



Analyse par émission acoustique de l'endommagement des matériaux éco-composites

Abderrahim El Mahi, Imen Ben Salem, Mustapha Assarar, Rachid Berbaoui,
Chritophe Poilane, Rachid El Guerjouma

► To cite this version:

Abderrahim El Mahi, Imen Ben Salem, Mustapha Assarar, Rachid Berbaoui, Chritophe Poilane, et al..
Analyse par émission acoustique de l'endommagement des matériaux éco-composites. 10ème Congrès
Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00551176

HAL Id: hal-00551176

<https://hal.science/hal-00551176>

Submitted on 2 Jan 2011

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.

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Analyse par émission acoustique de l'endommagement des matériaux éco-composites

A. El Mahi¹, I. Ben Salem¹, A. Assarar¹, R. Berbaoui¹, C. Poilane² & R. El Guerjouma¹

¹ Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine., Avenue Olivier Messiaen, 72085 Mans CEDEX 9, e-mail : abderrahim.elmahi@univ-lemans.fr

² Laboratoire de Recherche sur les propriétés des Matériaux Nouveaux, IUT d'Alençon 61250 Damigny

Ce travail propose une étude expérimentale des différents mécanismes d'endommagement des matériaux éco-composites à fibres de lin et résine époxyde. Les signaux acoustiques ont été enregistrés lors d'essais de traction sur des éprouvettes de ce matériau. Suivant le type de sollicitation et l'orientation des fibres dans les matériaux, certains modes d'endommagement sont privilégiés par rapport à d'autres. Ainsi, des signatures acoustiques provenant de quatre modes d'endommagement ont été identifiés: fissuration de la matrice, décohésion fibre-matrice, délaminage et rupture de fibres. Des techniques d'analyse statistique multivariable (k-moyenne) sont utilisées afin de distinguer les signaux correspondants à ces modes d'endommagement. Les paramètres utilisés pour la classification sont ceux issus de l'analyse temporelle conventionnelle des données d'EA: amplitude, énergie, nombre de coups... Les résultats obtenus par la classification sont encourageants, notamment pour les matériaux les plus complexes, en particulier les stratifiés croisés $[(0/90)_2]_s$, $[0_2/90_2]_s$ et hybride $[0_L/0_v/90_L/90_v]_s$, pour lesquels la discrimination des mécanismes d'endommagement a été très concluante.

1 Introduction

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans des domaines très divers (aéronautique, automobile, offshore, ferroviaire,...). Le dimensionnement des structures en composites et la prévision de leur durée de vie sont liées au comportement des constituants, notamment au type de renforts. Les fibres utilisées habituellement dans les matériaux composites sont d'origines minérale ou pétrochimique: fibres de verre, fibres de carbone, fibres organiques... Les enjeux économiques liés à la gestion des structures en fin de vie, aux coûts croissants des ressources fossiles, et à leur disparition annoncées, font que l'utilisation de fibres naturelles constitue, pour l'industrie du composite, une solution d'avenir. Les composites à fibres naturelles constituent donc un nouvel enjeu face aux problèmes du recyclage des composites renforcés par des fibres synthétiques. Les composites renforcés par des fibres végétales sont actuellement en forte expansion en raison notamment de l'intérêt croissant que leur accorde l'industrie automobile. Ces fibres présentent une excellente alternative aux fibres de verre d'un point de vue environnemental en raison de leur biodégradabilité et de leur combustibilité beaucoup plus neutre en termes de dégagement de gaz nocifs ou de résidus solides. Différents auteurs ont démontré ces avantages en réalisant des analyses de cycle de vie de polymères renforcés par des fibres naturelles notamment le lin [1, 2, 3,]. Dans ces travaux les auteurs se sont intéressés à l'étude du comportement des composites à fibres de lin et des composites à fibres courtes de chanvre. Malgré ces activités de recherche l'analyse des mécanismes d'endommagement de ces matériaux reste peu connue. La compréhension des mécanismes d'endommagement dans ces composites est donc nécessaire pour permettre leur expansion. Dans cette perspective, notre travail, porte sur une analyse par émission acoustique (EA) des mécanismes d'endommagement des éco-composites lin/époxyde en utilisant une analyse multivariable non supervisée par la méthode k moyenne. Cette étude permet d'identifier les

mécanismes d'endommagements de ces matériaux à l'aide des données d'EA reçu lors des essais et déceler ceux les plus critiques conduisant à la rupture des éprouvettes.

