



HAL
open science

**Analyse multi-échelle des mécanismes
d'endommagement de composites chanvre/époxy par
émission acoustique = Multi-scale damage analysis of
hemp-fibre woven fabric/epoxy composites by using
acoustic emission**

Claire Bonnafous, Fabienne Touchard, Laurence Chocinski-Arnault, C. Dever,
G. Alise

► **To cite this version:**

Claire Bonnafous, Fabienne Touchard, Laurence Chocinski-Arnault, C. Dever, G. Alise. Analyse multi-échelle des mécanismes d'endommagement de composites chanvre/époxy par émission acoustique = Multi-scale damage analysis of hemp-fibre woven fabric/epoxy composites by using acoustic emission. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00389220

HAL Id: hal-00389220

<https://hal.science/hal-00389220>

Submitted on 11 Jun 2009

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

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

Analyse multi-échelle des mécanismes d'endommagement de composites chanvre/époxy par émission acoustique.

Multi-scale damage analysis of hemp-fibre woven fabric/epoxy composites by using acoustic emission

C. Bonnafous¹, F. Touchard¹, L. Chocinski-Arnault¹, C. Dever², G. Alise³

1 : Laboratoire de Mécanique et de Physique des Matériaux, ENSMA UMR CNRS 6617
86960 FUTUROSCOPE CEDEX

e-mail : claire.bonnafous@lmpm.ensma.fr, fabienne.touchard@lmpm.ensma.fr, laurence.chocinski@lmpm.ensma.fr

2 : VALAGRO : Valorisation des agroressources
86022 POITIERS Cedex

e-mail : cdever@valagro-rd.com

3 : Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie
CRITT Matériaux Poitou-Charentes - 17303 ROCHEFORT CEDEX
e-mail : g.alise@critt-materiaux.com

Résumé

Ce travail propose une étude expérimentale des mécanismes d'endommagement de composites tissés chanvre/époxy par la technique non destructive d'émission acoustique. Pour cela, une étude multi-échelle des distributions d'amplitude des événements acoustiques a été développée. Des essais de traction sur la résine seule et sur le fil de chanvre seul, constituants élémentaires du composite, ont été réalisés afin de caractériser leurs signatures acoustiques propres. Les gammes d'amplitude pour ces constituants élémentaires ont ensuite été identifiées dans les distributions d'évènements acoustiques des composites chanvre/époxy. Des observations microscopiques des faciès de rupture des composites couplées à l'analyse statistique des distributions d'amplitudes ont permis d'identifier les différents modes d'endommagement dans les composites chanvre/époxy : fissuration matricielle, rupture de fibres et décohésion interfaciale. Un lien direct a ainsi pu être établi entre les amplitudes des évènements acoustiques enregistrés dans ces composites et les mécanismes d'endommagement associés.

Abstract

This study deals with hemp-fibre woven fabric/epoxy composites. An experimental method has been developed in order to characterise damage mechanisms in these composites using acoustic emission. A multi-scale analysis of the amplitude distributions has been performed. Tensile tests have been realised on hemp yarn and neat epoxy resin to determine acoustic emission range of each material. Results have shown that AE amplitude range of hemp yarn and neat resin can be clearly identified in AE composite response. Moreover, AE analysis has been linked with scanning electron microscopy observations of composite fracture zone to investigate fracture mechanisms in hemp-fibre woven fabric/epoxy composites. Thanks to this combination, correlations have been established between damage mechanisms in hemp/epoxy composites and AE amplitude distributions.

Mots Clés : Emission acoustique, Multi-échelle, Fibres naturelles, Composites tissés, Endommagement

Keywords : Acoustic emission, Multi-scale, Natural fibre, Woven fabric composites, Damage mechanisms

1. Introduction

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans des domaines très divers (aéronautique, automobile, offshore, ferroviaire, ...). Le dimensionnement des structures et la prévision de leur durée de vie sont liés au comportement des matériaux. La compréhension des mécanismes d'endommagement dans les composites est donc nécessaire pour permettre leur expansion.

Ce travail porte sur des matériaux composites tissés chanvre/époxy. Les composites à fibres naturelles constituent un nouvel enjeu face au problème du recyclage des composites renforcés par des fibres synthétiques. Leur utilisation permettrait de réduire les impacts environnementaux [1]. De nombreux

travaux portent sur des composites à fibres de lin [2-3] ou sur des composites à fibres courtes de chanvre [4-6], et, plus récemment quelques études se sont également intéressées à des composites unidirectionnels renforcés par des fils longs de chanvre [7]. Dans cette étude, les renforts utilisés sont des tissus de fils de chanvre.

Afin d'analyser les mécanismes d'endommagement dans ces composites, la technique non destructive d'émission acoustique a été utilisée. Cette technique est déjà largement utilisée pour des composites carbone ou verre/polyester [8-9], carbone ou verre/époxy [10-13] ou encore à renforts polymères [14]. Cependant, très peu de travaux utilisant cette technique ont été publiés pour des composites à fibres naturelles [15]. Les matériaux composites soumis à des sollicitations mécaniques subissent différents types d'endommagements (fissuration, délaminage, décohésion fibre/matrice, rupture et arrachage de fibres) qui conduisent à la rupture. Chaque mécanisme d'endommagement est source d'une onde d'émission acoustique de type discret. L'analyse de cette onde peut permettre l'identification des modes d'endommagement du matériau. Dans la littérature, différents protocoles expérimentaux sont proposés en fonction des matériaux étudiés. Dans le cas de composites stratifiés à renforts unidirectionnels, l'identification des mécanismes d'endommagement est communément réalisée au moyen d'essais de traction sur la résine seule et sur des composites unidirectionnels [0], [45] et [90] [9,14]. Les modes dominants d'endommagement pour chaque orientation sont alors directement reliés aux amplitudes d'évènements acoustiques enregistrées. Par exemple, Huguet et al. [9] étudient des composites UD verre/polyester et identifient les fissurations matricielles à partir d'essais de traction sur résine pure et les décohésions fibre/matrice grâce à des essais comparatifs sur composites [45] et [90]. Dans le cas des composites tissés, l'architecture mésoscopique complexe du matériau engendre une multiplication des interfaces et des mécanismes d'endommagement [16-17]. Pour gérer la complexité des mécanismes rencontrés, les études multiplient les types d'essais et/ou les techniques expérimentales [10,12,18]. Par exemple, Scida et al. [10] développent des essais complémentaires de flexion et de cisaillement sur des composites verre/époxy pour des tissages de type sergé et satin. Lomov et al. [12] couplent les enregistrements d'émission acoustique avec des radiographies X pour identifier les modes d'endommagement dans des composites carbone/époxy à renforts tissés.

