



**HAL**  
open science

## Identification du dommage par EA de stratifiés composites chargés en statique et cyclique

Mounir Kharoubi, Louendi Fatmi, Abderrahim El Mahi, Rachid El Guerjouma, Rachid Berbaoui

► **To cite this version:**

Mounir Kharoubi, Louendi Fatmi, Abderrahim El Mahi, Rachid El Guerjouma, Rachid Berbaoui. Identification du dommage par EA de stratifiés composites chargés en statique et cyclique. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00539746

**HAL Id: hal-00539746**

**<https://hal.science/hal-00539746>**

Submitted on 25 Nov 2010

**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

## Identification du dommage par EA de stratifiés composites chargés en statique et cyclique

M. Kharoubi<sup>1</sup>, L. Fatmi<sup>1</sup>, A. El Mahi<sup>2</sup>, R. EL Guerjouma<sup>2</sup> & R. Berbaoui<sup>2</sup>

1 : Laboratoire de Mécanique et Structures, Université du 08 Mai 1945 BP 401, 24000, Guelma, Algérie,  
e-mail : mounirkharoubi@yahoo.fr, et f\_louendi@yahoo.fr,

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

Le présent travail a pour objet la caractérisation et le suivi de l'endommagement de matériaux composites stratifiés lors d'essais de traction statique en charge – décharge. Une méthode d'évaluation non destructive (Emission Acoustique) est utilisée. Les éprouvettes sont instrumentées par trois capteurs acoustiques. L'acquisition est faite à l'aide du logiciel AEwin et le traitement par le logiciel Noesis de la société EPA. La classification des signaux acoustiques est réalisée selon une méthode non supervisée multi variables à cinq descripteurs (temps de montée, nombre de coups, énergie, durée et amplitude). Le nombre de classes exactes est déterminé par la minimisation du coefficient Rij (Davies et Bouldin). Pour chaque type de chargement statique ou cyclique des matériaux étudiés trois types d'endommagements ont été discriminés rupture matricielle, décohésion fibre matrice et rupture de fibres en traction.

### 1 Introduction

L'envolée technologique du monde aéronautique et spatial pendant les années 60 est principalement le résultat de la mise au point de structures optimisées constituées de matériaux spécifiquement résistants appelés matériaux composites. Afin de garantir la fiabilité et la sécurité nécessaire dès le stade de la conception, d'importants efforts de recherche ont été entrepris sur des structures en composites, notamment l'endommagement causé par différents types de chargements (statiques et fatigues) ou couplé à des chargements accidentels (impacts) à des échelles différentes. On peut voir apparaître un endommagement diffus constitué de micro-décohésions et de micro-fissures, des ruptures de plis et du délaminage des stratifiés. La présente étude traite le suivi expérimental de l'endommagement des stratifiés lors de leur chargement en traction statique et cyclique par la technique de l'émission acoustique. Anastassopoulos, [3] a utilisé une classification non supervisée pour l'analyse et l'évaluation des données d'AE enregistrées, l'évaluation du nombre de classe a été fait au moyen des critères Rij et Tou. Benmedakhene, [1] a consacré son étude à l'effet de la vitesse sur l'initiation est la croissance du délaminage des matériaux composites en employant des approches de la mécanique de la rupture. Hochar, [6] a établi un modèle de comportement permettant de décrire les ruptures des composites stratifiés constitués de plis tissés pour des chargements statiques monotones et en fatigue. Morscher, [2] a présenté une approche traitant l'analyse de comportement en traction et l'accumulation de l'endommagement des composites en céramique. L'émission acoustique modale (EA) a été employée pour surveiller l'ampleur des dommages sur la courbe contrainte déformation obtenue par des essais de traction charge/décharge/recharge. Moevus, [8] a traité deux composites (M-E, M-S) et SiC[Si-B-c] donnant des

comportements mécaniques différents en traction pour des contraintes à la rupture semblables. Les courbes de boucles hystérésis mécanique contrainte-déformation sont analysées, La déformation du matériau M-E est deux fois celle de M-S et les boucles d'hystérésis sont plus ouvertes dans le cas M-E, bien que leurs constituants et les proportions sont presque identiques. Moevus, [9] a consacré sa deuxième partie au traitement des données d'émission acoustique. Le nombre optimal de classes k a été empiriquement déterminé en employant le critère de Davies et Bouldin.