Des essais de traction avec suivi et enregistrement des signaux d'EA ont été réalisés dans un premier temps sur des éprouvettes modèles unidirectionnels (90° , 45° , 0°) et par la suite sur des éprouvettes éco-composites plus complexe de type stratifiés croisés et hybride.

2 Matériaux et procédures expérimentales

Le matériau est livré sous forme d'un rouleau d'UD pré-imprégné constitué par des fibres de lin et matrice époxyde. Il s'agit précisément d'un tissu possédant un fil trame pour 19 fil de chaîne qui est stocké à -18°C . Nous avons élaboré des plaques en éco-composite lin/époxyde UD de différentes orientation: 0° , 45° , 90° ainsi que des stratifiés à fibres de lin et résine époxyde suivant le drapage: $[(0/90)_2]_s$, $[0_2/90_2]_s$ et un stratifié hybride à fibres de lin, fibres de verre et résine époxyde selon le drapage $[0_L/0_v/90_L/90_v]_s$.

Le rouleau est découpé en plis de $110 \times 200 \text{ mm}^2$, les 10 plis de pré-imprégné sont déposés dans un moule après cirage du moule et du contre moule (pour faciliter le démoulage du produit fini). Les plis sont mis sous pression par serrage du contre moule par 12 vis disposées sur le pourtour. L'ensemble est mis au four à pression ambiante dans le cycle de cuisson suivant :

- 30 min à une température 80°C , pour permettre une bonne répartition de la résine dans le composite lorsque la fluidité de la résine est la plus élevée.
- 60 min à une température 130°C pour la polymérisation.

Après démoulage, la plaque composite est découpée en éprouvettes d'essais par un disque diamanté lubrifié à l'eau.

Les propriétés mécaniques des éco-composites renforcés par des fibres de lin et à matrice époxyde ont été déterminées dans des essais de traction effectués sur des éprouvettes avec talons en aluminium. La largeur des

éprouvettes et la longueur de la partie entre les talons sont de 20 mm et 100 mm respectivement, l'épaisseur est de 2 mm. La figure 1. montre le dispositif expérimental utilisé pour la réalisation des essais de traction et mis en évidence la position des capteurs pour l'enregistrement des signaux d'émission acoustique au cours des essais.

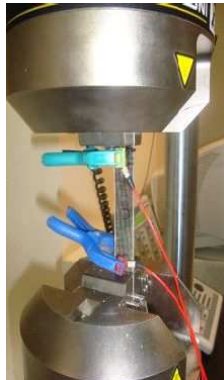


Figure 1 : Dispositif expérimental.

Le suivi de l'endommagement est réalisé à l'aide de la mesure d'émission acoustique. Un système d'acquisition (EPA) comprenant 2 voies avec une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz est utilisé. Ce système est composé d'une carte d'acquisition PCI reliée à un micro-ordinateur. La figure 2. présente une vue d'ensemble du dispositif d'émission acoustique. Les signaux d'émission acoustique sont enregistrés par 2 capteurs différentiels piézoélectriques de type Micro-80, de bande passante 100 kHz – 1 MHz et de 10 mm de diamètre, positionnés sur les éprouvettes avec une graisse silicone. Ces signaux sont ensuite amplifiés par un préamplificateur avec un gain de 40 dB. Les signaux sont ensuite convertis par la carte PCI, qui les numérise et procède à l'extraction des paramètres d'émission acoustique. Les données de l'émission acoustique sont transmises au micro-ordinateur, permettant l'affichage en temps réel, le stockage et le post-traitement des données.

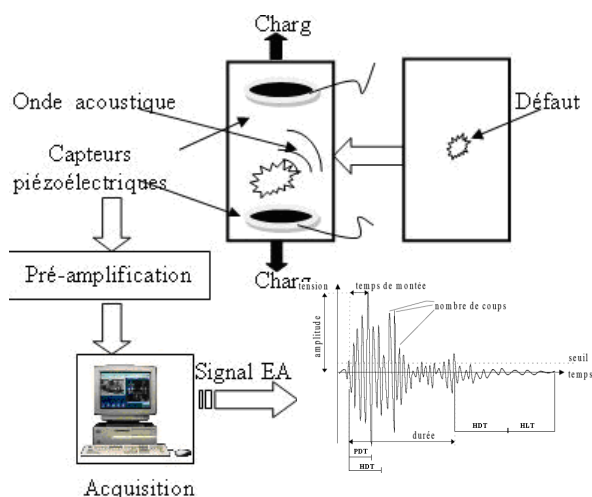


Figure 2. Synoptique d'un système d'émission acoustique.

