

Contrôle de santé intégré des matériaux bio composites unidirectionnels

Integrated health monitoring of unidirectional bio-composites

**Sami ALLAGUI^{1,2}, Abderrahim EL MAHI¹, Jean-Luc REBIERE²,
Aanas BOUGUECHA², Moez BEYAOU², Mohamed HADDAR²**

1 : Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine (LAUM) UMR CNRS 6613 ,
Université du Maine, Av. O. Messiaen, 72085 Le Mans cedex 9, France.
e-mail : sami.allagui@gmx.fr, abderrahim.elmahi@univ-lemans.fr et jean-luc.rebiere@univ-lemans.fr

2 : Laboratoire de recherche de Mécanique, Modélisation et Productique (LA2MP) ,
Ecole National d'Ingénieurs de Sfax , Université de Sfax, BP N° 1173, 3038 Sfax, Tunisia
e-mail : anas.bouguecha@gmx.de, moez.beyaoui@yahoo.fr, mohamed.haddar@enis.rnu.tn

Résumé

L'utilisation des matériaux composites s'est imposée depuis ces dernières années dans différents secteurs industriels. Leurs principales applications se trouvent dans le domaine du transport, de l'aéronautique, du bâtiment, ainsi que dans les sports et les loisirs. Cette étude porte sur la surveillance de l'état de santé des matériaux composites à base des constituants naturels et de résine thermoplastique par émission acoustique en incorporant des capteurs piézo-électriques au sein du matériau. Le matériau étudié dans ce travail est un composite stratifié à plis unidirectionnels de type $[0]_8$ à base de fibre de lin et de résine thermoplastique Elium commercialisées par la société ARKEMA. Le procédé LRI (Liquid Resin Infusion) est adapté pour la réalisation de ce composite. La mise en œuvre est réalisée au sein du laboratoire LAUM. Trois types d'éprouvettes sont élaborés : éprouvette non instrumentée (NI), éprouvette instrumentée avec un petit capteur (PC) et éprouvette instrumentée avec un grand capteur (GC). Une première étude est consacrée à l'étude de l'influence de l'implant piézoélectrique dans le volume du matériau sur le comportement mécanique en traction quasi statique. Ainsi l'émission acoustique (EA) est utilisée dans ce travail pour analyser les différents mécanismes d'endommagement intervenant dans ce type de matériau.

Abstract

The use of composite materials has emerged in recent years in different industrial sectors. Their main applications are in the transport, aerospace, construction, as well as in sports and leisure. This study presents an experimental study in real and in-situ health monitoring by acoustic emission of composite laminates based on natural constituents and thermoplastic resin. The material considered in this work is a unidirectional $[0]_8$ fabricated with Liquid Resin Infusion process (LRI) from flax fiber and resin thermoplastic ELIUM marketed by Arkema. The manufacturing is realized in the laboratory LAUM. Three types of specimens are developed: non-instrumented specimen (NI), instrumented specimen with a small sensor (IS) and instrumented specimen with a large sensor (IL). A first study is consecrated in the examination of the quasi-static behaviour of the bio-composite material with and without piezoelectric sensor. Also, the influence of the piezoelectric sensor in the quasi-static behaviour of the bio-composite structures have been developed. Then, Acoustic Emission (AE) method was used to analyse the different damage mechanisms detected in the laminated specimens.

Mots Clés : Bio-sourcé/ Composite intelligent / Comportement mécanique

Keywords : Bio-based/ Smart Composite / Mechanical behavior

1. Introduction

Face à la raréfaction des ressources fossiles et au besoin croissant de fabrication des produits respectueux de l'environnement et potentiellement recyclables, les scientifiques des matériaux et les ingénieurs dans tout le monde ont orienté leurs recherches vers l'étude de nouveaux matériaux à base de constituants végétaux tels que la fibre de lin [1,2]. Par ailleurs, des autres chercheurs scientifiques [3] se sont concentrés sur l'intégration des capteurs piézoélectriques dans les matériaux composites, afin d'assurer leur surveillance d'état de santé. En effet, ce travail présente l'étude du comportement mécanique du matériau bio composite avec ou sans capteur piézoélectrique sous charge statique. L'influence de l'implant piézoélectrique sur les caractéristiques mécaniques du matériau a également été développée. Enfin, la technique d'émission acoustique (EA) a été utilisée pour détecter les différents mécanismes d'endommagement qui se produisent lors des essais statiques.