### 2 Matériaux étudiés

Les matériaux étudiés sont des composites croisés fabriqués par moulage sous vide au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans, France. Ils sont stratifiés par l'empilement de 8 plis, renforcés de verre unidirectionnel UDV de masse surfacique 300 (g/m<sup>2</sup>) et de résine époxyde SR 1500 / SD 2505. Ces constituants sont fabriqués par la société SICOMIN. Les plis sont stratifiés et imprégnés à température ambiante, puis placés sous vide à dépression de 30 KPa pendant 8 heures entre le moule et le contre moule, suivie d'une polymérisation de 8 heures à 80°C dans un four électrique. La découpe est faite à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté. Nous présentons sur la table 1 les séquences d'empilements obtenues.

Désignation des matériaux	Séquence d'empilement
U	[(0)] <sub>8</sub>
C1	[(0/90) <sub>s</sub> ] <sub>2</sub>
C2	[(0/90) <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>
C3	[(0 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> )] <sub>s</sub>

Table 1 : Séquence d'empilement

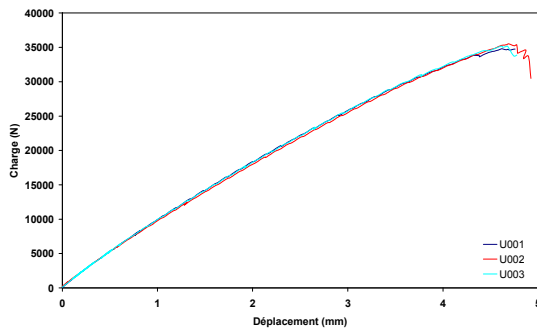
### 3 Essais statiques

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques des stratifiés considérés une série de testes en traction sur des éprouvettes de chaque empilement est effectuée. Les essais sont effectués sur machine de type INSTRON équipée d'une cellule de charge de 100 KN et pilotée par ordinateur. Les éprouvettes sont instrumentées de capteurs d'émission acoustique pour le suivi de l'évolution de l'endommagement des éprouvettes lors de leurs chargements voir figure 1.

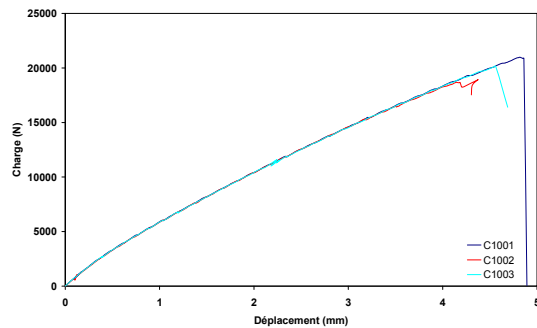


Figure 1 : Essai de traction instrumenté en capteurs d'émission acoustique.

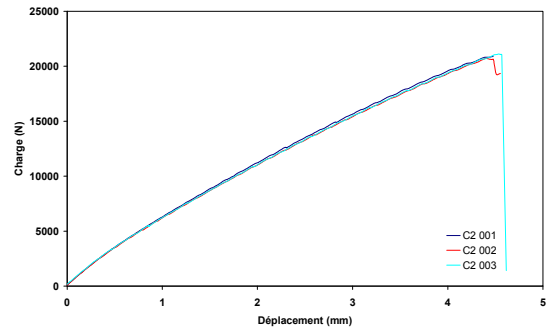
Trois éprouvettes ont été testées par séquence d'empilement, les courbes de comportement mécanique charge – déplacement sont reportées sur la figure 2.