3 Résultats et analyse

3.1 Caractéristiques mécaniques

La figure 3. donne les courbes charge/déplacement déduites des essais de traction des trois éprouvettes modèles de différentes orientations des fibres (0° , 45° , 90°). Les courbes présentent deux zones différentes. La première est purement linéaire et la seconde est non linéaire jusqu'à la rupture. Ce résultat traduit d'abord un comportement purement élastique réversible au début de l'essai suivi d'un comportement viscoplastique dû au comportement viscoplastique de la résine et au comportement viscoélastique des fibres naturelles.

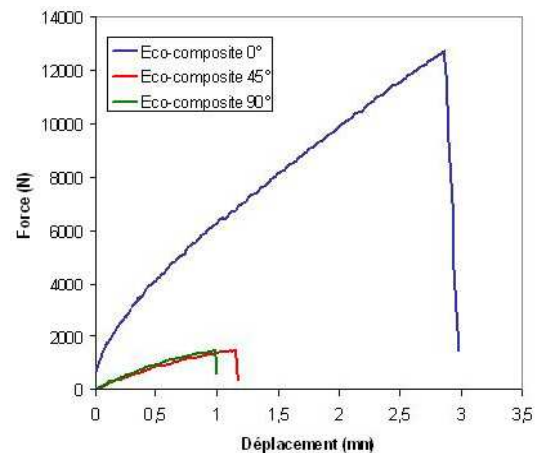


Figure 3: Courbes charge/déplacement déduites des essais de traction effectués sur les trois éco-composites à fibres unidirectionnelles: 0° , 45° , 90° .

Le tableau 1. met en évidence les faibles performances associées à l'éco-composite orienté à 45° et 90°

	Rigidité (N/mm)	σ_R (MPa)
Eprouvette sollicitée à 90° par rapport à la direction des fibres	1780	25
Eprouvette sollicitée à 45° par rapport à la direction des fibres	2020	28
Eprouvette sollicitée dans l'axe des fibres	6750	342

Table 1 : Caractéristiques mécaniques des éco-composites unidirectionnels étudiés.

La figure 4. donne les courbes charge/déplacement déduites des essais de traction des deux types de stratifiés croisés à séquences d'empilements différentes $[0_2/90_2]_s$, $[(0/90)_2]_s$, et du stratifié hybride $[0_L/0_V/90_L/90_V]_s$.

Le comportement des stratifiés est pratiquement linéaire jusqu'à la rupture des éprouvettes qui est de type fragile. Les propriétés mécaniques du stratifié hybrides $[0_L/0_V/90_L/90_V]_s$ sont plus élevées que celles des stratifiés $[0_2/90_2]_s$ et $[(0/90)_2]_s$. Il semble que le présence de fibres de verre augmente les propriétés mécaniques du composite. Les comportements mécaniques des deux stratifiés $[0_2/90_2]_s$, $[(0/90)_2]_s$ sont similaires au début de l'essai dans la zone linéaire et diffèrent lorsque les stratifiés commencent à s'endommager.

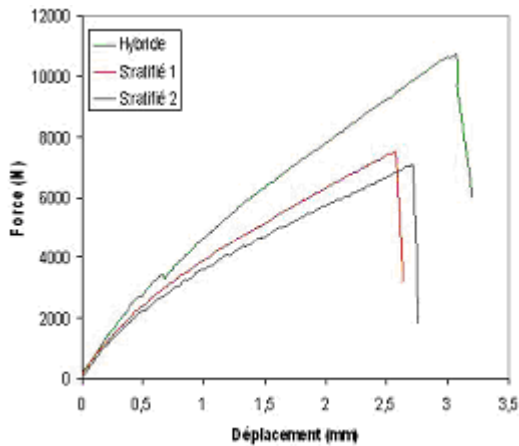


Figure 4: Courbes charge/déplacement déduites des essais de traction effectués sur trois types de stratifiés $[0_2/90_2]_s$, $[(0/90)_2]_s$ et $[0_L/0_V/90_L/90_V]_s$.

Le tableau 2. donne les caractéristiques mécaniques déduites des essais de traction effectué sur les différents stratifiés.

	Rigidité (N/mm)	σ_R (MPa)
Stratifié 1 = $[0_2/90_2]_s$	5120	165
Stratifié 2 = $[(0/90)_2]_s$	497	170
Stratifié hybride = $[0_L/0_V/90_L/90_V]_s$	6080	260

Table 2: Caractéristiques mécaniques des stratifiés étudiés.

