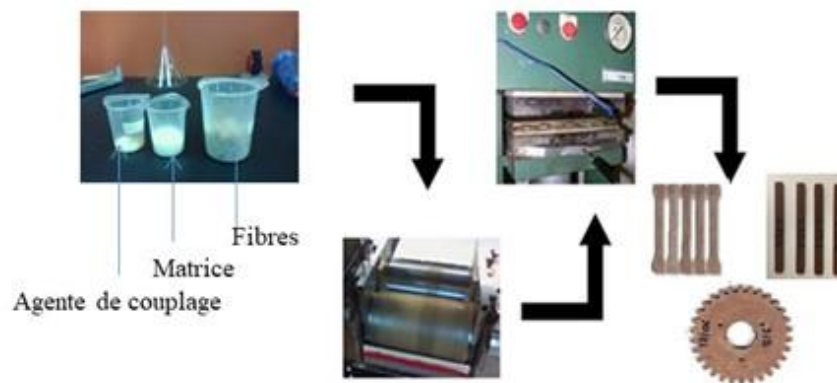


Figure 1. Schéma de fabrication de biocomposites en utilisant le procédé de moulage

3. Essais expérimentaux

1. Caractérisation mécanique

Les essais de traction monotone ont été effectués à température ambiante conformément aux spécifications de la Norme ASTM D3039. Les éprouvettes pour ces essais ont une section transversale rectangulaire de 4 de 10 mm avec une longueur totale de 150 mm. Pour les essais de flexion à 3 points, nous avons utilisé la Norme ASTM D790. Dans ce cas, les échantillons avaient une section rectangulaire de 12,7 par 3,2 mm, avec une longueur totale de 127 mm. Ici encore, cinq échantillons ont été testés, et la valeur moyenne a été calculée. Les essais ont été réalisés avec une machine de traction de type Instron (modèle électromécanique LM-U150), équipé d'une cellule de charge de 150 kN (Figure 2 a). Un extensomètre de 25 mm a été connecté au système d'acquisition de données de la machine et fixé sur la section utile de l'échantillon pour enregistrer l'évolution de la déformation du matériau. En mode flexion (Figure 2 b), une cellule de 10 kN a été utilisée, car une force beaucoup plus faible sur l'échantillon est nécessaire pour ce type d'essai. La vitesse de la tête dans les deux essais était de 1 mm/min pour réduire les effets dynamiques.

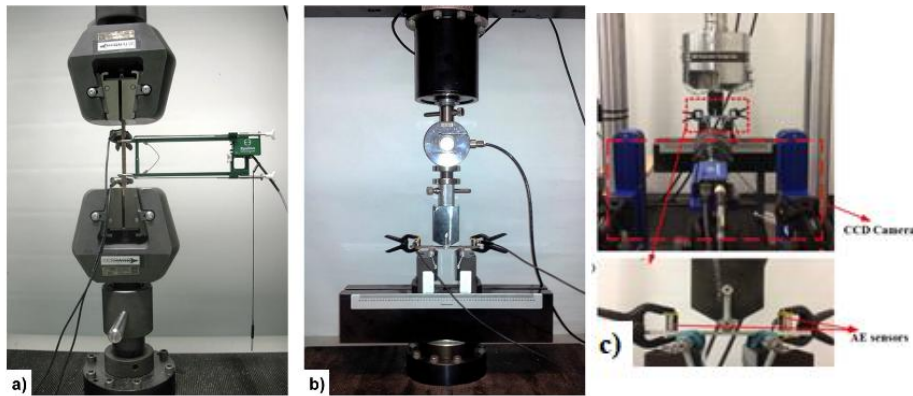


Figure 2. Équipement pour la caractérisation des matériaux: (a) traction, (b) flexion 3 points et (c) fatigue 3 points

Des essais de fatigue en flexion sont réalisés avec des échantillons respectant la norme ASTM-D790, figure 2c. Ces essais sont effectués avec des échantillons de flexion à une fréquence équivalente à 10 Hz. Les essais de fatigue sont réalisés, en contrôlant le déplacement, sur une machine hydraulique MTS, équipée d'une cellule de charge de 100 KN. Une caméra CCD est utilisée afin de suivre l'amorçage et la propagation des fissures. La technique d'émission acoustique est également utilisée pour identifier les mécanismes d'endommagement participant à la ruine des échantillons.