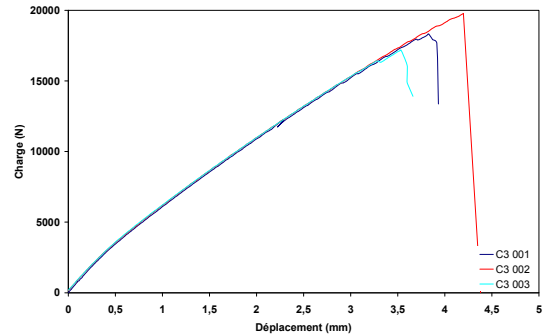
a) Matériau U : [(0)]<sub>8</sub>



b) Matériau C1 : [(0/90)s]<sub>2</sub>



c) Matériau C2 : [(0/90)<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

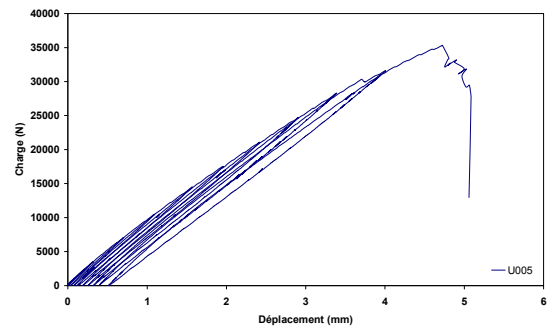


d) Matériau C3 : [(0<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>)]<sub>s</sub>

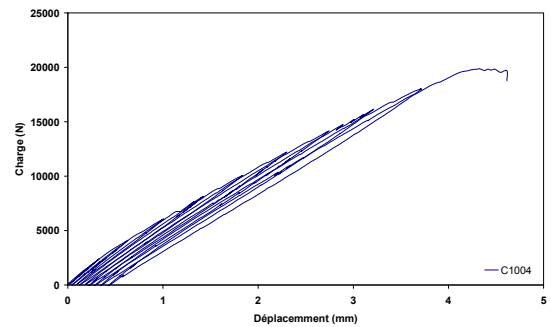
Figure 2 : Courbes de comportement en traction charge déplacement

### 4 Essais cycliques

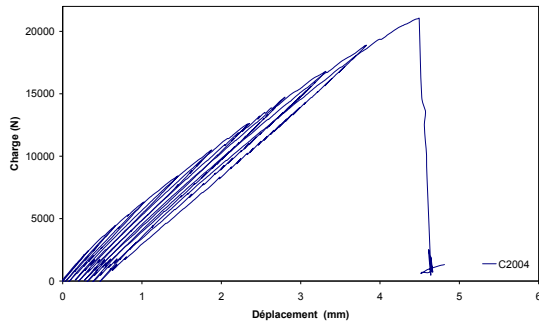
Les éprouvettes subissent un chargement croissant par palier de 10 % de la charge statique à la rupture, pour chaque palier un déchargement est appliqué jusqu'à la valeur zéro, seul le dernier cycle est maintenu jusqu'à rupture. Les courbes de comportement mécanique en charge - décharge sont représentées sur la figure 3.