3.2 Identification des mécanismes d'endommagement des éprouvettes modèles

L'acquisition des salves d'émission acoustique (EA) est effectuée à l'aide du système MISTRAS (Euro Physical Acoustics). La chaîne de mesure inclue des pré-amplificateurs est donnée sur la figure 2.

L'étude proposée porte d'abord sur la discrimination des signaux d'EA, des mécanismes d'endommagement. Les essais de traction sont menés tout d'abord sur les éprouvettes modèles du matériau éco-composites unidirectionnel.

La distribution d'amplitudes des salves d'EA en fonction du temps au cours de l'essai en traction sur l'éprouvette modèle 1 (éprouvette sollicitée dans le sens perpendiculaire aux fibres), est représentée sur la figure 5.

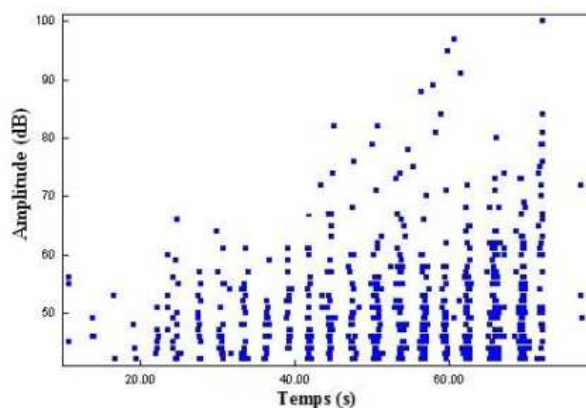


Figure 5: Essais de traction sur une éprouvette sollicitée à 90° : distribution d'amplitude des salves d'EA au cours de l'essai.

Cette figure montre une grande répartition d'événements d'EA au cours du temps, avec une forte augmentation à la fin de l'essai, correspondant à la rupture de l'éprouvette.

Par la suite, nous nous sommes servis des enregistrements de l'EA obtenus au cours de l'essai pour identifier les différents mécanismes d'endommagement en adoptant une classification à partir du logiciel « Noesis » suivant une sélection de cinq paramètres les plus pertinents: amplitude, énergie, temps de montée, durée et nombre de coups. Le résultat de cette analyse est reporté dans la figure 6. Cette figure présente la distribution en amplitude de chaque signaux acoustiques recueillis au cours de l'essai.

Cette classification multivariable a permis d'identifier deux modes d'endommagement dans ce type de matériau qui sont :

- la fissurations matricielles avec une amplitude comprise entre 42 et 60 dB, un temps de montée moyen et une décroissance relativement lente après l'atteinte du pic de plus forte amplitude, indiquant un signal « résonnant » (signal de type A).
- la décohésion fibre-matrice avec une amplitude au dessus de 60dB et marquée par un temps de montée court (signal de type B).

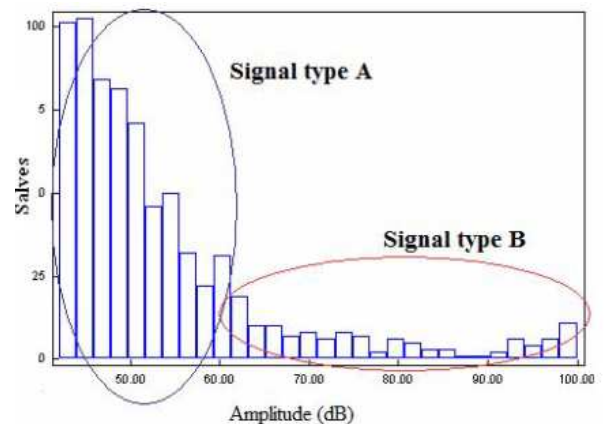


Figure 6: Distribution en amplitude des deux signaux A et B

La figure 7. donne la chronologie d'apparition des deux modes d'endommagement. La fissuration matricielle représente 80% des salves d'EA alors que la décohésion ne représente que 20% est apparaît dès le début de l'essai. La chronologie d'apparition des différents types d'endommagement montre que les micro-fissurations matricielles sont les mécanismes d'endommagement les plus distingués au cours des essais de traction de ce type de matériau.

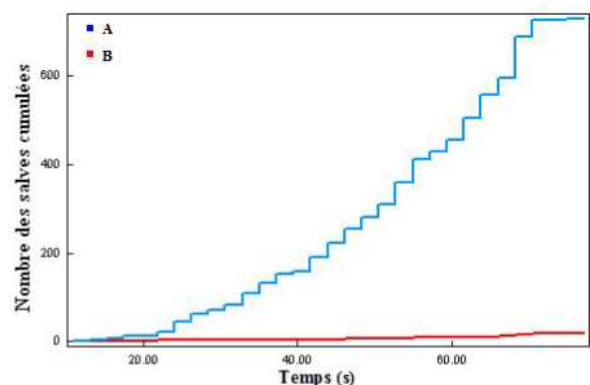


Figure 7: Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagements.