L'enjeu de ce travail est de caractériser par émission acoustique les modes d'endommagement de composites chanvre/époxy tissés. Pour cela, un protocole expérimental basé sur une étude multi-échelle en émission acoustique a été développé. Des essais de traction sur les fils de chanvre seuls et sur la résine seule ont été réalisés pour évaluer les signatures acoustiques initiales des mécanismes propres à la matrice et aux renforts. Ces signatures ont ensuite été analysées afin d'identifier les mécanismes d'endommagement dans les composites chanvre/époxy tissés.

2. Matériaux et méthodes d'essais

2.1 Matériau étudié

Le matériau composite étudié est un stratifié tissé chanvre/époxy. Il est constitué de sept plis de tissus, tous orientés avec la chaîne dans la direction 0° et imprégnés d'une résine époxy de type Epolam 2022. Les plaques de composites ont été réalisées selon deux procédés : par infusion effectué par le CRITT MPC ou par un moulage par injection réalisé par l'entreprise VALAGRO. Un protocole de cuisson optimisé (24h à température ambiante, 4h à 50°C, 2h à 80°C et 4h à 100°C) a été utilisé pour la réalisation des composites et de la résine [19]. Il a conduit à une température de transition vitreuse de la matrice époxy voisine de 85°C. Le taux volumique de fibres des composites chanvre /époxy étudiés varie de 35% à 40%. La microstructure de ces composites présente quatre échelles distinctes (Fig. 1) :

- les fibres primaires de chanvre, issues de la tige de la plante,
- le fil de chanvre, généré par un enroulement en spirale de fibres de chanvre avec un angle moyen de 11°,
- le pli constitué de tissu de chanvre (de type taffetas 4 fils de chaîne / 4 fils de trame) et de résine époxy,
- le composite tissé chanvre/époxy [0/90]₇.

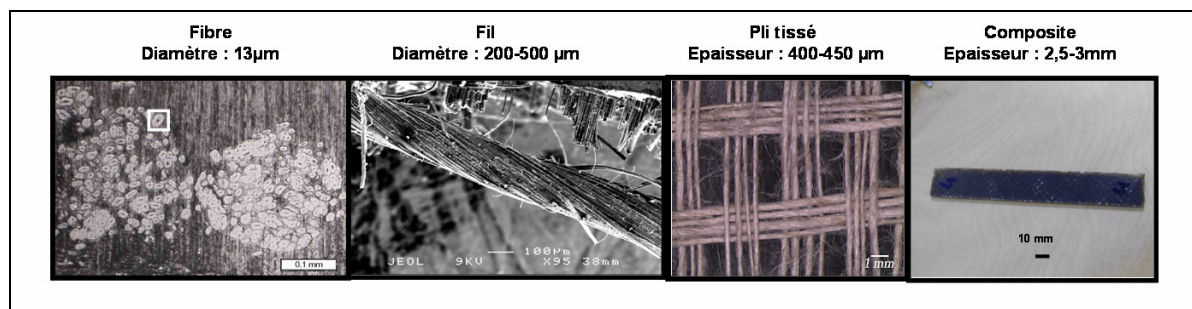


Fig.1. Les différentes échelles de la microstructure d'un composite tissé chanvre /époxy.

2.2 Essais de traction uniaxiale sur fil de chanvre

Chaque échantillon de fil de chanvre possède une longueur utile de 25 mm environ. La section de chaque fil, supposée circulaire, a été déterminée à partir de son diamètre moyen évalué en réalisant cinq mesures sur la longueur utile du fil avec un microscope Leica Microsystems équipé du logiciel IM 50. Les essais de traction sur fils ont été réalisés à l'aide d'une machine Instron E1000 équipée d'une cellule de force de 250N, avec une vitesse de déplacement de la traverse de 0,5 mm/min. Afin d'éviter le glissement des fils durant l'essai de traction, des talons en composite verre/époxy ont été placés à chaque extrémité du fil (Fig. 2).

2.3 Essais de traction uniaxiale sur résine et composite

Les éprouvettes de composites et de résine (Fig. 2) ont été soumises à une traction uniaxiale sur une machine de traction de type Instron 4505 équipée de mors hydrauliques et asservie en vitesse de déplacement de traverse à 0,5mm/min. La mesure du déplacement est effectuée grâce à un extensomètre à couteaux placé au centre des éprouvettes pour des longueurs utiles respectives des éprouvettes de résine et de composites de $60 \pm 0,5$ mm et 100 ± 10 mm. Les faciès de rupture sont observés, après métallisation, au microscope électronique à balayage JEOL 4500.

2.4 Instrumentation par émission acoustique

Pour chaque matériau : résine seule, fil de chanvre seul et composite chanvre/époxy, l'initiation et la propagation de l'endommagement sont suivies par émission acoustique. La chaîne d'émission acoustique est constituée d'un système d'acquisition PCI-2 de Physical Acoustics Corporation. Deux capteurs piézo électriques larges bandes avec une fréquence de résonance de 300 kHz, et une surface active de 10mm de diamètre ont été utilisés pour l'expérimentation. Pour tous les essais, l'acquisition a été effectuée sur une bande de fréquence variant de 1kHz à 3 MHz avec un seuil fixé à 50 dB pour les composites et les fils de chanvre et à 25dB pour la résine seule. Les pré-amplificateurs ont été réglés avec un gain de 40dB et les données d'acquisition des salves sont les suivantes : une durée fixée à 200μs pour la détermination du maximum de la salve, un temps de réarmement de 1000 μs afin d'éviter l'acquisition d'éventuels échos et un temps de 800 μs qui permet au système de déceler la fin du phénomène acoustique.

