

## ***Evaluation des mécanismes d'endommagement dans les stratifiés verre/époxy par émission acoustique***

### ***Evaluation of damage mechanisms in glass/epoxy laminates using the acoustic emission technique***

**Walid Roundi<sup>1</sup>, Abderrahim El Mahi<sup>2</sup>, Abdellah El Gharad<sup>1</sup>, Jean-Luc Rebiere<sup>2</sup>**

1 : Laboratoire Marocain de l'Innovation et de la Performance Industrielle (LaMPI)  
Ecole Normale Supérieure de L'Enseignement Technique de Rabat (ENSET)  
Université Mohammed V Rabat, Maroc  
e-mail : [roundi.walid@gmail.com](mailto:roundi.walid@gmail.com)

2 : Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM) UMR CNRS 6613  
Le Mans Université, Av. Olivier Messiaen  
72 085 Le Mans cedex 9, France  
e-mail : [jean-luc.rebiere@univ-lemans.fr](mailto:jean-luc.rebiere@univ-lemans.fr)

#### **Résumé**

Le présent travail est consacré à l'évaluation et l'identification par émission acoustique des mécanismes d'endommagement dans les stratifiés verre/époxy. Les éprouvettes ont été sollicitées en traction statique et cyclique afin de suivre les différents modes d'endommagement dans le temps et de détecter ceux les plus critiques conduisant à la rupture totale des échantillons. L'endommagement se manifeste par la fissuration matricielle, la décohésion inter-plis, le délaminage et la rupture des fibres. Les signaux acoustiques collectés au cours des essais ont été analysés par une méthode de classification composée de la méthode de k-moyennes et d'une analyse en composantes principales (ACP).

#### **Abstract**

This present work is devoted to the evaluation and identification by acoustic emission of the damage mechanisms in glass/epoxy composite laminates. The tested specimens were subjected to static and cyclic tensile stress in order to follow the propagation of the various modes of damage over time and to detect the most critical ones leading to the total rupture of the tested samples. Damage is manifested by matrix cracking, inter-ply debonding, delamination and fiber breakage. The acoustic signals collected during the experimental tests were analysed by a classification method consisting of the k-means method and principal component analysis (PCA).

**Mots Clés :** Emission Acoustique, Fatigue, séquence d'empilement, Composite, Endommagement.

**Keywords :** Acoustic emission, Fatigue, Stacking sequence, Composite, Damage.

## **1. Introduction**

Les différentes techniques de caractérisation et d'identification jouent un rôle essentiel dans l'étude des phénomènes physique impliqués dans l'évolution des matériaux et des systèmes en général. Le choix de la technique à mettre en œuvre pour étudier un système est principalement lié au type de phénomène à caractériser. L'utilisation de l'émission acoustique (EA) dans le domaine des matériaux composites a permis une très nette avancée dans la compréhension de leur comportement à l'endommagement et à la rupture [1-4]. Cette méthode est capable, entre autres, de juger l'intégrité de la structure en service, d'étudier des mécanismes de rupture et prévoir la durée de vie des matériaux. Ativitavas et al [5] ont étudié l'endommagement des matériaux stratifiés constitués d'une matrice plastique renforcée par des fibres de verre unidirectionnelles soumis à des essais de traction. L'analyse de l'amplitude et de l'énergie des signaux acoustiques couplées à des observations micrographiques à différents stades au cours des essais ont montré l'apparition de quatre modes d'endommagements. Ono et al. [6] ont étudié les signaux d'EA collectés lors d'essais sur des composites carbone/époxy unidirectionnels, à plis croisés et à fibres courtes dispersées, ainsi que sur des stratifiés verre/époxy à plis croisés. Benzeggagh et al [7] ont étudié les mécanismes