2. Fonctionnement réel simulé

Le banc d'essai est une machine permettant de mettre en rotation deux engrenages et de leur appliquer un couple, figure 3. Un moteur accompagné d'un système permettant d'en contrôler la vitesse va entraîner un premier arbre sur lequel est fixé un vérin rotatif permettant de contrôler le couple appliqué aux engrenages. Cet arbre va entraîner un premier engrenage en acier qui va permettre de mettre en rotation un autre arbre qui comporte le couple-mètre. Au bout des deux arbres, des supports permettent de fixer les engrenages qui vont servir pour les essais. Le couple est contrôlé par un logiciel de boucle fermée placé dans une interface LabVIEW et permet de le faire varier.

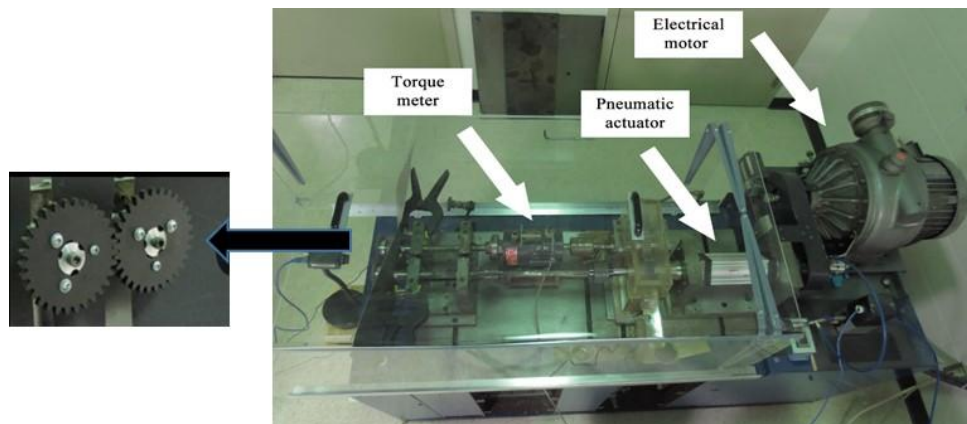


Figure 3. Équipement utilisé pour tester les engrenages

4. Résultats et discussions

L'analyse des résultats est faite en se basant sur l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation (Figure. 4).

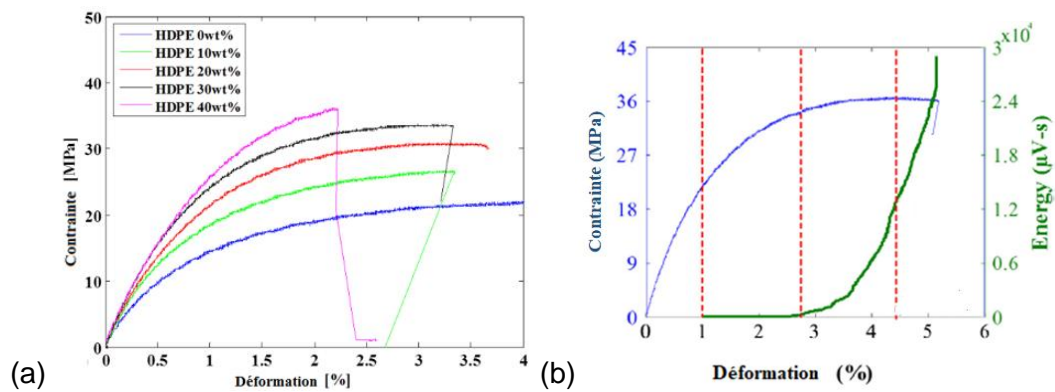


Figure 4. Essais de traction, (a) courbes contraintes/déformations, (b) cycles charge/décharge en bleu et courbe cumulative de l'énergie acoustique en vert (HDPE 30wt%)

L'analyse des résultats est faite en se basant sur l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation. Pour les différentes éprouvettes, cette évolution s'effectue selon les phases suivantes (figure 4). Une première phase élastique linéaire caractérisée par un module élastique E_0 . Une deuxième phase où la courbe perd sa linéarité initiale traduisant ainsi le début du comportement viscoélastique. Une troisième phase non-linéaire traduisant le début de la plasticité et l'endommagement du composite jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette.

Les tableaux 1 et 2 nous montrent l'effet des fibres sur le module d'Young, la résistance en traction et la déformation à la rupture sur des composites à base de polypropylène renforcé par des fibres de bouleau en mode traction et flexion respectivement. Nos résultats présentent des valeurs similaires à celle que nous trouvons dans la littérature [11]. On constate que le module élastique et la résistance en traction augmentent d'une manière significative en fonction du taux massique de fibre. Les fibres augmentent le module élastique entre trois à quatre fois entre 0% fibre et 40% fibres pour les essais de flexion et de traction respectivement. Les mesures montrent aussi une amélioration de la contrainte à la rupture avec l'augmentation du pourcentage des fibres. L'augmentation du pourcentage des fibres rend le matériau plus rigide (fragile aussi) et diminue par conséquent sa déformation à la rupture. Mais le matériau reste toujours ductile avant de rompre.