Les capteurs ont été imprégnés d'une graisse Silicon et positionnés, au moyen de pinces, directement sur les éprouvettes pour les essais sur résine seule et sur composites, et sur les talons pour les essais sur fils de chanvre (Fig. 2). Pour chaque éprouvette, le système d'acquisition a été calibré avant chaque essai au moyen de cassés de mines avec un stylo spécifique permettant d'ajuster le contact entre les capteurs et l'éprouvette. Connaissant la distance entre les centres des deux capteurs, la vitesse de l'onde a été déduite et entrée dans le logiciel d'acquisition afin de permettre la localisation des événements acoustiques. Le traitement des données a ainsi été effectué uniquement à partir des événements acoustiques situés entre les capteurs (zones hachurées sur la figure 2). Afin de valider les réglages, des courbes-types présentant le nombre d'échos en échelle logarithmique en fonction de l'amplitude ont été tracées pour vérifier que les bruits extérieurs ont bien été supprimés grâce aux calibrations effectuées (Fig. 3).

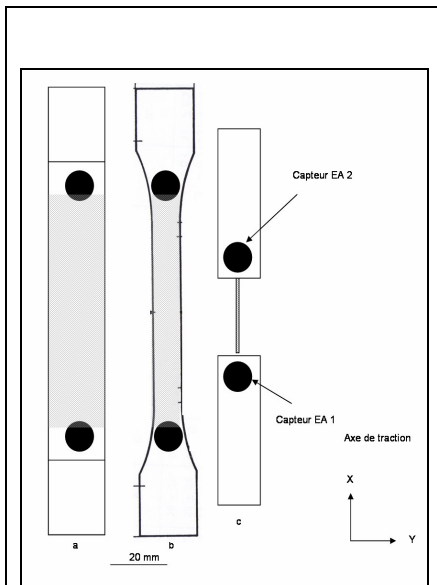


Fig. 2. Géométrie des éprouvettes et localisation des capteurs d'émission acoustique a) Composite chanvre /époxy, b) Résine époxy, c) Fil de chanvre.

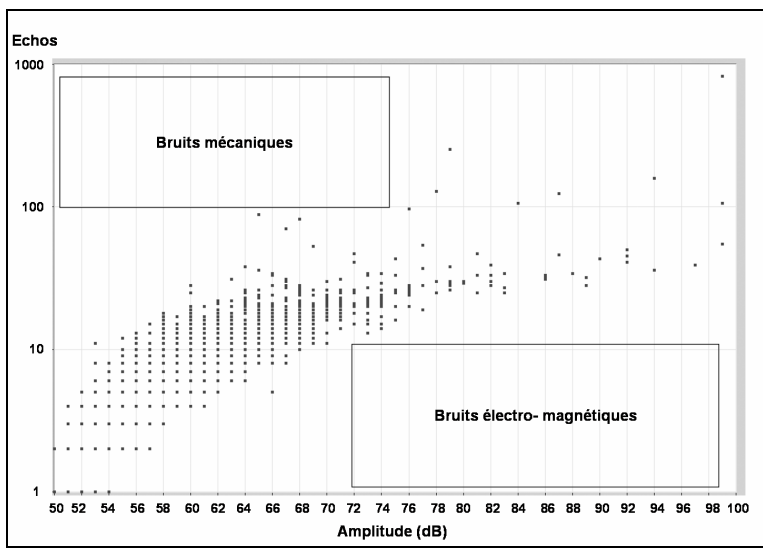


Fig. 3. Exemple de courbe type d'émission acoustique : Nombre d'échos (échelle logarithmique) en fonction de l'amplitude des échos pour une éprouvette de composite tissu chanvre/époxy.

3. Résultats et discussion

3.1 Méthode d'analyse multi-échelle

Une méthode d'analyse multi-échelle par émission acoustique a été développée. La première étape a consisté à caractériser les signatures acoustiques propres à chaque matériau : la résine seule, le fil de chanvre seul et le composite chanvre/époxy [0/90]₇. Pour cela, l'amplitude des évènements acoustiques a été enregistrée lors des essais de traction sur chaque matériau. Puis, une approche statistique des distributions des amplitudes a été réalisée. Les données récoltées pour l'ensemble des éprouvettes testées (4 à 10 essais par matériau selon la reproductibilité) ont été sommées et moyennées afin d'obtenir une courbe expérimentale de distribution des amplitudes pour chaque matériau [20]. Ces profils expérimentaux issus de l'analyse des évènements acoustiques ont ensuite été approchés par des lois de type Laplace-Gauss. Deux grandeurs principales ont été utilisées : le mode, qui représente la valeur moyenne de la population, et la gamme, qui correspond à la largeur de la courbe à mi-hauteur et définit les valeurs de la population les plus fréquemment rencontrées (Fig. 4).

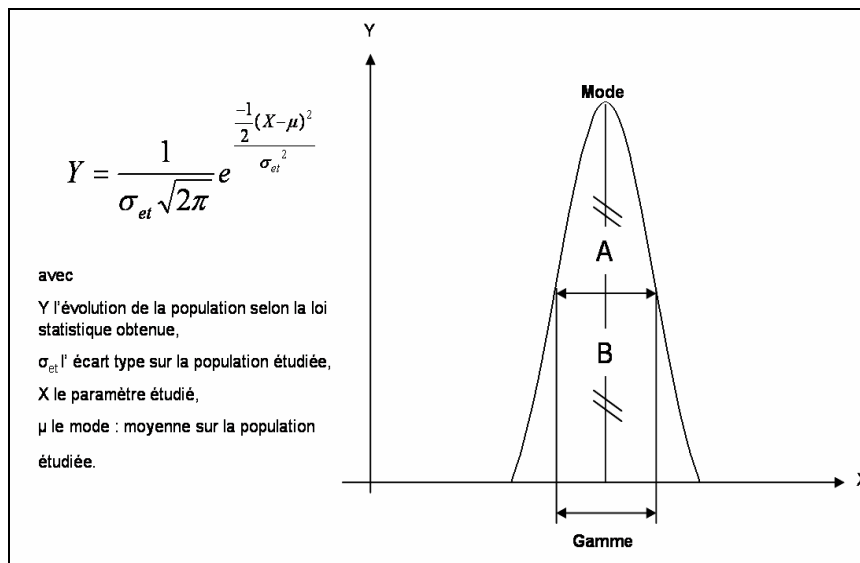


Fig. 4. Grandeurs associées aux lois de distribution de Laplace-Gauss [21]

D'autre part, pour chaque matériau, le nombre d'évènements enregistrés lors des essais a été pris en compte. Pour cela, la valeur maximale de Y a été prise égale au nombre moyen d'évènements situés dans le domaine A (Fig. 4) pour un matériau donné et noté dans la suite n_{Amoy} . Ainsi, la hauteur relative des pics est directement reliée au nombre moyen d'évènements enregistré, dans le domaine A , pour chaque matériau.