d'endommagements des matériaux composites à fibres de verre et à matrice polypropylène. Ces matériaux sont sollicités en traction en statique et en fatigue. L'analyse des amplitudes des signaux d'émission acoustique montre l'apparition de quatre modes d'endommagements qui sont : la fissuration matricielle avec des signaux d'EA d'amplitude comprise entre 40 et 55 dB, décohésions avec des signaux d'EA d'amplitude variant de 60 et 65 dB, délaminage dont l'amplitude des signaux est comprise entre 65 à 85 dB et enfin la rupture des fibres avec des signaux d'amplitude au delà de 85 dB. Dans ce cadre, le présent travail est consacré à l'évaluation et l'identification par émission acoustique des mécanismes d'endommagement dans les stratifiés verre/époxy. Les éprouvettes ont été sollicitées en traction statique et cyclique afin de suivre les différents modes d'endommagement dans le temps, et de détecter ceux les plus critiques conduisant à la rupture totale des échantillons. L'endommagement se manifeste par la fissuration matricielle, la décohésion inter-plis, le délaminage et la rupture des fibres. Les signaux acoustiques collectés au cours des essais ont été analysés par une méthode de classification composée de la méthode de k-moyennes et d'une analyse en composantes principales (ACP).

## 2. Mise en œuvre

Les composites étudiés durant ce travail sont mis en œuvre en utilisant des fibres stratifiées avec des séquences d'empilement de  $([0_2/90_2]_s ; [90_2/0_2]_s)$ . Les renforts sont constitués par des fibres de verre de densité surfacique de  $300 \text{ g m}^{-2}$ , la résine époxyde est de type SR1500. Les composites étudiés ont été réalisés par moulage sous vide, par la technique dite du "sac".

Les différents plis sont positionnés manuellement selon la séquence désirée. Les couches sont imprégnées de résine à température ambiante à l'aide d'un rouleau ou d'un pinceau, puis moulées sous vide entre le moule et le contre moule après interposition de divers tissus de moulage. L'ensemble est placé dans un sac étanche, sous vide avec une pression de 0,7 bar pendant 10 heures. La résine sera drainée jusqu'à l'extrémité du moule et aspirée vers les canaux de vide. La découpe des plaques selon la géométrie des éprouvettes est réalisée avec une tronçonneuse à disque diamanté. La fabrication de ces matériaux est réalisée au sein du laboratoire (LAUM). Le dosage utilisé est de 50% du taux de fibres de verre de densité  $300 \text{ g/m}^2$  et de 50% du taux de résine époxyde de type SR1500.

La technique à vide (ou du "sac") permet la mise en œuvre des composites de meilleure qualité qu'avec le moulage au contact, le taux de fibre est alors plus élevé puisque l'excès de résine est aspiré par la dépression créée lors de la mise sous vide. La géométrie de l'éprouvette de traction est donnée sur la Figure 1. Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre et de la résine époxyde utilisées durant cette étude sont présentées sur les tableaux 1 et 2.

Fibre de verre	
Densité surfacique ( $\text{g/m}^2$ )	300
Contrainte à la rupture (MPa)	2500
Coefficient de Poisson	0,25
Déformation à la rupture (%)	4,8
Module de traction (GPa)	74
Module de cisaillement (GPa)	30

Tab. 1. Propriétés mécaniques de la fibre de verre

Résine époxyde	
Module de Young (MPa)	2900 à 3200
Résistance en traction (MPa)	74 à 77
Résistance en flexion (MPa)	115 à 120