La distribution d'amplitudes des salves d'EA en fonction du temps au cours de l'essai en traction sur l'éprouvette modèle 2 (éprouvette sollicitée à 45° par rapport à l'axe des fibres), est représentée sur la figure 8. On remarque que la répartition d'événements d'EA au cours du temps est plus importante que dans l'éprouvette modèle 1 (éprouvette sollicitée à 90°). La direction de sollicitation de 45° par rapport à l'axe des fibres est une direction qui privilégie le cisaillement, c'est pourquoi l'endommagement interfacial doit être prépondérant lors de cet essai. Ce type d'essai a été choisi dans ce but.

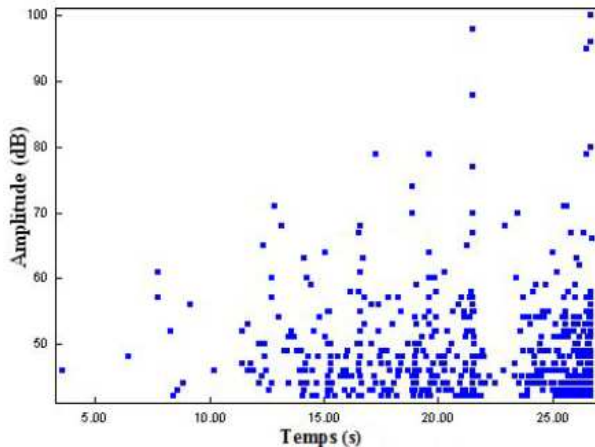


Figure 8: Essais de traction sur une éprouvette sollicitée à 45° : distribution d'amplitude des salves d'EA au cours de l'essai

La classification multivariable a permis d'identifier là aussi deux modes d'endommagement dans ce type d'éprouvette qui sont: la fissuration matricielle (signal de type A) et la décohésion interfaciale (signal de type B). La chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement est présentée dans figure 9. Cette figure montre que les microfissurations matricielles sont prépondérantes, elles apparaissent dès le début de l'essai et correspondent à 90% des signaux d'EA alors que les décohésions interfaciales interviennent en fin d'essai et leur nombre croît jusqu'à la rupture de l'éprouvette et ne représentent que 10% des événements d'EA.

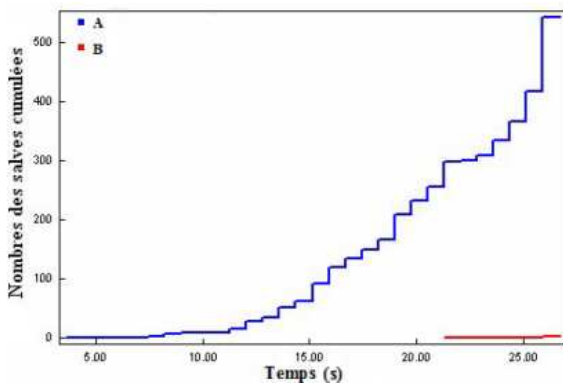


Figure 9: Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement.

La distribution d'amplitudes des salves d'EA en fonction du temps au cours de l'essai en traction sur l'éprouvette modèle 3 (éprouvette sollicitée suivant l'axe des fibres), est représentée sur la figure 10.

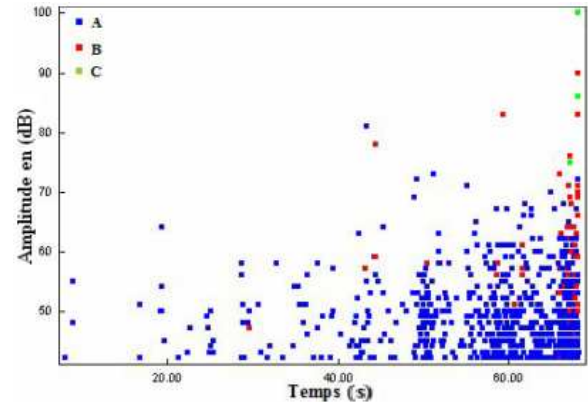


Figure 10: Essais de traction sur une éprouvette sollicitée à 0° : distribution d'amplitude des salves d'EA au cours de l'essai

La distribution en amplitude des signaux obtenus en fonction du temps met en évidence trois populations distinctes, la première avec une amplitude variant de 42 à 60 dB est de type A, celle comprise entre de 60 et 70 dB est de type B et celle au de au dessus de 70 dB est de type C.