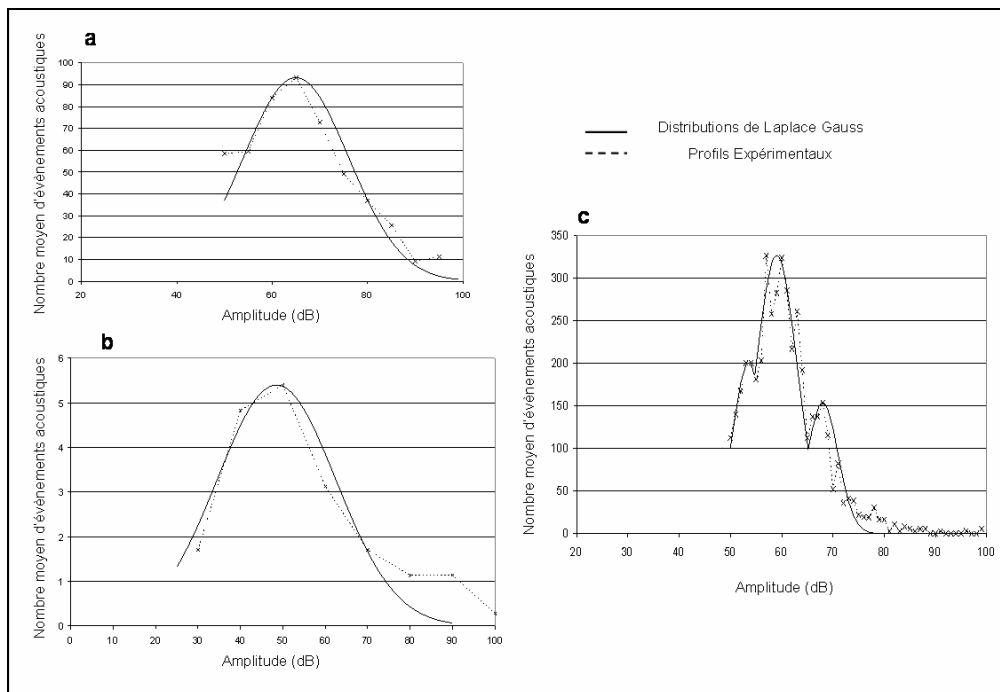


Fig. 5. Courbes expérimentales et profils statistiques des distributions des amplitudes des évènements acoustiques sur (a) fil de chanvre, (b) résine époxy, (c) composites chanvre/époxy [0/90]₇

La courbe expérimentale de distribution des amplitudes des évènements acoustiques et la loi statistique associée sont présentées en figure 5 pour chaque matériau testé : le fil de chanvre seul (Fig. 5a), la résine seule (Fig. 5b) et le composite chanvre/époxy [0/90]₇ (Fig. 5c). La figure 5a montre que, pour le fil de chanvre seul, le profil expérimental enregistré correspond bien à une loi de type Laplace-Gauss. Le spectre de distribution des amplitudes d'émission acoustique du fil de chanvre possède un mode situé à 65 dB et une gamme allant de 52 à 78 dB, avec un nombre moyen d'évènements représentatifs enregistrés par échantillon ($n_{Amoy\text{ fil}}$) de 93. Ces évènements acoustiques enregistrés dans le fil de chanvre sont à associer au développement d'endommagements telles que des ruptures de fibres. En ce qui concerne la résine seule, le nombre moyen, par échantillon, d'évènements acoustiques enregistrés : $n_{Amoy\text{ résine}}$, est très faible (5,4 évènements par éprouvette de résine seule). Un mode de 49 dB avec une gamme allant de 32 à 65 dB ont été obtenus en appliquant la loi statistique de Laplace-Gauss. Cette gamme permet de caractériser les endommagements qui se développent dans la résine, tels que la création et la propagation de fissures. Enfin, le spectre expérimental des amplitudes d'émission acoustique enregistrées pour le composite tissé chanvre/époxy est présenté en figure 5c. Trois pics ont été détectés sur la courbe expérimentale des distributions d'amplitude du composite. Pour s'approcher au mieux de ce profil expérimental, trois lois de type Laplace-Gauss ont donc été superposées. La figure 5c montre donc trois modes différents pour le composite à 53 dB, 59 dB et 68 dB, avec des gammes respectives allant de 50 à 57 dB, 54 à 64 dB et 64 à 72 dB. De plus, le nombre moyen d'évènements acoustiques par éprouvette de composite, $n_{Amoy\text{ composite}}$, est de 325. Il est très nettement supérieur à celui obtenu pour la résine seule et le fil de chanvre seul. Cela démontre le développement d'une importante activité d'endommagement dans ce type de composite.

3.2 Identification des mécanismes d'endommagement

Les résultats précédents ont donc montré que le profil expérimental des amplitudes des évènements acoustiques enregistrées sur les composites tissés chanvre/époxy se décompose en trois pics. La figure 6 compare les courbes expérimentales et statistiques obtenues pour le composite aux profils statistiques de la résine seule et du fil de chanvre seul. Le premier pic enregistré sur le composite correspond au mode de la résine seule (53 dB pour 49 dB), et le troisième pic est très proche de celui obtenu sur le fil de chanvre seul (68 dB pour 65 dB). Cela montre que l'on retrouve les signatures acoustiques de la résine seule et du fil de chanvre dans le composite chanvre/époxy ; le premier pic peut donc être attribué à un endommagement de la matrice et le troisième à l'endommagement du renfort. Ces résultats valident le protocole d'analyse multi-

échelle développée dans cette étude. Cependant, le second pic présent dans la signature du composite, possédant une gamme allant de 54dB à 64dB et un mode de 59dB reste encore à identifier. Il est également à noter que le nombre d'événements acoustiques liés à des phénomènes matriciels est beaucoup plus important dans le composite que dans la résine seule (respectivement, 200 contre 5,4), ce qui peut s'expliquer par une multiplication des sites d'amorçages de l'endommagement matriciel induite par la présence des renforts.