Tab. 2. Propriétés mécaniques de la résine

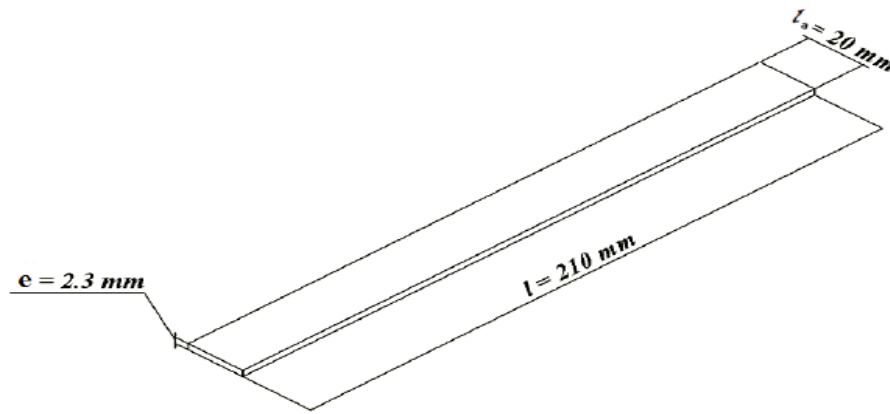


Fig. 1. Géométrie des éprouvettes

### 3. Dispositif expérimental

Les essais en statique et en fatigue sont effectués sur une machine d'essais hydraulique universelle de type INSTRON 8516, avec une capacité de 100 kN. Le déplacement de l'éprouvette suivant sa longueur est mesurée à l'aide d'un capteur de déplacement (LVDT) et la charge est mesurée à l'aide d'une cellule de force. La déformation est mesurée à l'aide d'un extensomètre. Le pilotage et l'acquisition se font par ordinateur. Les essais statiques ont été effectués en imposant un signal de déplacement avec une vitesse d'essai de 1 mm/min. Les essais de fatigue ont été effectués en utilisant une forme d'onde sinusoïdale avec un signal de charge d'une fréquence de 10 Hz. Tous les essais de fatigue ont été effectués jusqu'à la rupture totale des éprouvettes. Le suivi de l'évolution de l'endommagement au cours des essais est réalisé à l'aide de la méthode de l'émission acoustique avec un système d'acquisition (EPA) comprenant 6 voies sous une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz. Ce système est composé d'une carte d'acquisition PCI connectée à un micro-ordinateur. Les signaux sont captés et enregistrés par l'intermédiaire d'un capteur différentiel piézoélectrique de type Micro-80, de bande passante 100 kHz – 1 MHz et de 10 mm de diamètre, positionné sur les éprouvettes avec une graisse silicone permettant la localisation des sources d'endommagement. Par la suite ces signaux sont amplifiés par un préamplificateur avec un gain de 40 dB, puis convertis par la carte PCI pour les numériser et de procéder à l'extraction des paramètres d'émission acoustique (EA). Les données acquises durant les essais sont transmises et affichées en temps réel sur un micro-ordinateur. Le lancement des essais et l'acquisition sont assurés grâce à un logiciel d'acquisition (AEWIN MISTRAS), le logiciel de traitement de données utilisé est NOESIS. La Figure 2 représente une vue d'ensemble du dispositif de l'EA. La classification des différents signaux enregistrés durant les essais est assurée en appliquant l'algorithme des k-moyennes qui est couramment utilisé en analyse de données. Il permet de partitionner une collection d'objets en k classes, k étant un nombre fixé par l'utilisateur. Le nombre de classes est optimisé en prenant la valeur minimale du facteur  $R_{DB}$  [8] par balayage d'un nombre de classes dans une gamme allant de 2 à 5 avec 30 itérations.

On obtient la valeur du nombre de classes en se basant sur la plus faible valeur du coefficient de Davies et Bouldin  $R_{DB}$  qui est défini comme suit:

$$R_{DB} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max \left( \frac{d_i + d_j}{d_{ij}} \right) \quad (1)$$

Où  $k$ ,  $d_i$ ,  $d_j$  et  $d_{ij}$  sont respectivement, le nombre de classes, la distance moyenne dans la classe  $i$ , la distance moyenne dans la classe  $j$  et la distance moyenne entre les classes  $i$  et  $j$ .

La méthode des k-moyennes utilisée durant la classification est basée sur cinq paramètres qui sont l’amplitude, l’énergie, le temps de montée, la durée et le nombre de coups. Afin de pouvoir relier les classes de signaux obtenues aux mécanismes d’endommagement des stratifiés à fibres de verre/résine époxy, les caractéristiques des formes de chaque classe sont prises en compte [9-11].