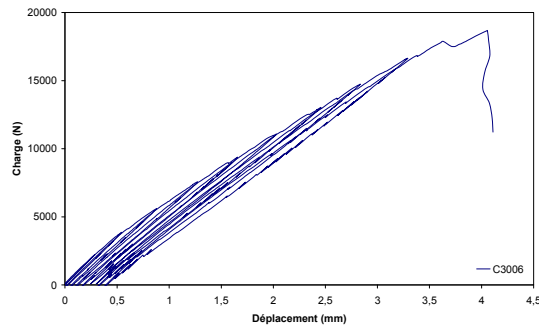
a) Charge décharge - déplacement



b) Charge décharge - déplacement



c) Charge décharge - déplacement

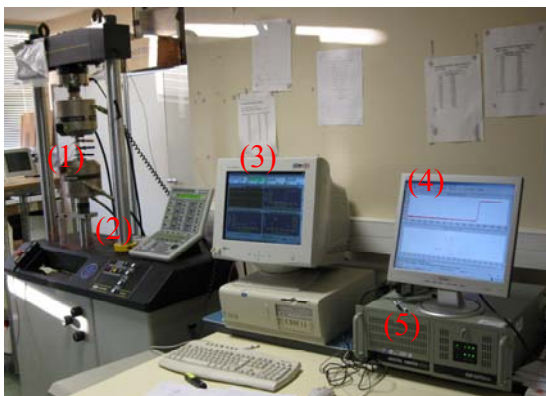


d) Charge décharge - déplacement

**Figure 3 :** Courbes de comportement charge - décharge déplacement

## 5 Emission acoustique

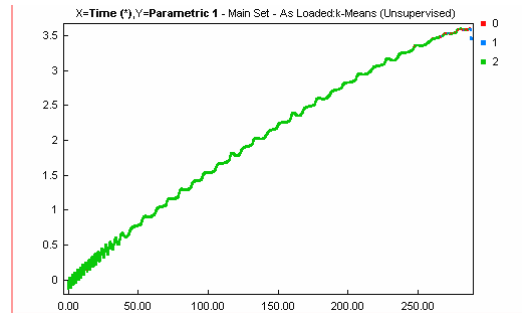
L'acquisition des signaux acoustiques est réalisée à l'aide d'une chaîne EPA. Ce système est composé d'une carte PCI-2 et d'un micro-ordinateur figure 4. Les signaux d'émission acoustique sont convertis par des capteurs différentiels piézoélectriques de type R10, résonnant à 250 KHz et de surface de contact de diamètre de 10 mm. Les signaux sont amplifiés par un préamplificateur avec 40 ou 60 dB de gains, dans une bande de fréquences de [175 à 1000 KHz]. Ils sont ensuite convertis par la carte PCI-2 qui les numérise et procède à l'extraction des paramètres d'émission acoustique. Les données issues des cartes sont transmises au micro-ordinateur, pour affichage en temps réel, l'acquisition est faite à l'aide du logiciel AEwin. Le stockage et le post-traitement sont fait à l'aide du logiciel NOESIS selon une méthode de classification multiparamétrique non supervisée K means.



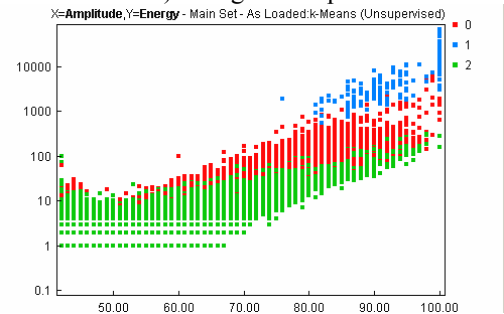
(1) Eprouvette instrumentée en capteurs d'EA  
 (2) Préamplificateur (3) Acquisition des données d'essai  
 (4) Acquisition d'EA avec AEwin (5) Chaîne d'acquisition d'EA  
**Figure 4 :** Banc d'essais et acquisition des signaux acoustiques.

### 5. 1 Application de l'EA aux essais statiques

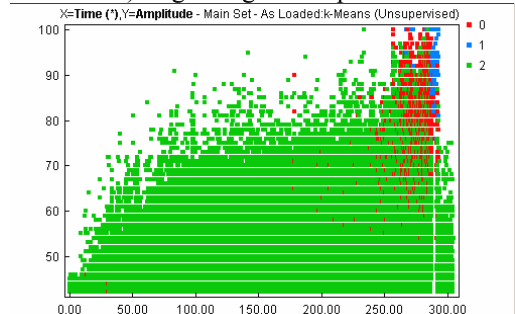
Le traitement des signaux acoustiques est réalisé à l'aide du logiciel Noesis, en utilisant la méthode non supervisée des K-means. Le nombre de classes est optimisé en prenant la valeur minimale du facteur Rij [3] par balayage d'un nombre de classes dans une gamme allant de 2 à 5. A titre indicatif seuls les résultats des empilements U et C3 sont présentés sur la figure 5.