Fibres (wt, -%)	Module d'Young			Contrainte maximale			Déformation à la rupture		
	E (GPa)	Écart type	Cov.	σ (MPa)	Écart type	Cov.	ϵ_{\max} (%)	Écart type	Cov.
0%	0,91	0,07	0,08	16,97	2,56	0,15	-	-	-
20%	2,22	0,18	0,08	31,87	1,12	0,04	5,23	1,21	0,23
40%	4,48	0,04	0,01	45,12	1,92	0,04	2,44	0,5	0,20

Tableau. 1. Propriétés mécaniques en traction.

Fibres (wt, -%)	Module d'Young			Contrainte maximale			Déformation à la rupture		
	E (GPa)	Écart type	Cov.	σ (MPa)	Écart type	Cov.	ϵ_{\max} (%)	Écart type	Cov.
0%	0,88	0,06	0,07	27,08	0,03	0,00	-	-	-
20%	1,68	0,14	0,08	45,7	0,19	0,00	10,13	0,14	0,01
40%	2,74	0,2	0,07	63,29	0,02	0,00	7	0,39	0,06

Tableau. 2. Propriétés mécaniques en flexion.

La figure 5, montre l'évolution de la résistance résiduelle, de l'énergie acoustique et de la longueur de la macro-fissure en fonction du nombre de cycles. La première phase stable de la courbe d'énergie acoustique correspond à la réduction progressive de la résistance résiduelle. Cela signifie que s'il n'y a pas d'augmentation significative des événements acoustiques liés aux mécanismes d'endommagement et la force résiduelle restent presque constants.

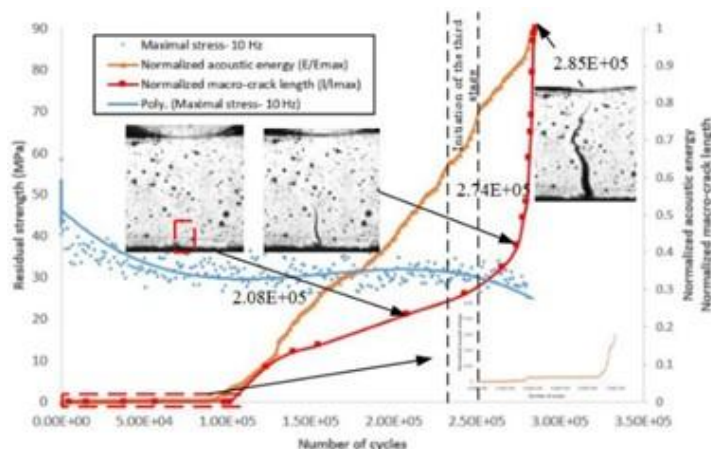


Figure 5. Évolution de la résistance résiduelle, de l'énergie acoustique et de la longueur de la macro-fissure en fonction du nombre de cycles [12]

La deuxième étape de la courbe d'énergie acoustique commence dans la deuxième phase de l'évolution de la résistance résiduelle et se poursuit dans sa dernière phase. Au début, l'augmentation des mécanismes d'endommagement n'est pas suffisante pour entraîner une diminution de la résistance résiduelle. Après un certain nombre de cycles, l'accumulation d'événements dans le matériau devient importante indiquant une augmentation de l'endommagement dans le matériau. Dans cette phase, nous constatons une diminution accélérée dans l'évolution de la résistance résiduelle, jusqu'à la rupture finale des éprouvettes.

La figure 6 représente l'évolution de la durée de vie des engrenages en fonction la contrainte appliquée. Nous avons obtenu une limite d'endurance autour de 7,3 MPa. Cette valeur est 50 % inférieure à la limite d'endurance du nylon 6 (figure 6b).