2. Protocoles expérimentaux

2.1 Matériau

Le matériau étudié dans ce travail est un composite stratifié à plis unidirectionnels de type $[0]_8$ à base de fibre de lin et de résine thermoplastique Elium. La résine et le renfort sont commercialisés respectivement par ARKEMA et LINEO. L'avantage de la résine ELIUM provient de son caractère thermoplastique qui permet d'avoir un matériau thermoformé et potentiellement recyclable. De plus, il possède une viscosité initiale très proche de celle de certaines résines Vinylester ou Polyester. Ainsi, cette résine peut être utilisée avec des procédés de mise en œuvre du type RTM ou LRI, habituellement destinés aux résines thermodurcissables. Afin de surveiller l'état de santé de matériaux composites, des capteurs piézo-céramiques du type PIC255 ont été intégrés dans la structure. Ces capteurs sont commercialisés par la société Pi-céramique. Ils possèdent de bonnes propriétés telles que la température de Curie qui est relativement élevée (jusqu'à 350°C), une résistivité électrique importante à des températures élevées et des coefficients de charge ainsi que des coefficients de couplage électromécanique élevés. Une explication détaillée sur le PIC 255 est présentée dans le catalogue de la société Pi-céramique [4].

2.2 Procédé de mise en œuvre des composites

Dans le but de fabriquer un matériau biosourcé et intelligent, trois étapes de mise en œuvre ont été élaborées. La première étape consiste à préparer les matières premières : capteurs et fibre de lin. Tout d'abord, une phase de soudure des fils conducteurs sur les capteurs piézoélectriques a été effectuée. Ainsi les fibres de lin ont été séchées dans une étuve pendant une heure environ à une température de 110°C [5]. Ce cycle permet d'obtenir un bon séchage sans trop dégrader les propriétés mécaniques des fibres. La deuxième étape consiste à déposer les différents éléments sur la moule. En effet, un tissu d'arrachage est mis en place sur la table (déjà préparée) pour assurer un démoulage de la plaque composite à fabriquer. Ainsi, on dispose les différents plis de fibres de lin selon la séquence d'empilement souhaitée en insérant les capteurs piézoélectriques dans le plan médian. Ensuite, un autre tissu d'arrachage est disposé pour faciliter la séparation du composite avec les couches supérieures. Par la suite, on place le tissu de drainage et les deux gaines de sortie et d'entrée permettant ainsi la circulation de la résine d'une façon parallèle sur la plaque. L'ensemble est ensuite recouvert d'une bâche imperméable. La fixation de la bâche sur le moule ainsi que l'étanchéité est réalisée à l'aide d'un mastic spécifique. Finalement, on relie deux tuyaux aux deux gaines de sortie et d'entrée. Le tuyau d'entrée est plongé dans un bac de résine Elium ainsi que le tuyau de sortie est relié à une pompe à vide, en passant par un bac tampon servant à contenir l'excès de résine lors de l'opération d'infusion. La *fig 1* présente un schéma explicatif de procédé de mise en œuvre LRI.