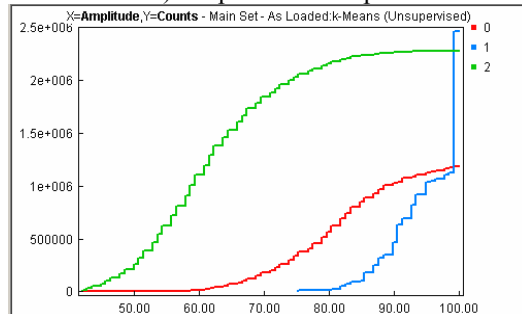
a) Charge - Temps



b) Log Energie - Amplitude

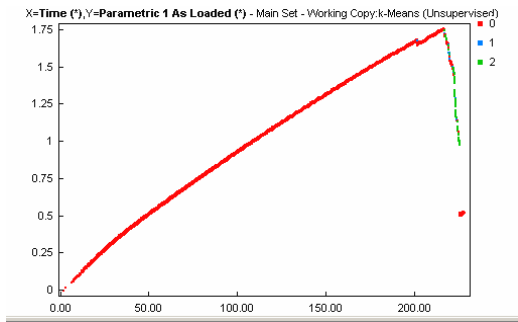


c) Amplitude - Temps

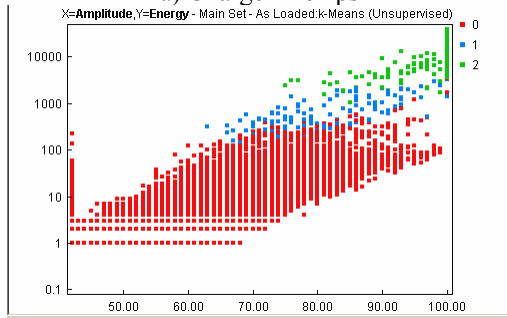


d) Nombre de coups - Amplitude

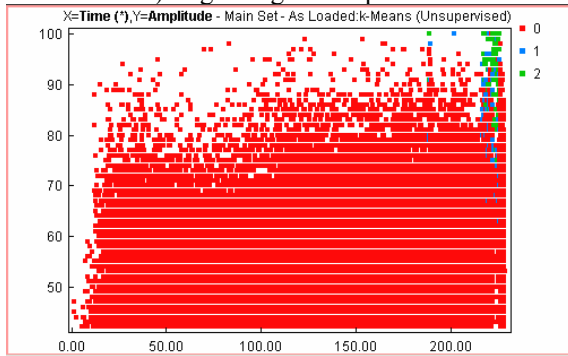
**a) Matériau U.**



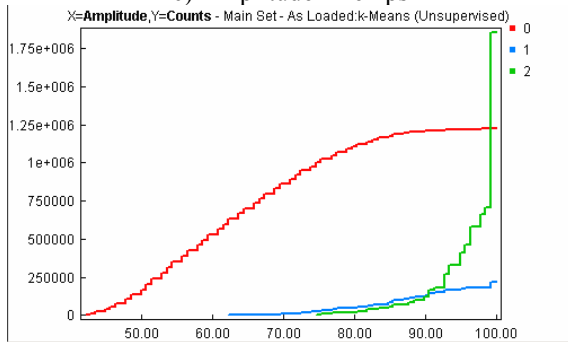
a) Charge - Temps



b) Log Energie - Amplitude



c) Amplitude - Temps



d) Nombre de coups - Amplitude

b) Matériau C3.

Figure 5 : Classification des signaux d'EA des matériaux U et C3.

Sur la table 2, nous montrons la correspondance des modes d'endommagement en traction statique à la classification des signaux acoustiques.

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 2	Classe 0	Classe 1
Nombre de coups cumulés	2,0 E+6	1,1 E+6	2,5 E+6
Log Energie (aJ)	1-200	10-5000	600-100000
Amplitude (dB)	40-90	55-100	75-100

a) Matériau U : [(0)]<sub>8</sub>

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 2	Classe 0	Classe 1
Nombre de coups cumulés	8 E+5	3 E+5	0,6 E+5
Log Energie (aJ)	1-100	2-2500	5000-50000
Amplitude (dB)	40-90	45-90	> 90

b) Matériau C1 : [(0/90)<sub>s</sub>]<sub>2</sub>

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 1	Classe 2	Classe 0
Nombre de coups cumulés	> 6 E+5	1,0 E+5	1,8 E+5
Log Energie	1-900	100-5000	1000-50000
Amplitude (dB)	40-90	65-90	> 90

c) Matériau C2 : [(0/90)<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 0	Classe 1	Classe 2
Nombre de coups cumulés	1,2 E+6	2,5 E+5	1,7 E+6
Log Energie (aJ)	1-1000	200-2000	1000-50000
Amplitude (dB)	40-90	65-90	80-100

