



**HAL**  
open science

## Acoustic emission analysis of a laminate under a different loading rate

Imen Ben Ammar, Abderrahim El Mahi, Chafik Karra, Rachid El Guerjouma,  
Mohamed El Haddar

► **To cite this version:**

Imen Ben Ammar, Abderrahim El Mahi, Chafik Karra, Rachid El Guerjouma, Mohamed El Haddar. Acoustic emission analysis of a laminate under a different loading rate. Acoustics 2012, Apr 2012, Nantes, France. hal-00811328

**HAL Id: hal-00811328**

**<https://hal.science/hal-00811328v1>**

Submitted on 23 Apr 2012

**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.



# ACOUSTICS 2012

## Acoustic emission analysis of a laminate under a different loading rate

I. Ben Ammar<sup>a</sup>, A. El Mahi<sup>a</sup>, C. Karra<sup>b</sup>, R. El Guerjouma<sup>a</sup> and M. El Haddar<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine, Bât. IAM - UFR Sciences Avenue Olivier Messiaen 72085 Le Mans Cedex 9

<sup>b</sup>U2MP Unité de Mécanique, Modélisation et Production (U2MP), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Route Soukra Km 3.5, 3038 Sfax, Tunisia  
benammarimene@gmail.com

Ce travail a pour objet d'utiliser la technique d'émission acoustique pour étudier l'effet du type de renfort et de la séquence d'empilement sur le comportement mécanique des composites stratifiés. Les essais sont menés en traction et en flambement sur des éprouvettes en composites stratifiés constitués de résine époxyde renforcée par des fibres de carbone (CFRP), des fibres de verre (GFRP) et des fibres hybrides (HFRP). Plusieurs séquences d'empilement ont été considérées dans le cas des stratifiés constitués de fibres de verre. L'analyse des résultats d'essais mécaniques a permis de mettre en évidence l'effet de la séquence d'empilement, de l'épaisseur des couches à  $90^\circ$  et du type de renfort sur les caractéristiques mécaniques et à la rupture des différents stratifiés. Les signaux d'émission acoustique (EA) ont été enregistrés au cours du chargement. Une méthode d'analyse statistique multivariable non supervisée associée à une analyse en composantes principales a été utilisée afin de classifier les signaux d'EA dans les différents types de stratifiés. Les résultats obtenus ont permis d'identifier et de suivre l'évolution des différents mécanismes d'endommagement au cours du chargement en traction et en flambement.

## 1 Introduction

Les composites stratifiés sont utilisés dans des divers domaines de haute technologie (aéronautique, aérospatiale, construction navale et ferroviaire, automobile...). Ils sont plus avantageux par rapport aux autres matériaux métalliques traditionnels. Ils sont caractérisés par leur légèreté, leur tenue à la corrosion, leur facilité de mise en œuvre, leur tenue à la fatigue...etc.

De nombreux travaux ont été développés pour évaluer les caractéristiques mécaniques et étudier le comportement endommageable des composites stratifiés.

El Mahi et al [1-5] ont étudié le comportement mécanique des différents stratifiés croisés en traction et en flexion trois points en statique et en fatigue. Ces stratifiés sont constitués par de fibres de verre, fibres de kevlar et de résine époxyde. Les résultats obtenus ont montré que le comportement mécanique des stratifiés dépend du type de renfort et des épaisseurs des couches orientées à  $90^\circ$ . Les durées de vie de ces matériaux en fonction des conditions de chargement ont été déterminées en utilisant le critère  $N_{10}$  et ont été caractérisées par les courbes de Wöhler. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'influence de l'épaisseur des couches et de la séquence d'empilement sur la durée de vie et sur le taux de dégradation du matériau. Hochard et al [6] ont étudié le comportement mécanique des deux types de stratifiés qui se différencient selon la direction des plis. Des éprouvettes avec des plis tissés et d'autres avec des plis unidirectionnels ont été sollicitées en traction. Les résultats obtenus ont montré qu'il y a l'absence de rupture transverse intra-laminaire pour les stratifiés à plis tissés et que le comportement à la rupture est plus simple à modéliser. Par contre dans le cas des stratifiés à plis unidirectionnel, les auteurs ont développé une modélisation qui décrit le comportement mécanique de ces matériaux jusqu'à la rupture du premier pli.

D'autres auteurs ont utilisé la méthode d'émission acoustique EA pour évaluer les mécanismes d'endommagement des éprouvettes des composites stratifiés. Cette méthode permet de capter l'énergie élastique libérée par les matériaux sous contrainte. Chou et al [7] ont étudié la discrimination des phénomènes de rupture des fibres, de la microfissuration intralaminare, de microfissuration intralaminare ainsi que du microdélaminage au sein des composites stratifiés unidirectionnels lors des essais de traction. L'identification des mécanismes d'endommagements a été effectuée par la technique d'émission acoustique. La classification des mécanismes d'endommagement des stratifiés avec des plis orientés à  $90^\circ$ , montre d'abord l'apparition des

microfissures caractérisées par des salves d'amplitude inférieure à 60 dB, ensuite une accumulation des microfissures pour donner des mésolfissures caractérisées par des signatures acoustiques d'amplitude comprise entre 60 et 74dB et enfin la formation des microfissures caractérisées par des signaux d'amplitude supérieur à 75dB.