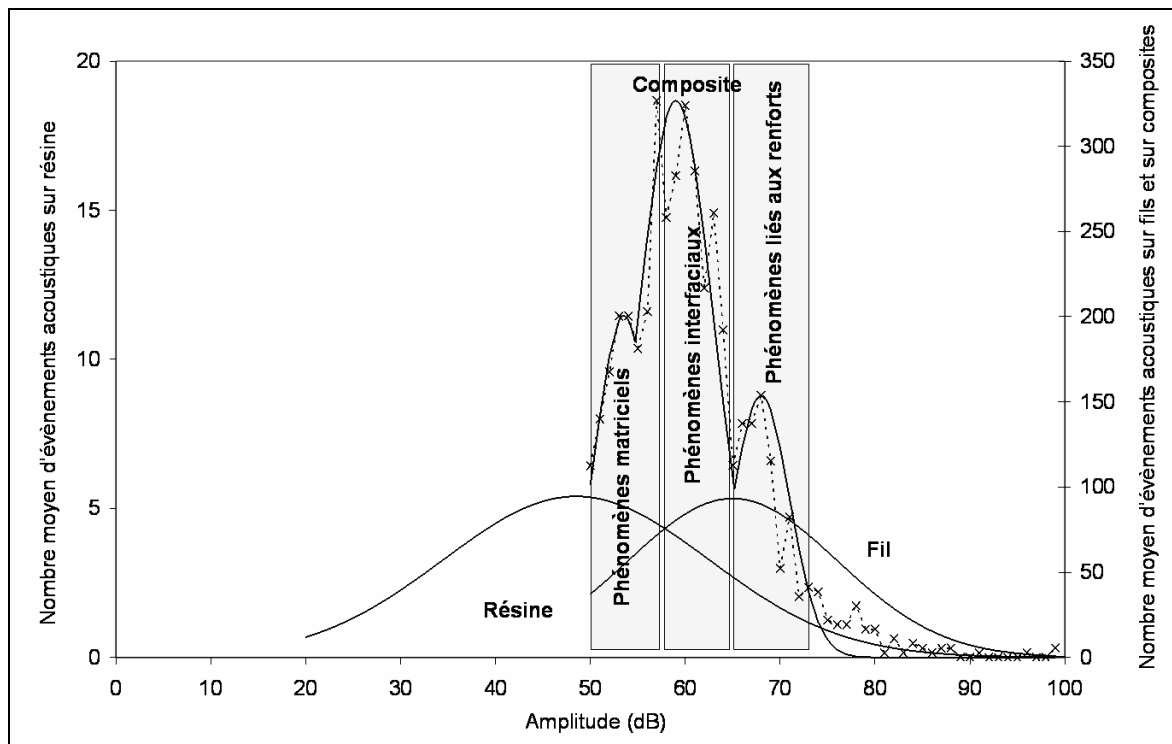


Fig. 6. Courbe expérimentale et statistique des amplitudes des événements acoustiques enregistrés sur les composites chanvre /époxy et profils statistiques pour la résine seule et le fil de chanvre seul.

Pour confirmer l'ensemble de ces résultats, les faciès de rupture des composites chanvre/époxy ont été analysés par microscopie à balayage (Fig. 7). Trois familles d'endommagement ont été observées :

- dans les renforts : des ruptures partielles de fibres dans les fils et des ruptures de fils (Fig. 7.1a et Fig. 7.1b) ;
- dans la matrice : des fissures et des zones de rupture (Fig. 7.2a et Fig. 7.2b) ;
- à l'interface fibre/matrice : des décohésions fibre/matrice, des déchaussements de fibres et des arrachages partiels ou complets de fils (Fig. 7.3a, Fig. 7.3b et Fig. 7.3c).

Il est à noter qu'aucun délaminage n'a été observé ce qui peut s'expliquer par l'architecture des composites tissés.

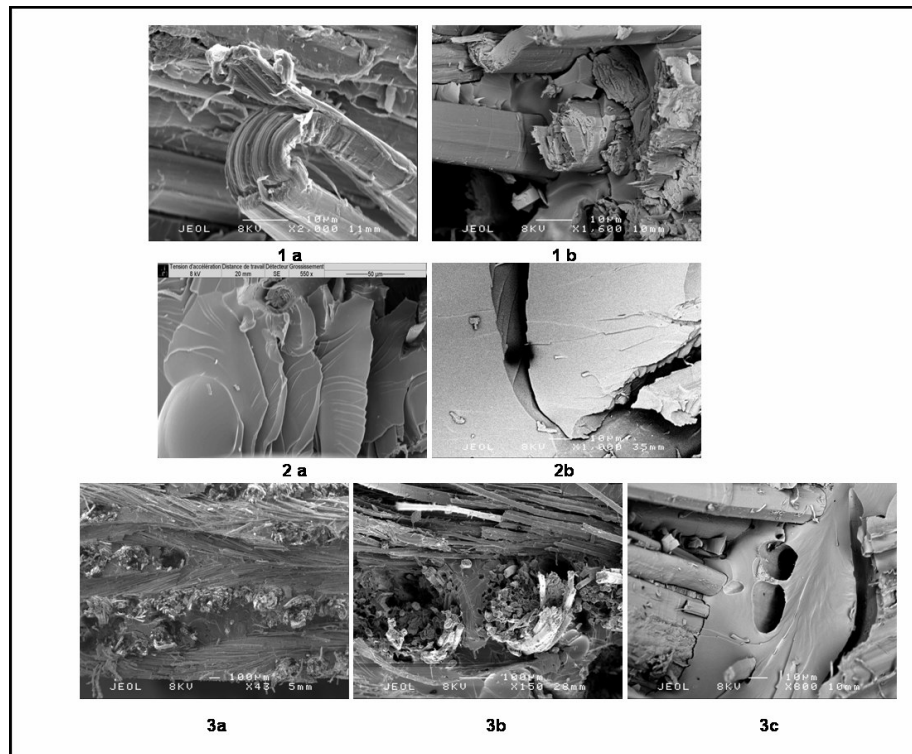


Fig. 7. Observations au MEB des faciès de rupture dans les composites tissés chanvre/époxy $[0/90]_7$: endommagements des renforts fils de chanvre (1a,1b), matriciels (2a,2b), à l'interface renfort/matrice (3a,3b,3c).