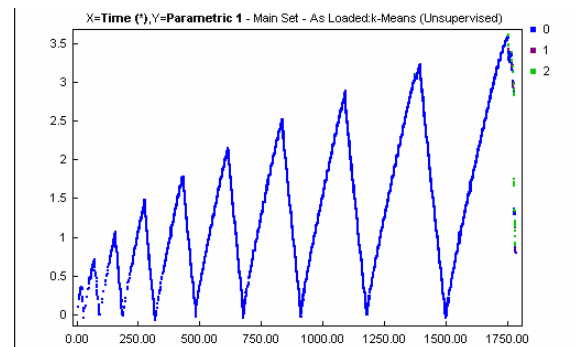
d) Matériau C3 : [(0<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>)]<sub>s</sub>

Table 2 : Correspondance des modes d'endommagement à la classification des signaux acoustiques, cas de la traction statique.

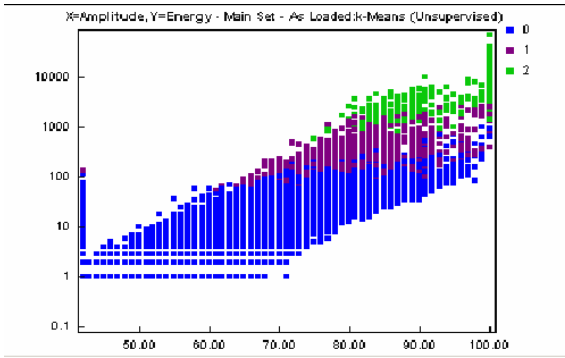
Les premiers endommagements apparaissent dans la matrice, suivi dans l'ordre par la décohésion et la rupture des fibres. Cet endommagement est caractérisé par de faibles amplitudes, de faibles énergies et un nombre de coups élevé. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par [4]. Par contre la décohésion fibre matrice et la rupture de fibres ont respectivement comme caractéristiques : des énergies de ruptures d'intensité moyennes et fortes. Ces dommages correspondent à des nombres de coups cumulés différents selon la séquence d'empilement

## 5.2 Application de l'EA aux essais cycliques

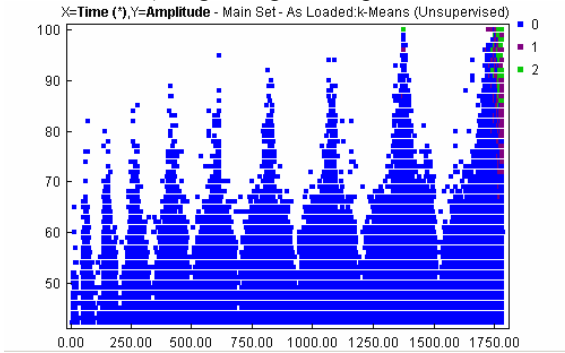
De la même manière que dans le cas de la traction statique, nous représentons la classification des signaux acoustiques pour deux empilements U et C3 dans le cas de la traction cyclique, voir figure 6.