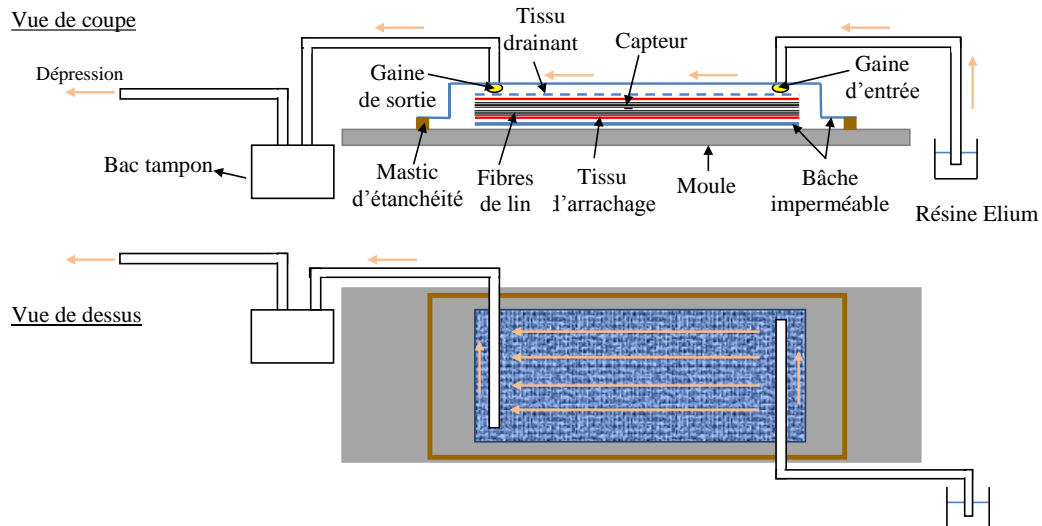


fig. 1. Le procédé LRI (Liquid Resin Infusion)

La dernière étape est l'étape de l'infusion. En effet, avant l'ouverture de l'arrivée de résine, la dépression est fixée à son maximum pendant au moins une heure, pour permettre d'une part le dégazage de la préforme, et d'autre part la vérification de l'étanchéité à l'aide d'un détecteur de fuite par ultrasons. À l'issue de cette étape, la dépression est réduite à 0.6 bar. Il est possible d'augmenter cette dépression d'infusion jusqu'à 0.7 voire 0.8 bars. Au-delà, la résine risque de dégazer. Par la suite, la résine catalysée est préparée, et l'entrée de résine est ouverte. Sous l'effet de la dépression, la résine entre dans la préforme par le tuyau d'entrée et remplit la gaine d'entrée qui la répartit ensuite dans la largeur du milieu drainant. La résine avance alors à travers la préforme, comme il est présenté dans la fig 2. Une fois le front de résine arrive au niveau de la gaine de sortie, l'arrivée de résine est coupée et la dépression est maintenue.

Trois types d'éprouvettes sont élaborés : éprouvette non instrumentée (NI), éprouvette instrumentée avec un petit capteur (PC) et éprouvette instrumentée avec un grand capteur (GC) dont les dimensions des capteurs sont respectivement [e= 0.5 mm, Ø=5mm] et [e= 1 mm, Ø=10mm]. Les éprouvettes fabriquées sont de forme rectangulaire avec une longueur de 250mm, une largeur de 25mm et une épaisseur de 3 mm environ.



fig. 2. Différentes phases d'infusion

3. Essais mécaniques de traction

Les essais de traction quasi statiques ont été réalisés avec une machine hydraulique universelle (INSTRON modèle 8516) équipée d'un capteur de force de 100 KN dont le contrôle et l'acquisition des données sont effectués par ordinateur. Tous les échantillons préparés ont été testés sous chargement uni axial, conformément à la méthode d'essai standard ASTM D3039 / D3039M [6]. Le chargement a été effectué à une vitesse de 1 mm / min.

Les résultats des essais statiques sur les matériaux stratifiés unidirectionnels sont présentés par la fig. 3. Cette figure représente l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation pour les trois types de matériaux : éprouvette non instrumentée (NI), éprouvette instrumentée avec le petit capteur (PC) et éprouvette instrumentée avec le grand capteur (GC). La figure montre que les trois types d'éprouvettes ont des comportements similaires. En effet, la courbe présente un domaine élastique très restreint ayant une limite élastique très faible (déformation d'environ 0.1%, Contrainte aux alentours de 25 MPa). Après cette valeur, la courbe subit une évolution quasi linéaire jusqu'à la rupture. D'après ces courbes, nous remarquons que l'insertion du grand capteur ([10 mm*1 mm]) agit, d'une façon très significative, sur les caractéristiques mécaniques du matériau. Par contre, l'insertion du petit capteur au sein de matériau n'affecte pas beaucoup la courbe de contrainte en fonction de déformation.