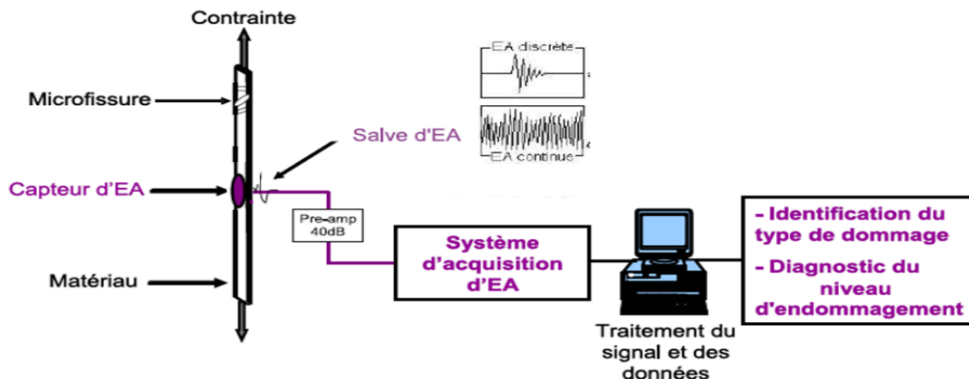


Fig.2. Dispositif expérimental

#### 4. Résultats et discussions

Durant cette partie notre contribution consiste à analyser les événements détectés par émission acoustique (EA), identifier les signatures acoustiques de chaque mécanisme d’endommagement intervenant dans les matériaux, et suivre l’évolution des différents types d’endommagement au cours des essais de traction statique et cyclique sur des composites en verre/époxy (Figure 3). L’analyse est menée en utilisant des échantillons avec différentes séquences d’empilements  $([0_2/90_2]_s, [90_2/0_2]_s)$  sous une vitesse d’essai de 1 mm/min pour comparer et identifier les mécanismes les plus critiques provoquant la rupture finale de chaque type de stratifié.

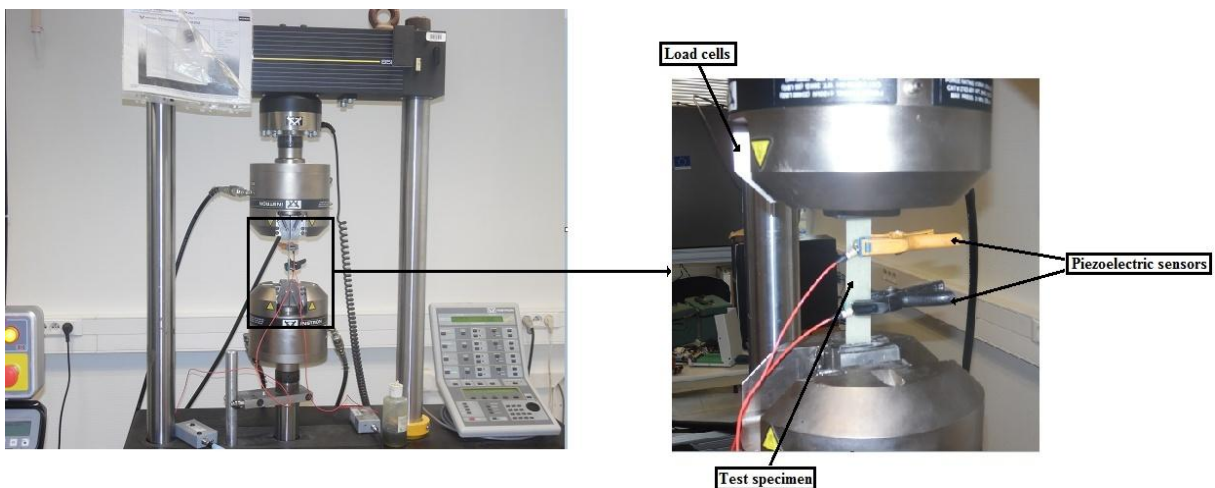


Fig.3. Dispositif expérimental d’un essai de traction associé à l’émission acoustique

##### 4.1 Suivre des activités acoustiques durant les essais statiques

Pour les matériaux stratifiés verre/époxy étudiés, et selon le facteur  $R_{DB}$ , la classification des signaux d’émission acoustique (EA) met en évidence la présence de quatre classes pour les composites stratifiés  $[0_2/90_2]_s$  et  $[90_2/0_2]_s$  (Figure 4). La Figure 5 illustre l’évolution de la charge en fonction du temps, associée à l’activité acoustique au cours du chargement. Les signaux acquis durant les essais statiques ont des amplitudes comprises entre 45 dB et 100 dB. L’analyse des résultats obtenus pour les différentes séquences d’empilement montre que l’évolution de la charge et l’activité acoustique se déroulent suivant trois phases:

- Une première phase de faible activité acoustique, jusqu'à une valeur de charge qui varie selon la séquence d'empilement.
- Une deuxième phase où l'activité acoustique s'intensifie régulièrement jusqu'à 90% de la charge à la rupture. Elle est caractérisée par des signaux avec des amplitudes assez élevées (entre 60 et 85 dB).
- Une troisième phase juste avant la rupture finale des éprouvettes où l'activité acoustique devient importante. Les signaux enregistrés durant cette phase ont des amplitudes très élevées (entre 85 et 100 dB).

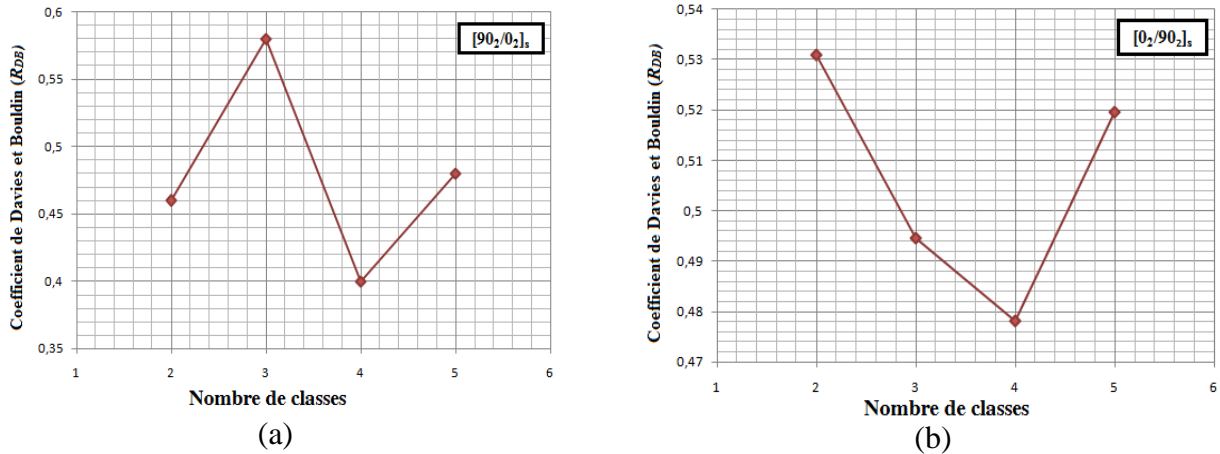


Fig.4. Critère de Davies et Bouldin en fonction du nombre de classes : a)  $[90_2/0_2]_s$ , b)  $[0_2/90_2]_s$