Dans ce travail notre contribution se focalise sur l'étude de l'influence du type de renfort et de la séquence d'empilement sur le comportement mécanique et sur l'évolution des mécanismes d'endommagement des composites stratifiés. Une analyse statistique multivariable des signaux d'EA enregistrés au cours du chargement en traction et en flambement sera utilisée pour identifier et suivre l'évolution des différents mécanismes d'endommagement et de détecter ceux conduisant à la rupture des matériaux.

## 2 Matériaux et procédure expérimentale

Différents types de stratifiés croisés sont élaborés au laboratoire (LAUM). Ils sont différenciés par le type de renfort et la séquence d'empilement.

Ces matériaux sont énumérés dans le tableau 1 de A à F. Les stratifiés sont constitués de résine époxyde renforcée par des fibres de carbone (CFRP), des fibres hybride carbone-verre (HFRP) et des fibres de verre (GFRP).

Table 1: Matériaux stratifiés étudiés

Matériaux	Séquence d'empilement	Nom
CFRP	$[0_{c2}/90_{c2}]_s$	A
HFRP	$[0_v/0_v/90_v/90_v]_s$	B
GFRP	$[0_{v2}/90_{v2}]_s$	C
	$[0_v/90_{v2}/0_v]_s$	D
	$[0_v/90_v/0_v/90_v]_s$	E
	$[90_{v2}/0_{v2}]_s$	F

La mise en œuvre des stratifiés est réalisée par moulage sous vide, par la technique dite du sac. Les plis sont stratifiés et imprégnés à température ambiante, puis moulés sous vide (dépression 30 kPa) pendant 10 heures entre le moule et le contre moule après interposition de divers tissus de moulage. Les éprouvettes ont été découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, à partir de plaques de  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  de surface. Les dimensions des éprouvettes d'essais sont :  $L = 200 \text{ mm}$ ,  $b = 20 \text{ mm}$  et  $e = 2$

mm; où  $L$ ,  $b$  et  $e$  sont respectivement la longueur totale, la largeur et l'épaisseur des éprouvettes.

Les éprouvettes sont ensuite sollicitées en statique en traction et flambement sur une machine hydraulique universelle de type INSTRON (Fig. 1.), munie d'une cellule de charge de 5 KN pour la mesure de la force et d'un capteur LVDT pour la mesure du déplacement. Les essais sont effectués avec une vitesse de déplacement  $v = 1 \text{ mm mn}^{-1}$ . L'ensemble est piloté par ordinateur.



Figure 1 : Essais de flambement et traction en statique des éprouvettes stratifiées

### 3 Comportement mécanique des stratifiés

Deux à trois éprouvettes de chaque matériau ont été testées en statique en traction et en flambement jusqu'à la rupture.

La figure 2 représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement des différentes éprouvettes testées en traction statique.

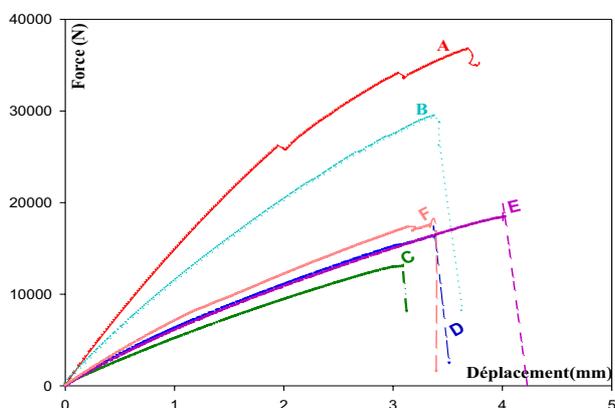


Figure 2 : Courbes force-déplacement obtenues dans le cas des essais de traction des différents stratifiés

L'analyse des résultats obtenus montre que le comportement mécanique des matériaux peut être décrit en trois phases:

- Une première phase linéaire correspond à la partie élastique du matériau,
- Une deuxième phase caractérisée par une courbe légèrement incurvée associée à l'initiation de l'endommagement et le développement de microfissures au sein du matériau qui est pratiquement courte pour ces matériaux,
- Une troisième phase très courte correspondant à la propagation des fissures et la rupture des fibres conduisant à la rupture totale de l'éprouvette,

La figure 3 représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement des différentes éprouvettes testées en flambement statique.