Cette classification nous a permis de détecter trois modes d'endommagement qui sont:

- la fissuration matricielle (signal type A) avec un pourcentage de 80% des signaux d'EA,
- la décohésion interfaciale (signal type B) représente 15% des signaux d'EA,
- la rupture des fibres (signal type C) correspond à 5% des signaux d'EA.

La chronologie d'apparition des trois types d'endommagement est présentée en figure 11. Cette figure montre que la fissuration de la matrice est prépondérante et continue à se multiplier après la décohésion et la rupture des fibres.

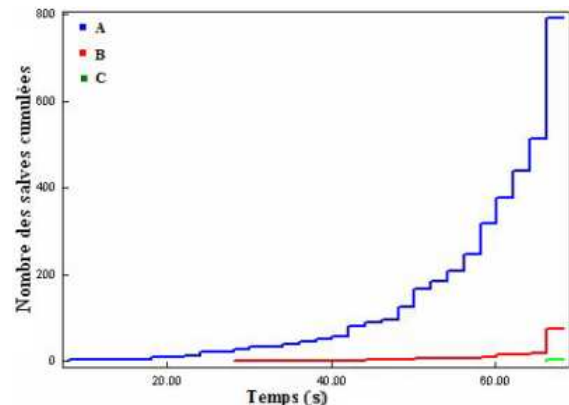
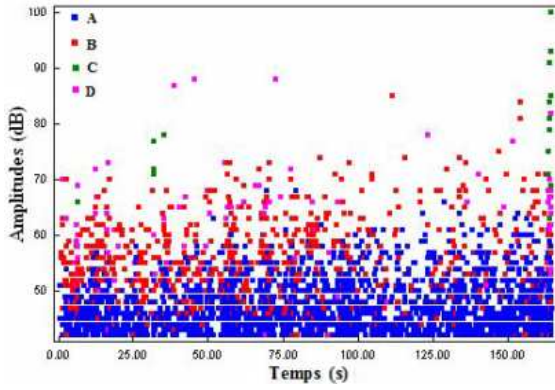


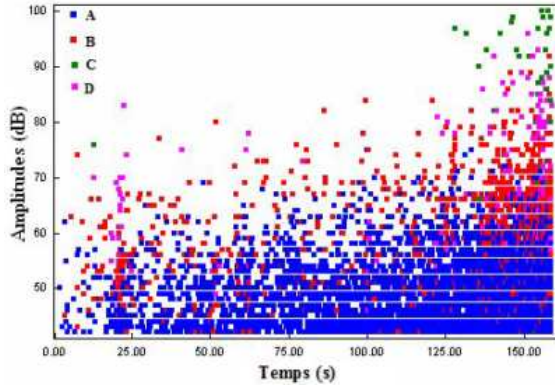
Figure 11: Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement.

3.3 Identification des mécanismes d'endommagement des éprouvettes en éco-composites stratifiés

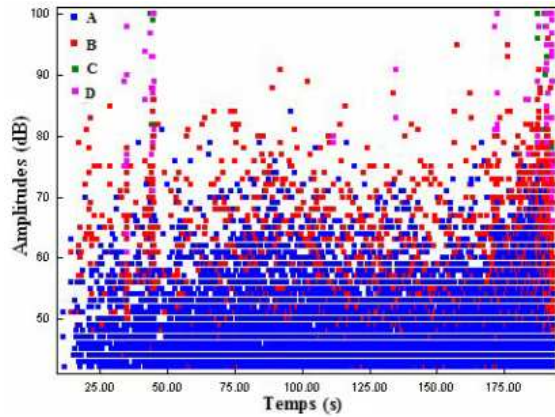
Les figures 12 représentent les courbes de distribution en amplitude des salves reçues en fonction du temps lors des essais de traction des deux stratifiés croisés $[0_2/90_2]_s$, $[(0/90)_2]_s$ et du stratifié hybride $[0_L|0_v|90_L|90_v]_s$. A la différence des essais sur les composites unidirectionnels, les modes d'endommagement attendus ici sont plus nombreux. En plus de la fissuration matricielle et de la décohésion fibre/matrice, le délaminage inter-plis et probablement des ruptures de fibres surviennent.