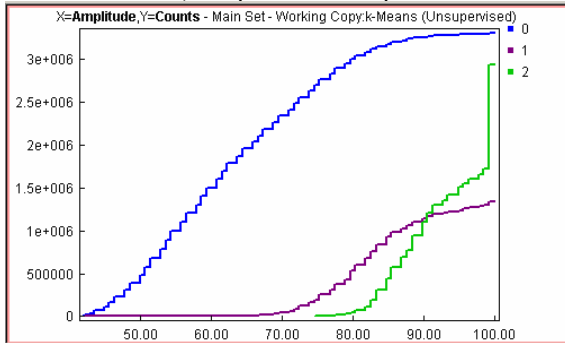
a) Charge - Temps



b) Log Energie - Amplitude

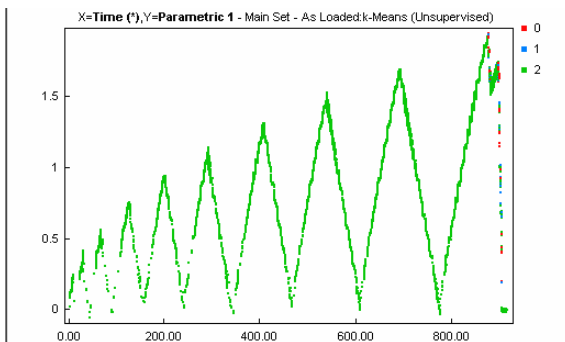


c) Amplitude - Temps

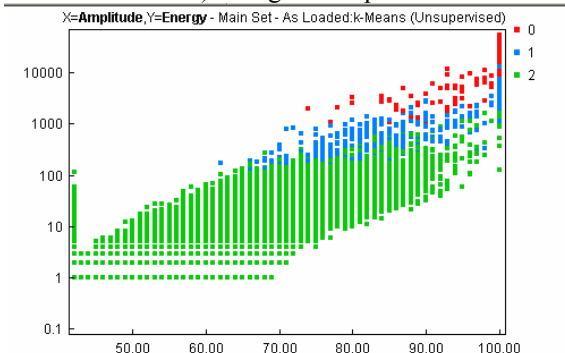


d) Nombre de coups - Amplitude

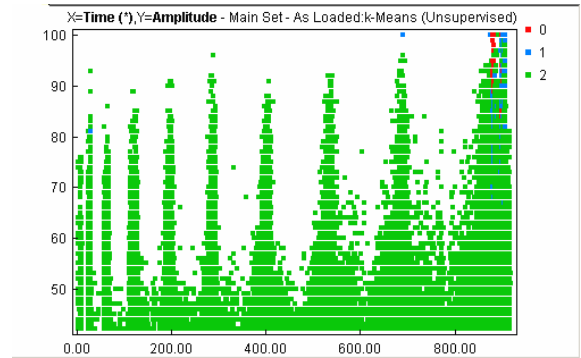
**a) Matériau U.**



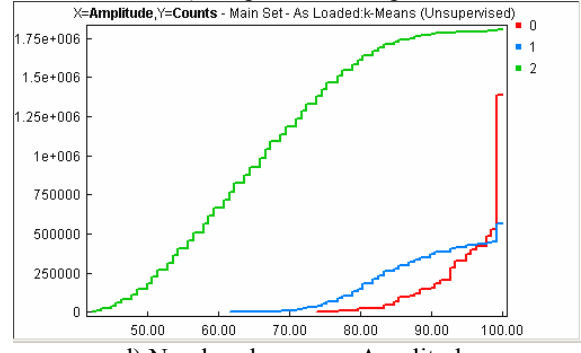
a) Charge - Temps



b) Log Energie - Amplitude



c) Amplitude - Temps



d) Nombre de coups - Amplitude

**b) Matériau C3.**

**Figure 6 :** Classification des signaux d'EA des matériaux U et C3.

La discrimination des classes a conduit aux mêmes types d'endommagements déjà identifiés en statique table 3.

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 0	Classe 1	Classe 2
Nombre de coups cumulés	34,0 E+5	11,0E+5	27,0 E+5
Log Energie (aJ)	1-1000	90-4000	500-50 000
Amplitude (dB)	40-100	60-100	75-100

a) Matériau U : [(0)<sub>s</sub>

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 2	Classe 1	Classe 0
Nombre de coups cumulés	15,0 E+5	2,5 E+5	5,0 E+5
Log Energie (aJ)	1-2000	50-6000	1000-50 000
Amplitude (dB)	40-100	55-100	80-100

b) Matériau C1 : [(0/90)<sub>2</sub>

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 2	Classe 0	Classe 1
Nombre de coups cumulés	9,0 E+5	1,5 E+5	2,2 E+5
Log Energie (aJ)	1-1000	100-2000	1000-50 000
Amplitude (dB)	40-100	55-100	78-100

c) Matériau C2 : [(0/90)<sub>2</sub><sub>s</sub>

	Fissuration matricielle	Décohésion	Rupture de fibres
	Classe 2	Classe 1	Classe 0
Nombre de coups cumulés	18,0 E+5	5,0 E+5	17,0 E+5
Log Energie (aJ)	1-1000	100-10 000	1000-70 000
Amplitude (dB)	40-100	60-100	75-100

d) Matériau C3 :  $[(0_2/90_2)]_s$

**Table 3 :** Correspondance des modes d'endommagement à la classification des signaux acoustiques, cas de la traction cyclique.