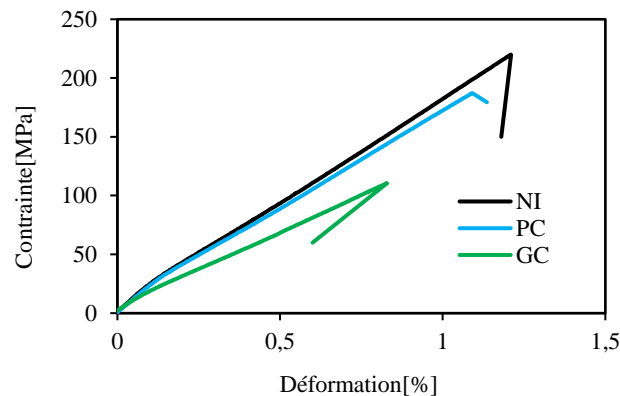


fig. 3 Courbes contraintes en fonction de déformation des différentes éprouvettes : NI, PC et GC.

La Tab. 1 représente les caractéristiques mécaniques obtenues lors des essais de traction en statique pour l'ensemble des stratifiés. Il montre que le module d'Young, la contrainte et la déformation à la rupture diminuent lorsque la taille du capteur augmente. De ce fait, dans le reste des travaux, seuls les éprouvettes NI et PC sont étudiées.

Éprouvette	NI			PC			GC		
	$E^{UD(0)}$	$\sigma_{max}^{UD(0)}$	$\epsilon_{max}^{UD(0)}$	$E^{UD(0)}$	$\sigma_{max}^{UD(0)}$	$\epsilon_{max}^{UD(0)}$	$E^{UD(0)}$	$\sigma_{max}^{UD(0)}$	$\epsilon_{max}^{UD(0)}$
Unités	GPa	MPa	%	GPa	MPa	%	GPa	MPa	%
Moyenne	24,03	217,4	1,227	23,07	206,4	1,038	17,7	110,4	0,829
Écart Type	1,4	13,92	0,165	2,157	13,85	0,126	2,3	21,1	0,28

Tab. 1. Caractéristiques mécaniques des différentes éprouvettes : NI, PC et GC.

Identification des mécanismes d'endommagements par émission acoustique intégrée

4.1 Dispositif expérimental

Les essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction MTS universelle équipée de mors auto serrant et d'un capteur d'effort de 100 kN. Les essais ont été suivis par émission acoustique (avec et sans intégration du capteur) à l'aide d'un système d'acquisition EPA (Euro Physical Acoustic). Le dispositif expérimental est composé par des capteurs piézoélectriques, un amplificateur, un système d'acquisition et de stockage et un logiciel pour le traitement de signaux acoustiques. La *fig 4* présente une vue d'ensemble du dispositif expérimental utilisé [7]. Les capteurs ont pour rôle la réception des ondes élastique créés par le matériau sollicité. Ces ondes sont converties en signaux électriques grâce au caractère piézoélectrique des capteurs et fournissent alors le signal d'émission acoustique. Après une amplification de ces signaux par un amplificateur de gain 40 dB, les données acoustiques sont numérisées par une carte d'acquisition PCI à fin d'être traité et analysé par le logiciel de traitement Noeisis [8]. La valeur seuil d'acquisition des signaux a été fixée à 38dB, et les paramètres d'acquisition temporels ont été définis par PDT = 50 μ s, HDT = 100 μ s, HLT = 200 μ s [9].