(a)



(b)



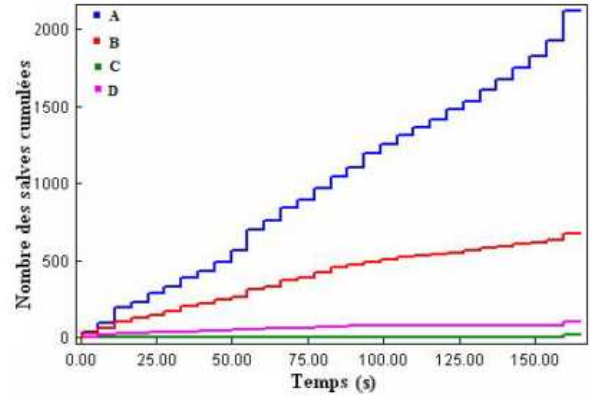
(c)

Figure 12: Distribution d'amplitude des salves d'EA au cours des essais : a) stratifié $[(0/90)_2]_s$, b) stratifié $[0_2/90_2]_s$, c) stratifié hybride $[0_L|0_v|90_L|90_v]_s$

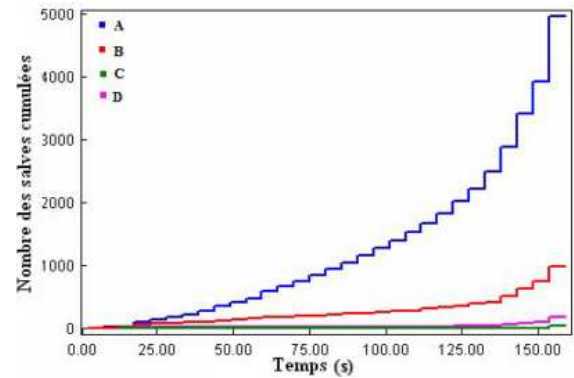
Comme le montre la figure 12, les amplitudes des signaux sont principalement comprises entre 42dB et 60dB. Une seconde gamme semble se dessiner entre 60dB et 70dB. Très peu de signaux, hormis avant la rupture des fibres de gamme (70 – 80dB). Pour ces essais, comme dans le cas du composite unidirectionnel, les deux types de signaux A et B ont été observés. Un nouveau type de signal a également été observé avant la rupture de fibre (type C). Ces signaux auront la référence type D.

La figure 12c montre que la répartition d'événements d'EA au cours du temps et très importante dans le stratifié hybride $[0_L|0_v|90_L|90_v]_s$ par rapport aux deux autres stratifiés $[0_2/90_2]_s$ et $[(0/90)_2]_s$.

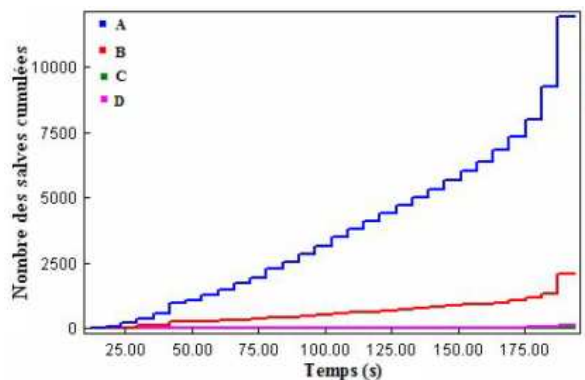
La chronologie d'apparition des quatre types d'endommagement est présentée sur les figures 13. Trois mécanismes d'endommagement apparaissent dès le début des essais ces endommagements se propagent ensuite le long des fibres sous forme de fissures intralaminaires et se développent dans les plis adjacents ou à l'interface de ces plis, provoquant ainsi la rupture des stratifiés par délaminage (type D). Ce résultats montre aussi que la fissuration de matrice reste prépondérante et continue à se développée après la décohésion, le délaminage et la rupture des fibres. Les signaux de type A et B sont toujours majoritaires par rapport aux signaux de types C et D.



(a)



(b)



(c)

Figure 13: Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement: a) stratifié $[(0/90)_2]_s$, b) stratifié $[0_2/90_2]_s$, c) stratifié hybride $[0_L|0_v|90_L|90_v]_s$

4 Conclusion

L'objectif principal du travail était l'analyse par émission acoustique des mécanismes d'endommagement et de la rupture des matériaux composites à base de fibres de lin et à matrice époxyde dit « éco-composites ».