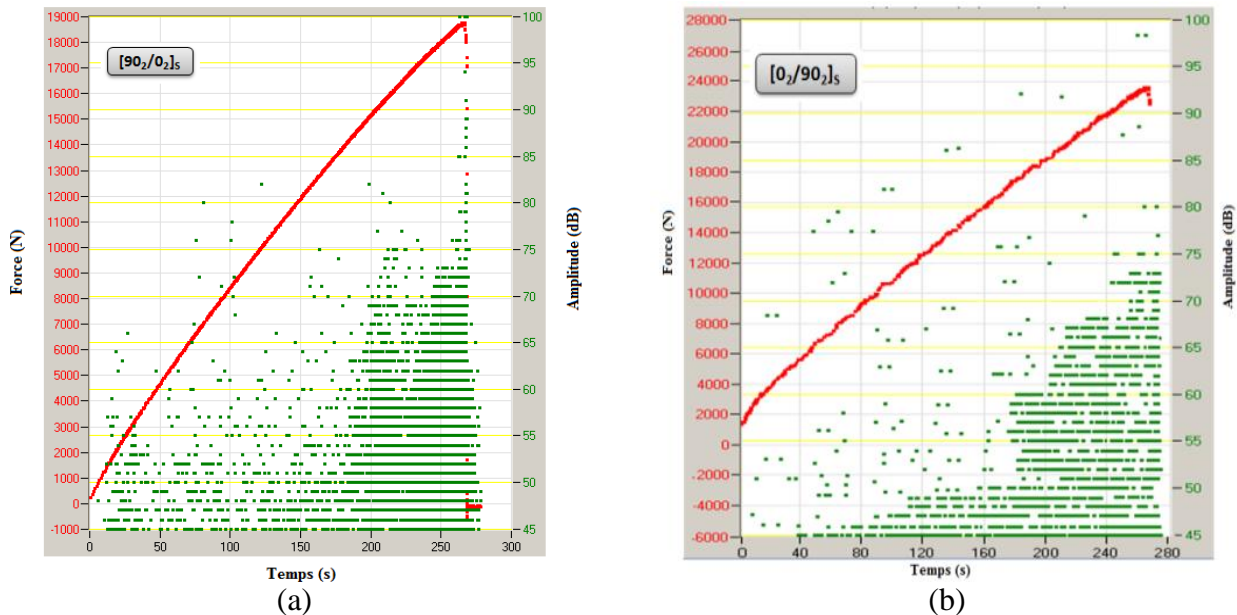


Fig.5. Evolution de la charge et l'amplitude en fonction du temps : a)  $[90_2/0_2]_s$ , b)  $[0_2/90_2]_s$

#### 4.2 Suivre des activités acoustiques durant les essais cycliques

Cette partie consiste à identifier par la méthode d'émission acoustique les mécanismes d'endommagement du composite verre/époxy au cours des essais cycliques. L'analyse des activités acoustiques collectées a permis de suivre les différents mécanismes d'endommagement (la fissuration matricielle, la décohésion, le délaminage et la rupture fibres) au cours de l'essai de fatigue. Les éprouvettes ont été testées jusqu'à la rupture sous une forme d'onde sinusoïdale d'une fréquence de 10Hz et un niveau de chargement  $r = 50\%$ .

#### 4.2.1 La distribution d'amplitude en fonction du temps durant les essais cycliques

La classification des signaux d'émission acoustique (EA) recueillis est reportée sur la Figure 6. Il est constaté que l'activité acoustique au cours des essais, se déroule en 4 phases :

- Phase I: Cette première phase correspond au chargement statique permettant d'atteindre la valeur moyenne appliquée en fatigue. Le nombre des signaux acoustiques dans cette phase est très faible avec une gamme d'amplitude comprise entre 45 et 75 dB.
- Phase II: Durant cette phase, les événements acoustiques apparaissent dès les premiers cycles. Au cours de cette phase on remarque la présence de tous les modes d'endommagement dans tous les stratifiés, cependant la plupart de ces activités correspondent à l'initiation et la multiplication des microfissurations ainsi au délaminage entre les couches  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . Les signaux collectés en cours de cette phase ont des amplitudes comprises entre 45 et 100 dB.
- Phase III: L'activité acoustique dans cette phase redevient plus faible. Cette phase correspond à la propagation stable de la fissuration matricielle accompagnée de quelques autres modes d'endommagement. La fissuration matricielle est le mode d'endommagement le plus prépondérant.
- Phase IV: Durant cette phase on assiste à la rupture des éprouvettes, le nombre des salves redevient plus important. L'amplitude des signaux est comprise entre 45 et 100 dB pour tous les stratifiés. Cette phase correspond à la propagation rapide de la fissuration matricielle qui devient plus localisée entraînant d'autres modes d'endommagement. Durant cette phase le nombre des signaux dus à la rupture des fibres devient plus important.