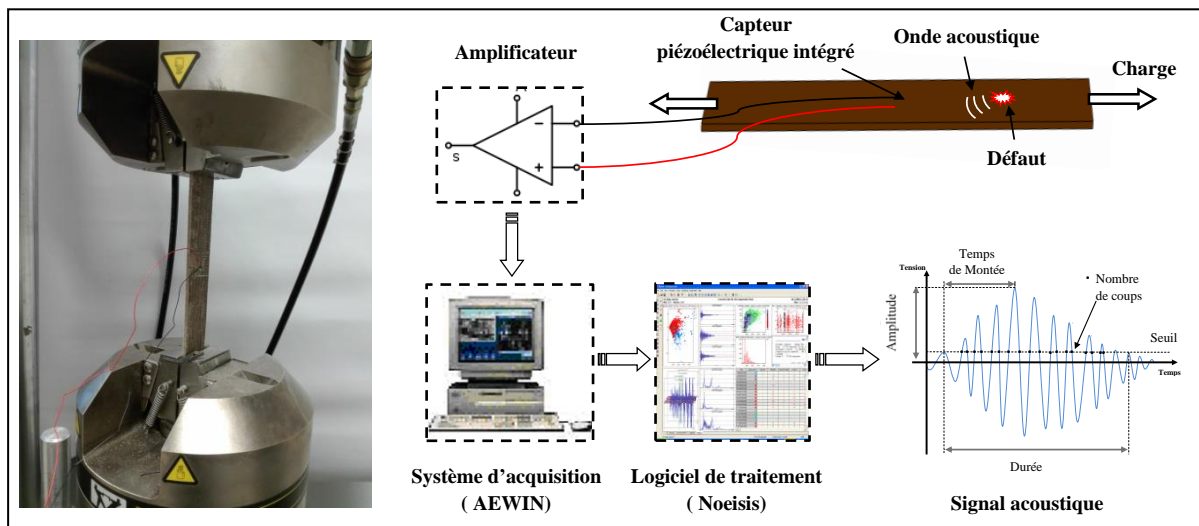


fig. 4 Dispositif d'acquisition des données d'émission acoustique avec capteur intégré

4.2 Analyse des données d'émission acoustique

Afin d'identifier les signaux acoustiques détectés au cours des essais, une analyse par la méthode des K-moyenne [10] via le logiciel de traitement Noeisis [8] a été effectuée. Cinq paramètres de save acoustique ont été retenus pour la classification : l'Amplitude maximale (dB), Temps de montée (ms), Durée (ms), l'énergie absolue (atto-joules), Nombre de coups au pic. Le nombre optimal de classe a été obtenu en minimisant le coefficient de Davies et Bouldin R_{DB} [11].

Les fig. 5 et 6 présentent les résultats de la classification effectuée sur les différents signaux acoustiques collectés (avec et sans capteur). La représentation amplitude – temps permet d'avoir un premier aperçu sur la discrimination des classes d'évènements. D'autre part, le graphique du nombre de coups cumulés en fonction du temps montre la chronologie d'apparition des évènements des différentes classes.