Les résultats des essais statique a montré dans un premier temps que le comportement mécanique de ces stratifiés est pratiquement linéaire jusqu'à la rupture des éprouvettes qui est de type fragile. Les propriétés mécaniques du stratifié hybrides $[0_L/0_v/90_L/90_v]_s$ sont plus élevées que celles des stratifiés $[0_2/90_2]_s$ et $[(0/90)_2]_s$. Il semble que la présence de fibres de verre augmente les propriétés mécaniques du composite. On n'a jamais rencontré d'explosion de l'éprouvette sous l'action d'une rupture collective de fibres. En ce sens, le comportement du lin est différent de celui du carbone ou du verre.

Plusieurs études ont été effectuées dans l'utilisation de la méthode des EA pour déterminer les mécanismes d'endommagement des composites traditionnels de polymères renforcés par fibres de verre, fibres carbone ou fibres d'aramides. Très peu d'études sur les mécanismes d'endommagement des composites renforcés avec des fibres naturelles sont disponibles dans la littérature. La méthode de classification k-moyenne a été appliquée à des résultats des matériaux éco-composites de type lin/époxyde. Cette méthode est d'abord utilisée pour des matériaux modèles bien connus tels que les composites unidirectionnels orientés à 0° , 45° et 90° afin d'être validée. Ensuite des matériaux plus complexes ont été étudiés, tels que des stratifiés à séquences d'empilement différentes $[0_2/90_2]_s$ et $[(0/90)_2]_s$ et hybrides $[0_L/0_v/90_L/90_v]_s$. Ces matériaux sont soumis à des essais de traction simples. L'analyse des données d'EA lors des essais a permis d'identifier les signatures acoustiques de la fissuration matriciel, de la décohésion interfaciale, le délaminage et de la rupture des fibres au sein des matériau étudiés. Le suivi de ces différents mécanismes au cours de essais de traction en statique a permis par la suite d'identifier ceux les plus critiques menant à la rupture des matériaux.

Références

- [1] C. Baley et B. Lamy, "Propriétés mécaniques des fibres de lin utilisées comme renforts de matériaux composites", *Revue des composites et des matériaux avancés*, 10, pp. 7-24, (2000).
- [2] F. Lagattu, Q. T. Lam, J. Brillaud et J. Barbier, "Renforcement des polymères par des fibres végétales", *Journée scientifique et technique AMAC*, (2006).
- [3] D. Sedan, "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite", *phD*, novembre (2007).
- [4] A. Marec, "contrôle de santé des matériaux hétérogènes par émission acoustique non linéaire: discrimination des mécanismes d'endommagement et estimation de la durée de vie restante", *phD*, (2008).
- [5] B.-A. Acha, N.-E. Marcovich et J. Karger-Kocsis, "Biodegradable jute cloth reinforced thermoplastic copolyester composites: fracture and failure behaviour.", *Plast Rubber Composites*, n35(2), p. 73-82, (2006).
- [6] O. Chen., P. Karandikar, N. Takeda et T. Kishi, "Acoustic emission characterization of a glass-matrix composites". *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol.8-9, pp.869-878, (1992).
- [7] S. T. Kim, Y. Lee, "Characteristics of damage and fracture process of carbon fiberreinforced plastic under loading-unloading test by using AE method", *Materials Science and Engineering*, vol. A234-236, pp. 322-326, (1997).
- [8] G. Kotsikos, J. T. Evans, A. Gibson et J. Hale, "Use of acoustic emission to characterize corrosion fatigue damage accumulation in glass fiber reinforced polyester laminates", *Polymer Composites*, vol.20,n° 5, pp. 689-696, (1999).
- [9] O. Ceysson, M. Salvia, L. Vincent, "Damage mechanisms characterisation of carbon fibre/epoxy composite laminates by both electrical resistance measurements and acoustic emission analysis", *Scripta Materialia*, vol.34, n° 8, pp. 1273-1280, (1996).
- [10] M. L. Benzeggagh, S. Barre, B. Echalié et R. Jacquemet, "Etude de l'endommagement de matériaux composites à fibres courtes et à matrice thermoplastique", *AMAC Journées Nationales Composites*, Paris, vol. 8, pp.703-714, (1992).
- [11] D. Scida, Z. Aboura et 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).
- [12] A. Proust et J. C. Lenain, "Utilisation de logiciel de reconnaissance de forme pour l'interprétation des signaux d'EA lors de suivi d'endommagement", *St Etienne*, (1997).
- [13] S. Huguet, "Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère", *phD* (2002).
- [14] C. Poilâne, A. Vivet, L. Momayez, B. Ben Doudou, M. Ayachi, et J. Chen, "Propriétés mécaniques de préimprégnés lin/époxyde Mechanical properties of flax/epoxy industrial prepregs", *AMAC Journées Nationales Composites*, Toulouse, (2009).