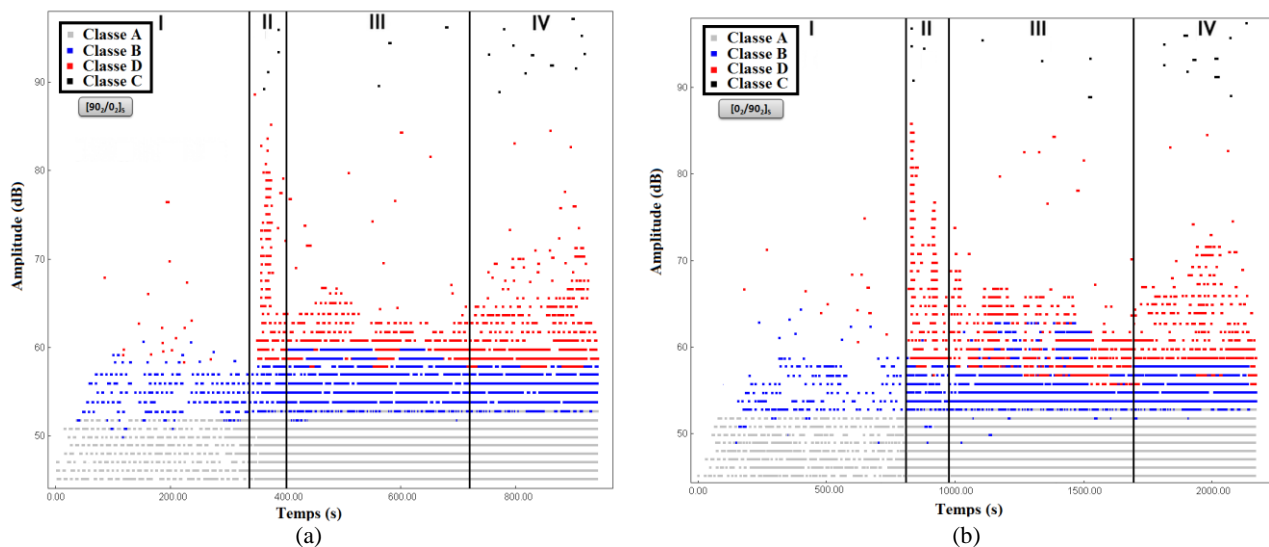


Fig. 6. Distribution de l'amplitude des signaux en fonction du temps en cours des essais cycliques : a)  $[90_2/0_2]_s$ , b)  $[0_2/90_2]_s$

#### 4.2.2 La chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement durant les essais cycliques

La chronologie d'apparition des différents types d'endommagement est illustrée sur la Fig 7. Il est observé que les microfissurations matricielles sont les mécanismes d'endommagement les plus dominant durant les essais de fatigue pour tous les séquences d'empilements étudiées. Alors que les décohésions d'interfaces commencent juste après et sont moins importantes. Le phénomène de délaminage représente le troisième mode d'endommagement qui apparaît, avec un nombre d'événements qui augmente continuellement jusqu'à la rupture de l'éprouvette. En fin d'essai, des ruptures de fibres apparaissent, ce qui conduit à la rupture totale des échantillons. Les signatures



acoustiques des différents types d'endommagements observés au cours des essais de fatigue sont semblables à celles observées au cours des essais de traction statique.