Les deux premiers types d'endommagements peuvent donc être directement reliés aux pics du profil d'amplitude d'émission acoustique du composite correspondant aux modes de la résine seule et du fil de chanvre seul. Grâce aux observations microscopiques, le second pic d'émission acoustique, qui possède une signature acoustique située entre les signatures acoustiques des deux constituants élémentaires du composite, peut être attribué aux phénomènes d'endommagement à l'interface fibre/matrice (Fig. 6). Cette approche multi-échelle, basée sur l'identification des signatures acoustiques des matériaux élémentaires constitutifs du composite, a donc permis de caractériser les mécanismes d'endommagement qui se développent dans un composite tissé chanvre/époxy. Les différents modes et gammes qui ont été identifiés ainsi que les mécanismes correspondants sont récapitulés dans le tableau 1.

| Matériau | Mode (dB) | Gamme (dB) | Mécanismes d'endommagement dominants |
|--|-----------|------------|---|
| Fil de chanvre seul | 65 | 52-78 | Endommagement et Rupture de fibres |
| Résine seule | 49 | 32-65 | Fissurations |
| Composites $[0/90]_7$, chanvre/époxy | 53 | 50-57 | Fissuration de la matrice |
| | 59 | 54-64 | Rupture de l'interface renfort/matrice Déchaussement |
| | 68 | 64-72 | Endommagement et Rupture des renforts |

Tab. 1. Corrélation entre les amplitudes des événements d'émission acoustique de chaque matériau et les mécanismes d'endommagement.

3.3 Suivi temporel des mécanismes d'endommagement dans le composite chanvre/époxy

Au cours des essais de traction sur les composites tissés chanvre/époxy $[0/90]_7$, les événements d'émission acoustique ont été enregistrés. La figure 8a présente un exemple de courbe contrainte-déformation associée au nombre cumulé d'évènements acoustiques. Ce nombre permet d'avoir une information globale sur l'initiation et la propagation des endommagements dans le composite. On constate sur la figure 8a que, jusqu'à 13% de la déformation à rupture, l'activité acoustique reste très faible. Le décollement marqué du nombre cumulé d'évènements a lieu à 14% de la déformation à rupture et témoigne de l'initiation d'endommagements dans le matériau composite. Ensuite, on observe une augmentation du

nombre d'évènements enregistrés, que l'on peut associer au développement de ces endommagements. Puis en fin d'essai, à partir de 69% de la déformation à rupture, on constate un accroissement brutal de l'activité acoustique témoin de la multiplication des phénomènes menant à la rupture. Grâce aux résultats obtenus précédemment lors de l'analyse multi-échelle, il est possible d'obtenir des informations supplémentaires en effectuant un suivi temporel des mécanismes d'endommagement dans ces composites durant l'essai de traction. Pour cela, la figure 8b est un exemple de courbe obtenue sur composite chanvre/époxy présentant l'amplitude des évènements acoustiques enregistrés en fonction du pourcentage de la déformation à rupture. Les différents types d'évènements sont distingués par différents symboles en se basant sur les gammes d'amplitude déterminées précédemment (Tab. 1), ce qui permet de repérer les trois types d'évènements : liés au renfort, à la matrice ou à l'interface. Cette méthode permet de mettre en évidence trois zones distinctes sur la figure 8b. Ainsi, pour des pourcentages de déformation à rupture variant de 0 à 42% (1^{ère} zone sur la figure 8b), seuls des évènements matriciels ou interfaciaux ont été détectés. Ces évènements correspondent à la création et à la propagation de fissures dans la matrice et à des ruptures de l'interface fibre/matrice. Une seconde zone variant de 42% à 70% de la déformation à rupture est composée de phénomènes interfaciaux couplés à des phénomènes liés aux renforts. Il s'agit de ruptures de l'interface fibre/matrice couplées à des endommagements des renforts. Enfin, en fin d'essai (3^{ème} zone sur la figure 8b), de nombreux évènements ont été enregistrés : un nombre important de phénomènes interfaciaux a été enregistré simultanément à des nombres plus faibles liés aux renforts et à la matrice. Ces évènements situés dans les trois domaines d'amplitude identifiés précédemment expliquent l'augmentation brutale du nombre cumulé d'évènements constatée en figure 8a qui mène à la rupture de l'éprouvette.

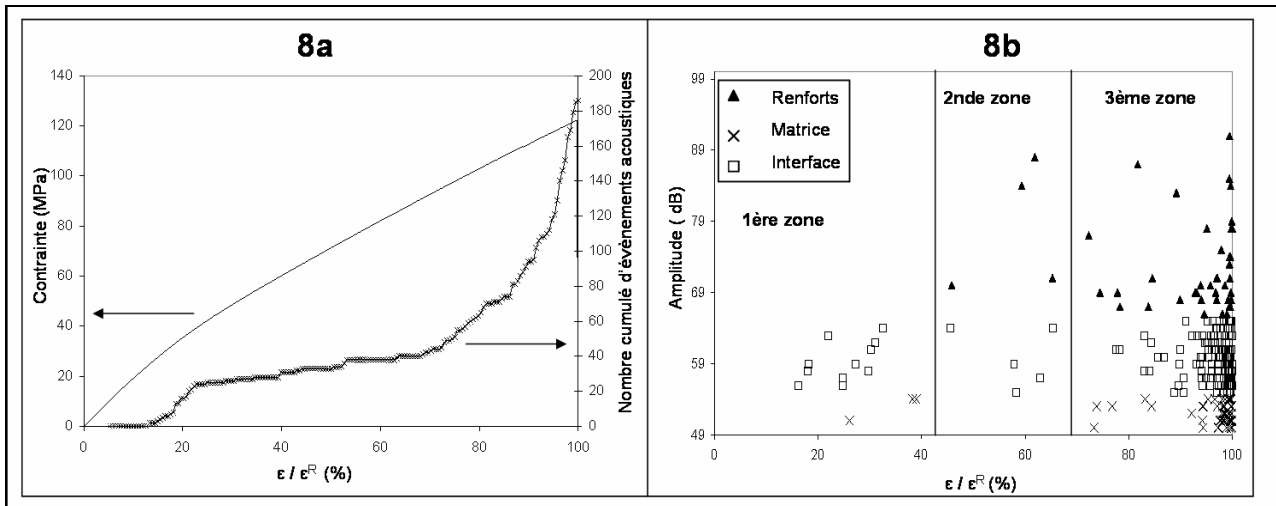


Fig. 8. Exemple de courbes obtenues sur composite chanvre/époxy [0/90]₇ : (a) courbe contrainte-déformation associée au nombre cumulé d'évènements acoustiques et (b) amplitude des évènements enregistrée en fonction du rapport déformation / déformation à rupture.