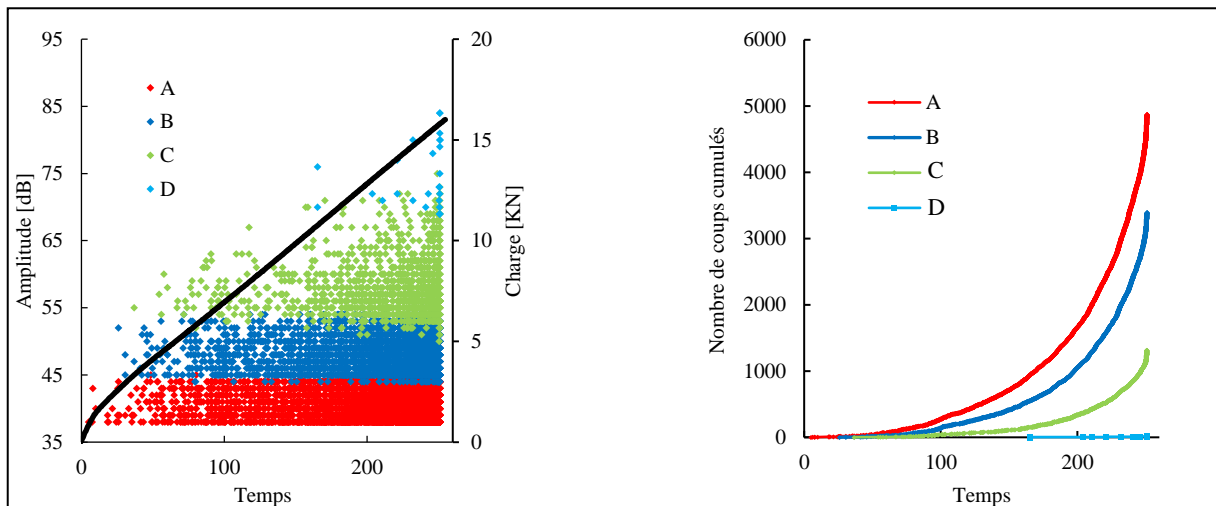


fig. 6. Classification des évènements pour l'éprouvette sans capteur (NI) UD0

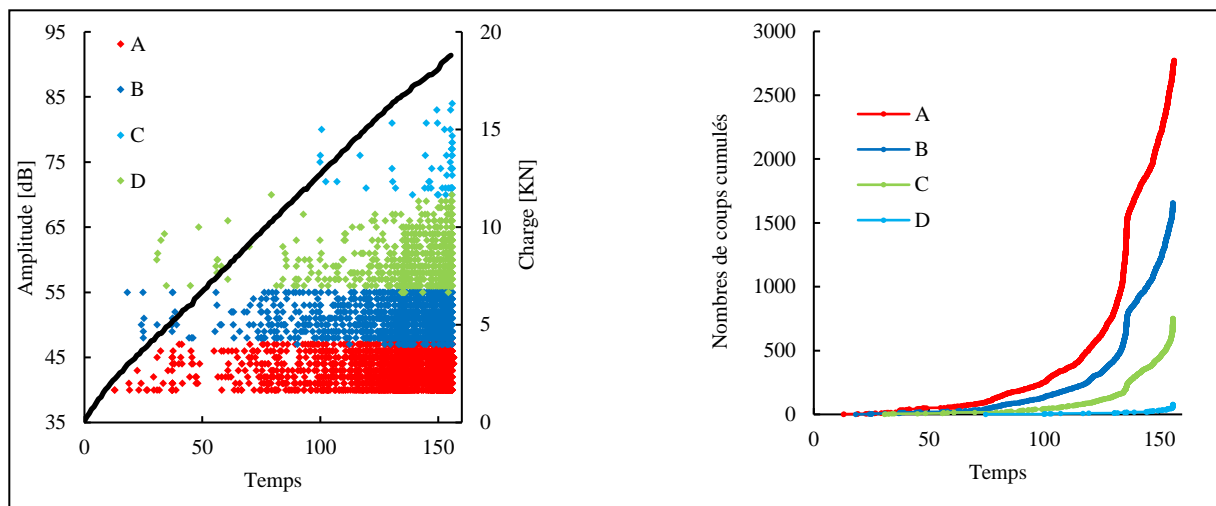


fig. 5. Classification des évènements pour l'éprouvette avec capteur intégré (PC) UD0

Pour les deux types des éprouvettes étudiées, la classification des signaux d'EA met en évidence la présence des quatre classes. Deux classes notées A et B, présentant des caractéristiques d'amplitude respectivement entre [38dB,45dB] et [45dB,55dB], apparaissent simultanément. Ainsi, on retrouve une troisième classe notée C ayant une amplitude entre [55dB,75dB]. La dernière classe détectée, notée D, contient des signaux très énergétiques avec des amplitudes au-dessus de 75 dB.

Afin d'associer chaque classe d'émission acoustique avec sa cause d'apparition, une étude comparative entre les caractéristiques des formes d'ondes des classes et des principaux mécanismes d'endommagement de matériau composite unidirectionnelle a été effectuée [12, 13,14].

En conclusion, et selon la chronologie d'apparition des défauts, la classe A peut être associée à des microfissurations matricielles. Les signaux acoustiques de classe B, qui apparaissent juste après les microfissurations de la matrice, sont probablement issus des décohésions des interfaces fibres/résine. Par la suite, les signaux de classe C, qui présentent des caractéristiques d'amplitude, d'énergie et de durée plus élevée, peuvent regrouper les signaux émis par le délaminage. En fin, la dernière classe D contient des signaux très énergétiques avec des amplitudes au-dessus de [75 dB] et apparaissent pour des valeurs de charge très élevées. Donc ces signaux peuvent être attribués à la rupture des fibres. Dans le but de valider l'existence de ces mécanismes d'endommagement, des observations microscopiques de la zone de rupture seront effectuées à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB).