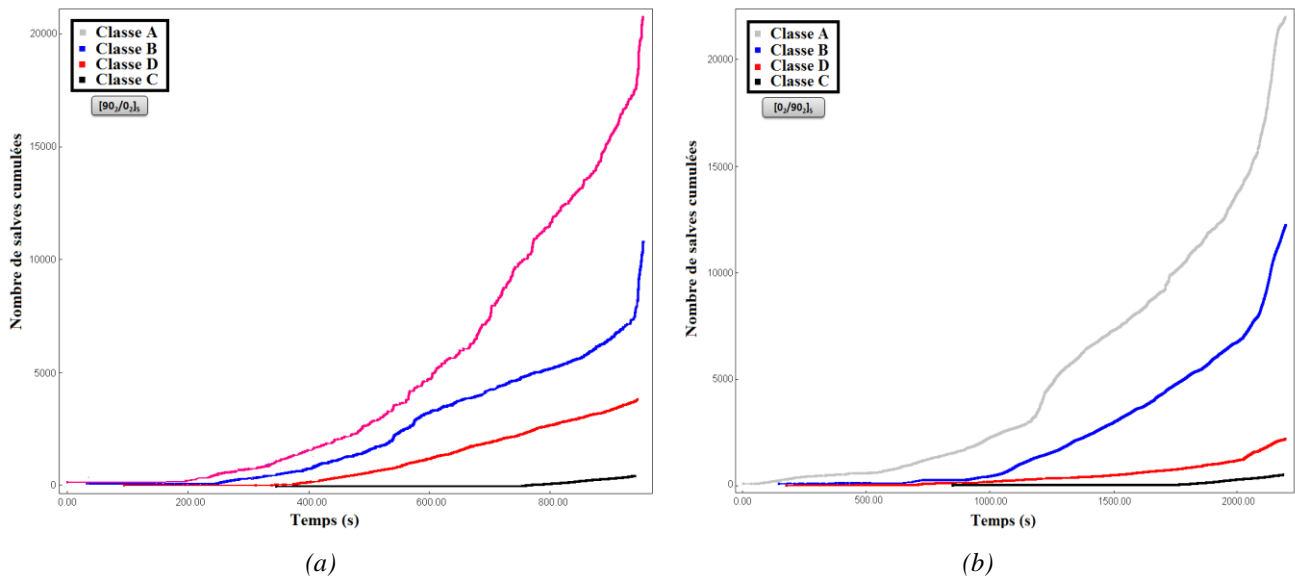


Figure .7. Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement au cours des essais de traction cyclique :  
a) : [90<sub>2</sub>/0<sub>2</sub>]<sub>s</sub>, b) : [0<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

## 5. Conclusions

L'étude des signaux d'émission acoustique (EA) à travers l'analyse statistique multi variable a permis d'identifier les principales signatures acoustiques des modes d'endommagement prépondérants dans les composites étudiés (fissuration matricielle, décohésions, délaminage, rupture des fibres). Les microfissurations matricielles sont les mécanismes d'endommagement les plus observés pour tous les stratifiés étudiés durant les essais statiques et cycliques. Alors que les décohésions qui commencent juste après sont moins importantes. Le phénomène de délaminage représente le troisième mode d'endommagement qui apparaît, avec un nombre d'événements qui augmente continuellement jusqu'à la rupture de l'éprouvette. En fin d'essai, des ruptures de fibres apparaissent ce qui conduit à la rupture totale des échantillons.

## Références

- [1] A.G. Beattie. Acoustic emission, principles and instrumentation, *Journal of acoustic emission*. 2(1), pp. 95-128, 1983.
- [2] W.Roundi , A. El Mahi, A. El Gharad , J-L. Rebiere. Acoustic emission monitoring of damage progression in glass/ epoxy composites during static and fatigue tensile tests, *Appl Acoust*, 132, pp. 124–134, 2018.
- [3] A. Marec. Contrôle de santé des matériaux hétérogènes par émission acoustique et acoustique non linéaire. Discrimination des mécanismes d'endommagement et estimation de la durée de vie restante. Thèse de doctorat, Université du Maine, Le Mans, France, 2008.
- [4] D.G. Eitzen, H.N.G. Wadley. Acoustic emission: establishing the fundamentals, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 89 (1), pp.75-100, 1984.
- [5] N. Ativitavas, T. Fowler, T. Pothisiri. Acoustic emission characteristics of pultruded fiber reinforced plastics under uniaxial tensile stress, *Proc. of European WG on AE*, pp.447-54, Berlin, 2004.
- [6] K. Ono K., Q. Huang. Pattern recognition analysis of acoustic emission signals, *Progress in Acoustic Emission VII, The Japanese Society for NDI*, pp.69-78, 1994.
- [7] M.L. Benzeggagh, S. Barre, B. Echalié, R. Jacquemet. Etude de l'endommagement de matériaux composites à fibres courtes et à matrice thermoplastique, *AMAC Journées Nationales Composites*, pp. 703–14, Paris, 1992.
- [8] DL. Davies, DW. Bouldin. A cluster separation measure, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1(2), pp 224–27, 1979.

- [9] 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*, 68(6), pp 1258–65, 2008.
- [10] 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.
- [11] S. Masmoudi. Comportement mécanique et caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré d'un matériau composite, Thèse de doctorat, Université du Maine, Le Mans, France, 2013.