Les résultats obtenus par l'analyse multi-échelle des distributions d'amplitude des évènements acoustiques ont donc permis de mener une identification et un suivi temporel du développement des endommagements dans les composites chanvre/époxy et constituent une base solide pour la compréhension du comportement de ces composites tissés.

3.4 Validation énergétique

Dans ce travail, les mécanismes d'endommagement des composites ont été identifiés sur la base d'une analyse des distributions d'amplitude des signaux d'émission acoustique. La technique d'émission acoustique délivre un nombre de paramètres très important comprenant non seulement des données en amplitude mais aussi des données en fréquence, en énergie, en nombre de coups, et des caractéristiques liées aux salves (durée, temps de montée). Ainsi, il est possible d'analyser ces résultats de façon multi-paramétrique [9,13,22]. De nombreuses études portant sur différents matériaux ont montré l'existence d'une corrélation directe entre les mécanismes d'endommagement et les niveaux d'amplitude des signaux acoustiques [11,23]. Cependant, les phénomènes d'endommagement étant des évènements énergétiques, un bilan énergétique des évènements d'émission acoustique enregistrés dans les composites tissés chanvre/époxy a également été réalisé. La figure 9 présente l'énergie totale des évènements acoustiques enregistrés sur un composite chanvre/époxy en fonction de leur amplitude. Les gammes d'amplitude identifiées précédemment dans les composites pour la matrice et les renforts (Tab. 1) sont également reportées sur la figure 9. On constate que ces gammes correspondent à des plages énergétiques distinctes, ce qui montre que les phénomènes d'endommagement qui se distinguent par des niveaux énergétiques

différents, peuvent être également identifiés à l'aide de leur amplitude. De plus, les phénomènes interfaciaux qui possèdent un mode de 59 dB, sont également situés dans des gammes énergétiques intermédiaires. La différenciation des mécanismes d'endommagement autant au niveau énergétique que par les gammes d'amplitude permet donc de valider l'identification réalisée sur les composites chanvre/époxy tissés.

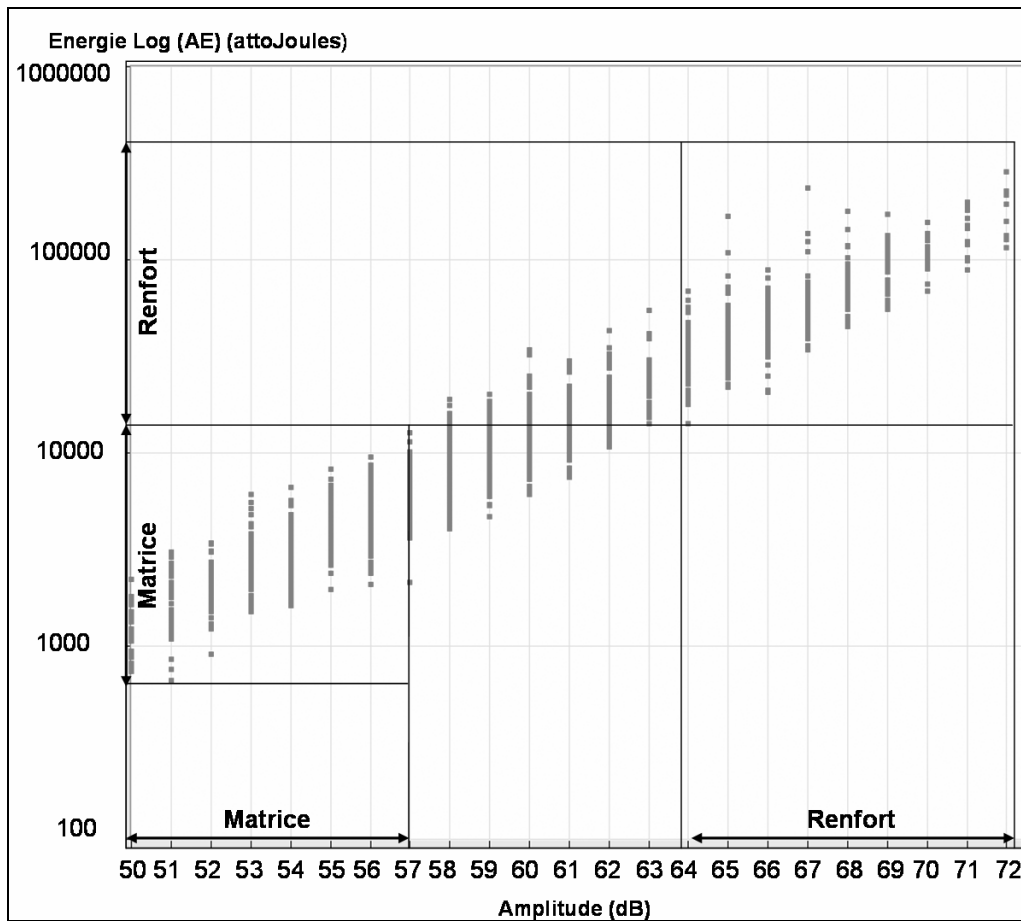


Fig. 9. Courbe d'énergie totale des événements acoustiques (en échelle logarithmique) en fonction de leur amplitude pour des composites tissés chanvre/époxy [0/90]₇.