En cyclique, la fissuration matricielle conserve les faibles valeurs d'énergie, d'amplitude et un nombre de coups élevés en relation avec la séquence d'empilement. Ces caractéristiques sont accompagnées de la même chronologie d'événements acoustiques et du lieu d'apparition de l'endommagement qu'en statique. Pour les autres endommagements : décohésion fibre matrice et rupture de fibres, ils présentent respectivement de moyenne et fortes énergie et un nombre de coups intensif et variable fonction de la séquence d'empilement. Les ruptures de fibres sont plus localisables en charge décharge qu'en statique en particulier pour les matériaux précédant le plus grand nombre de couches à zéro placées à l'extérieure.

## 6 Conclusions

Le suivi de l'évolution de l'endommagement par émission acoustique est pratiqué sur des éprouvettes instrumentées par trois capteurs acoustiques, l'acquisition est faite à l'aide du logiciel AEwin et le traitement par le logiciel Noesis de la société EPA. La classification des signaux acoustiques est réalisée selon une méthode non supervisée multi variables à cinq descripteurs (temps de monté, nombre de coups, énergie, durée et l'amplitude). Le nombre de classes exactes est déterminé par la minimisation du coefficient Rij.

Pour chacun des matériaux étudiés sous chargement statique et cyclique trois types d'endommagements ont été discriminés rupture matricielle, décohésion fibre matrice et rupture de fibres.

Les premiers endommagements apparaissent dans la matrice. Ils sont suivis dans l'ordre par la rupture de l'inter plis ou la décohésion fibre matrice et la rupture des fibres. L'endommagement de la matrice est caractérisé par de faibles amplitudes, de faibles énergies et un nombre de coups élevé.

La décohésion fibre matrice est caractérisée par des énergies de ruptures d'intensité moyennes. Ces dommages correspondent à des nombres de coups cumulés différents selon la séquence d'empilement.

Les ruptures de fibres sont plus localisables en charge décharge qu'en statique, elles sont caractérisées par les valeurs d'énergies les plus élevées et par le plus grand nombre de coups cumulés, en particulier pour les matériaux précédant le plus grand nombre de couches à zéro placées à l'extérieure.

## Références

- [1] Benmedakhene S., Kenane M. et Benzeggagh M. L., "Initiation and growth of delamination in glass/epoxy composites subjected to static and dynamic loading by acoustic emission monitoring ", *Composites Science and Technology* 59 (1999) 201-208.
- [2] Morscher G. N., " Modal acoustic emission of damage accumulation in a woven SiC/SiC composite ", *Composites Science and Technology*, 59 (1999) 687-697
- [3] Anastassopoulos A., Kouroussis D. Tsimogiannis A. " Unsupervised classification of acoustic emission source from aerial man lift devices " 15 WCNDT, Roma 2000.
- [4] Huguet S., " Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère ", thèse de doctorat INSA de Lyon, 2002.
- [5] Nechad H., " Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante ", thèse de doctorat INSA de Lyon, 2004.
- [6] Hochard C., Bordredreuil C. et Payan J. " Endommagement et rupture de stratifiés constitués de plis tissés sous sollicitations statique et de fatigue ", 17 Congrès Français de Mécanique, 29 Aout-Septembre 2005, Troyes , France.
- [7] Marec A., " Contrôle de sante 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, 2008, France.
- [8] Moevus M., Rouby D., Godin N., R'Mili M., Reynaud P., Fantozzi G., Farizy G. "Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiC/[Si-B-C] composites exhibiting different tensile behaviours. Part I: Damage patterns and acoustic emission activity ", *Composites Science and Technology*, 68 (2008) 1250-1257
- [9] Moevus M., Godin N., R'Mili M., Rouby D., Reynaud P., Fantozzi G., Farizy G. "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 (2008) 1258-1265
- [10] Kharoubi M., " Etude du comportement mécanique de matériaux composites sous chargement cyclique et dynamique " thèse de doctorat, université du 08 Mai 1945 Guelma, 2009, Algerie.