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons étudié l'effet de l'intégration du capteur piézoélectrique sur la réponse mécanique en traction des matériaux composites bio-sourcés à fibres unidirectionnelles. Généralement, les propriétés mécaniques du matériau étudié subissent une très faible dégradation à cause de l'intégration du petit capteur [$e=0.5$ mm, $\varnothing=5$ mm]. Par contre, une dégradation plus significative est remarquée lorsqu'on intègre le grand capteur [$e=1$ mm, $\varnothing=10$ mm]. Dans ce travail nous avons aussi effectué une analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement présents dans les matériaux stratifiés avec ou sans capteurs intégrés. L'analyse et l'observation des signaux acoustiques détectés lors des essais de traction ont montré l'apparition de quatre modes d'endommagement : fissuration matricielle, décohésion, délaminage, et rupture des fibres. De ce fait, cette étude montre que l'évaluation de l'état de santé d'une structure biosourcée, sans attendre une maintenance programmée, est possible. La solution est l'intégration d'un capteur au sein de structure permettant la détection de l'endommagement de manière précoce et continue. De plus elle permet de réaliser des inspections rapides et fréquentes a fin de prévoir la fin de cycle de vie de la structure.

Références

- [1] Yan L, Chouw N and Jayaraman K. Flax fibre and its composites - A review. *Compos Part B: Eng* 2014; 56: 296-317.
- [2] Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Prog Polym Sci* 2012; 37: 1552–1596.
- [3] Masmoudi, Sahir, Abderrahim El Mahi, and Saïd Turki. "Effect of Piezoelectric Implant on the Structural Integrity of Composite Laminates Subjected to Tensile Loads." *Applied Composite Materials* 24.1 (2017): 39-54.
- [4] Piezoelectric Ceramic Products fundamentals, characteristics and applications: <https://www.piceramic.com/en>
- [5] C. Baley, A. Le Duigou, A. Bournaud, P. Davies, « influence of drying on the mechanical behaviour of flax fibres and their unidirectional composites », *Composites: Part A*, vol. 43, pp 1226-1233, 2012.
- [6] ASTM D3039 / D3039M: Standard test Method for Tensile Properties of polymer Matrix Composites
- [7] A. EL Mahi, I. Ben Salem, A. Assarar, R. Berbaoui, C. Poilane & R. El Guerjouma, Analyse par émission acoustique de l'endommagement des matériaux éco composites, 10ème Congrès d'acoustique, 2010
- [8] NOESIS software, Advanced Acoustic Emission Data Analysis Pattern Recognition and Neural Networks Software, 2004.
- [9] A. Bravo, L. Toubal, D. Koffi et F. Erchiqui, « Characterization of Tensile Damage for a Short Birch Fiber-reinforced Polyethylene Composite with Acoustic Emission, » *International Journal of Material Science*, vol. 3, n° 13, pp. 79-89, 2013.
- [10] A. Likas, N.J. Classis, and J. Verbeek. The global k-mean clustering algorithm. *Pattern Recognition Letters*, 36 :451–461, 2003. (Cité pages 72 et 73.)
- [11] Davies DL, Bouldin DW. A cluster separation measure. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 1979; 1:224–7.
- [12] M. Moevus, N. Godin, M. R'Mili, D. Rouby, P. Reynaud, G. Fantozzi, G. Farizy, Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiCf/[Si-B-C] composites exhibiting different tensile behaviours. Part II: Unsupervised acoustic emission data clustering. *Composites Science and Technology*, 2008; 68: 1258–65.
- [13] V. Kostopoulos, T.H. Loutas, A. Kontsos, G. Sotiriadis, Y.Z. Pappas, On the identification of the failure mechanisms in oxide/oxide composites using acoustic emission. *Nondestructive Testing and Evaluation Int.*, 2003; 36: 571–80.
- [14] S. Momon, M. Moevus, N. Godin, M. R'Mili, P. Reynaud, G. Fantozzi, G. Fayolle, Identification de la signature acoustique des différents mécanismes sources lors d'essais de fatigue sur CMC : Application de classificateur supervisé et non supervisé. *Comptes rendus des JNC 16 – Toulouse* 2009.