4. Conclusions

Les modes d'endommagement dans des composites tissés chanvre/époxy ont été identifiés au moyen de la technique non destructive d'émission acoustique. Pour cela, une méthode d'analyse multi-échelle a été développée, basée sur la caractérisation des signatures acoustiques des matériaux élémentaires constitutifs du composite. Des essais de traction sur fils de chanvre seuls et résine époxy seule ont permis de déterminer leurs spectres de distribution d'amplitude propres. Puis, l'analyse statistique des spectres d'amplitude des signaux d'émission acoustique enregistrés sur les composites a mené à l'identification de différents phénomènes. Trois modes d'endommagement principaux ont été isolés par leurs amplitudes caractéristiques : les phénomènes matriciels, les phénomènes interfaciaux, et les phénomènes liés au renfort. Ces différents mécanismes d'endommagement ont été confirmés par des observations microscopiques des faciès de rupture des composites. Cette démarche se poursuivra par la proposition d'un modèle d'endommagement couplant résultats mécaniques et émission acoustique.

5. Remerciements

Les auteurs remercient la Région Poitou- Charentes pour son soutien financier.

Références

- [1] S.V. Joshi, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, S. Arora, « Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites ? ». *Composites Part A Appl Sci Manuf*, Vol. 35, pp. 371-376, 2004.
- [2] H.L. Bos, J. Müssig, M.J.A. Van den Oever, « Mechanical properties of short-flax-fibre reinforced compounds ». *Composites Part A Appl Sci Manuf*, Vol. 37, pp. 1591-1604, 2006.

- [3] K. Charlet, C. Baley, C. Morvan, J.P. Jernot, M. Gomina, J. Bréard, « Characteristics of Hermès flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites ». *Composites Part A Appl Sci Manuf*, Vol. 38, pp. 1912-1921, 2007.
- [4] Z. Li, X. Wang, L. Wang, « Properties of hemp fibre reinforced concrete composites ». *Composites Part A Appl Sci Manuf*, Vol. 37, pp. 497-505, 2006.
- [5] P. Mutjé, A. López, M.E. Vallejos, J.P. López, F. Vilaseca, « Full exploitation of *Cannabis sativa* as reinforcement/filler of thermoplastic composite materials ». *Composites Part A Appl Sci Manuf*, Vol. 38, pp. 369-377, 2007.
- [6] D. Sedan, C. Pagnoux, A. Smith, T. Chotard, « Interaction fibre de chanvre/ciment : influence sur les propriétés mécaniques du composite ». *Matériaux et Techniques*, Vol 95, pp 133-142, 2007.
- [7] B. Madsen, P. Hoffmeyer, H. Lilholt, « Hemp yarn reinforced composites ». *Composites Part A Appl Sci Manuf*, Vol. 38, pp. 2204-2215, 2007.
- [8] M. Giordano, A. Calabrò, C. Esposito, A. D'Amore, L. Nicolais, « An acoustic-emission characterization of the failure modes in polymer-composite materials ». *Composites Science and Technology*, Vol. 58, pp. 1923-1928, 1998.
- [9] S. Huguet, N. Godin, R. Gaertner, L. Salmon, D. Villard, « Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester ». *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1433-1444, 2002.
- [10] D. Scida, Z. Aboura, M.L. Benzeggagh, « The effect of ageing on the damage events in woven-fibre composite materials under different loading conditions ». *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 551-557, 2002.
- [11] S. Mechraoui, S. Benmedakhene, S. Amami, A. Laksimi, « Analyse de l'endommagement et de la rupture d'une structure composite stratifiée verre/époxy (0/30/60)₁₀ par émission acoustique ». In : *Compte rendu des 14e Journées Nationales sur les Composites (JNC14)*, Publiés par M.L Benzeggagh et J. Lamon, pp. 801-810, Compiègne, 22-24 Mars 2005. ISBN 2-95051176-7
- [12] S.V. Lomov, D.S. Ivanov, T.C. Truong, I. Verpoest, F. Baudry, K. Vanden Bosche, H. Xie, « Experimental methodology of study of damage initiation and development in textile composites in uniaxial tensile test ». *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp. 2340-2349, 2008.
- [13] W. Haselbach, B. Lauke, « Acoustic emission of debonding between fibre and matrix to evaluate local adhesion ». *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 2155-2162, 2003.
- [14] X. Zhuang, X. Yan, « Investigation of damage mechanisms in self-reinforced polyethylene composites by acoustic emission ». *Composites Science and Technology*, Vol. 66, pp. 444-449, 2006.
- [15] J-M. Park, P-G. Kim, J-H. Jang, Z. Wuang, B-S. Hwang, K L. DeVries, « Interfacial evaluation and durability of modified Jute fibers/polypropylene (PP) composites using micromechanical test and acoustic emission ». *Composites Part B*, Vol. 39, pp. 1042-1061, 2008
- [16] X. Tang, J.D. Whitcomb, A.D. Kelkar, J. Tate, « Progressive failure analysis of 2 x2 braided composites exhibiting multiscale heterogeneity ». *Composites Science and Technology*, Vol. 66, pp. 2580-2590, 2006.
- [17] F. Edgren, D. Mattsson, L.E. Asp, J. Varna, « Formation of damage and its effects on non-crimp fabric reinforced composites loaded in tension ». *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp. 675-692, 2004.
- [18] G.N. Morscher, « Modal acoustic emission of damage accumulation in a woven SiC/SiC composite ». *Composites Science and Technology*, Vol. 59, pp. 687-697, 1999.
- [19] C. Bonnafous, L. Chocinski-Arnault, F. Touchard, C. Dever, « Optimisation et caractérisation de la matrice époxy pour des composites à fibres naturelles ». In : *Actes et Programmes du 22e congrès sur la déformation des polymères solides (DEPOS 22)*, pp. 77-78, La Colle sur Loup, 18-20 Mars 2009.
- [20] C. Bonnafous, F. Lagattu, L. Chocinski, A. Abot, F. Dédaldéchamp, R. Lemoine, « De la plante aux composites tissés à fibres de chanvre (*Cannabis sativa*) ». In : *Journées Scientifiques et Techniques AMAC-MECAMAT Eco- Matériaux*, Amiens, 13 Octobre 2008.
- [21] M.R. Spiegel, « Statistique ». Publiés par Dunod, pp.35-36, Paris, 2002. ISBN 2-10-0006515-7
- [22] A. Marec, J.H. Thomas, R. El Guerjouma, « Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data ». *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 22, pp. 1441-1464, 2008.
- [23] S. Barré, M.L. Benzeggagh, « On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene ». *Composites Science and Technology*, Vol. 52, pp. 369-376, 1994.