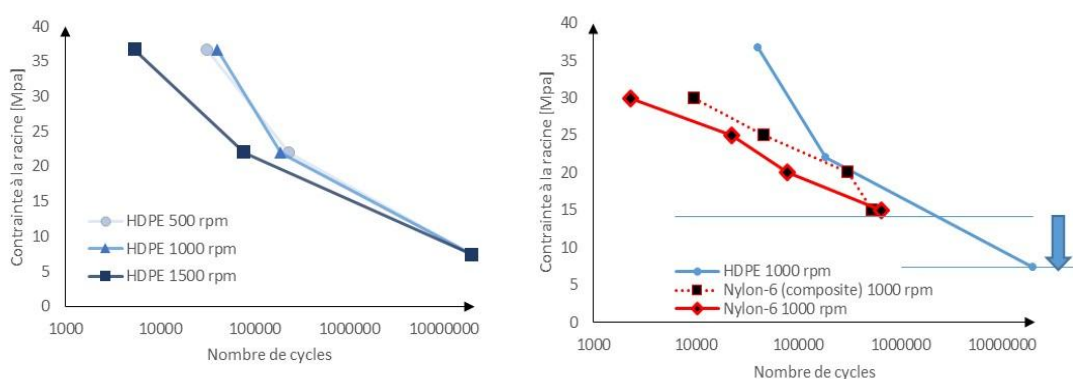


Figure 6. Courbes de Wöhler, a) HDPE pour trois vitesses de rotation, b) comparaison HDPE vs Nylon

5. Conclusion

Dans ce travail, un matériau a été développé et son comportement en traction monotone et cyclique a été étudié. Les résultats montrent une importante amélioration des propriétés élastiques du matériau avec l'augmentation du taux des fibres. Le protocole de fabrication utilisé dans ce travail montre une bonne reproductibilité des mesures avec un faible écart-type. L'émission acoustique a permis de déterminer les différentes phases traduisant l'évolution du comportement de notre matériau. Nous avons enregistré une bonne corrélation entre l'évolution de l'endommagement et l'activité acoustique. Pour les essais de fatigue, on a réussi à évaluer l'évolution de l'endommagement et la durée de vie du matériau à l'échelle des éprouvettes et des engrenages. Les résultats obtenus ont été comparés à celle des engrenages en Nylon. On juge que ces dernières sont intéressantes et valide le choix de notre matériau.

6. Bibliographie

- [1] ANDRADY A. L., NEAL M. A. *Applications and societal benefits of plastics*. Phil. Trans. R. Soc. B 2009, vol. 364, pp. 1977–1984.
- [2] THOMPSON, R. C., MOORE C. J., VOM SAAL F. S., SWAN S. H. *Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 2009, vol. 364, n° 1526, pp. 2153-2166.
- [3] Freedonia [international business research company]. Plastic gear demand by product (million dollars) 1998–2018. Cleveland, OH: Freedonia Group, 2012
- [4] BRAVO Alencar, TOUBAL Lotfi, KOFFI Demagna, ERCHIQUI Fouad. *Characterization of Tensile Damage for a Short Birch Fiber-Reinforced Polyethylene Composite with Acoustic Emission*. International Journal of Material Science, 2013, vol. 3, n° 3, pp. 79-89.
- [5] BRAVO Alencar, TOUBAL Lotfi, KOFFI Demagna, ERCHIQUI Fouad. *Gear fatigue life and thermomechanical behavior of novel green and bio-composite materials VS high-performance thermoplastics*. Polymer Testing, 2018, vol. 66, pp. 403-414.
- [6] WALTON, D., SHI Y. *A comparison of ratings for plastic gears*." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1989, vol. 203, n° 1, pp. 31-38.
- [7] MIJIYAWA Fayçal, KOFFI Demagna, KOKTA B. V, ERCHIQUI Fouad Formulation and tensile characterization of wood–plastic composites Polypropylene reinforced by birch and aspen fibers for gear applications." Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2015 28(12) 1675–1692
- [8] EL LITTLE J. *Checklist of United States trees (native and naturalized)*. Agriculture Handbook, UK Department of Agriculture, 1979.
- [9] G'SELL C. *Plasticité et endommagement des polymères structuraux*. L'actualité chimique, 2002. pp. 40-43.
- [10] DEEPTHI, M., SHARMA M, SAILAJA R, ANANTHA P, SAMPATHKUMARAN P, Seetharamu S. *Mechanical and thermal characteristics of high density polyethylene–fly ash Cenospheres composites*. Materials & Design, 2010, vol. 31, n° 4, pp. 2051-2060.
- [11] G'SELL C, HIVER J.M., DAHOUN A., SOUAHI A. *Video-controlled tensile testing of polymers and metals beyond the necking point*. J. Mater. Sci., 1992, vol. 27, pp. 5031-5039
- [12] Mejri Mahdi, Toubal Lotfi, Cuillière Jean-Christophe, François Vincent. *Fatigue life and residual strength of a short-natural-fiber-reinforced plastic vs Nylon*. Composites Part B: Engineering, 2017, vol. 110, pp. 429-441.