L'analyse des résultats obtenus montre que: au début de l'essai, lorsque la charge augmente, l'éprouvette reste stable (aucun déplacement latéral); lorsque la charge atteint la charge critique  $F_c$  l'éprouvette fléchit brutalement et part latéralement vers la droite ou vers la gauche. Au-delà de la charge critique  $F_c$ , le déplacement latéral augmente rapidement alors que la charge est pratiquement constante.

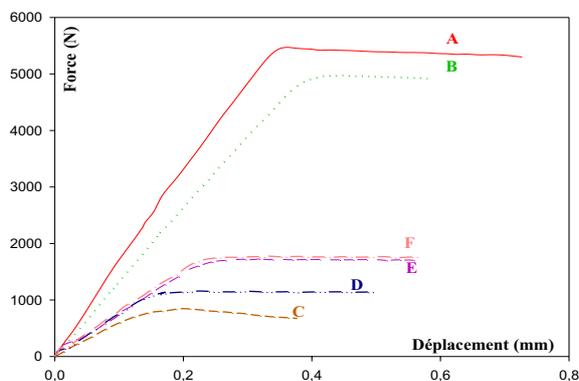


Figure 3: Courbes force-déplacement obtenues dans le cas des essais de flambement des différents stratifiés

Dans le tableau 2 sont reportées les caractéristiques mécaniques et à rupture mesurées en statique en traction et en flambement.

Les résultats ont été analysés, en groupant à chaque fois un certain nombre de stratifiés, ce qui nous permet de mettre en évidence l'influence d'un certain nombre de paramètres sur le comportement mécanique de ces stratifiés.

- **Effet du type de renforts:** Les matériaux A, B et C possèdent la même séquence d'empilement  $[0_2/90_2]_s$  mais avec des renforts fibreux différents. Le composite à fibres de carbone (CFRP) a la plus grande rigidité et contrainte à la rupture et suivi du matériau hybride (HFRP) et enfin le matériau à fibres de verre (GFRP).

- **Effet de la séquence d'empilement:** Les matériaux C, D, E et F sont des stratifiés à fibres de verre (GFRP). Ils possèdent tous le même nombre de plis orientés à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$  mais avec des séquences d'empilement différentes. Les caractéristiques mécaniques et à la rupture du matériau F sont plus élevées par rapport aux autres matériaux. Cette séquence d'empilement favorise la multiplication de l'endommagement par fissuration transverse tout en donnant au matériau la possibilité de continuer à résister au chargement.

- **Effet de l'épaisseur des couches à  $90^\circ$ :** Les matériaux C, D et E ont des épaisseurs de couches à  $90^\circ$  différentes. Le stratifié E est caractérisé par des caractéristiques mesurées en statique plus élevées que les autres matériaux suivi du stratifié D et enfin le stratifié C. Le stratifié avec une faible épaisseur de couche à  $90^\circ$  résiste mieux au chargement statique.

Table 2: Caractéristiques mécaniques des différents stratifiés mesurées en flambement et en traction en statique.

Matériaux	Rigidité (KN/mm)		Contrainte à la rupture (MPa)		Déplacement à la rupture (mm)	
	Trac	Flam	Trac	Flam	Trac	Flam
A	16,9	13,3	660	98	3,70	0,37
B	12,8	8,6	652	96	3,38	0,45
C	5,6	4,2	296	18	3,08	0,20
D	7,1	4,7	328	26	3,38	0,30
E	6,8	4,5	334	34	4,02	0,32
F	7,3	5,2	339	38	3,34	0,33

## 4 Emission acoustique

L'émission acoustique est une des méthodes de CND (Contrôle Non Destructif). Elle permet la détection et la localisation des endommagements évolutifs sous l'action d'une sollicitation mécanique quelconque.

Le système d'acquisition utilisé au laboratoire permet de calculer plusieurs descripteurs temporels pour chaque salve d'EA: l'amplitude maximale du signal, l'énergie, la durée, le nombre de coups, le temps de montée, l'énergie etc. (fig. 4).

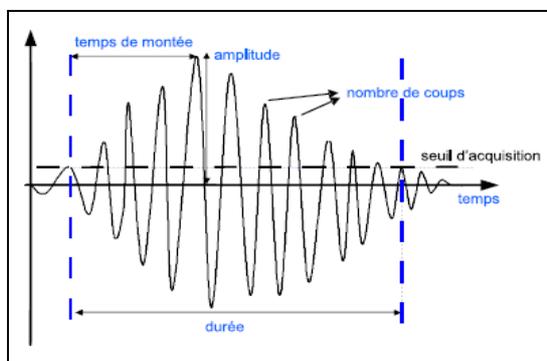


Figure 4 : Principaux paramètres mesurés sur une salve d'émission acoustique discrète

La classification de l'endommagement est effectuée par la méthode de coalescence floue [13-15]. Nous avons appliqué cette méthode aux stratifiés CFRP, HFRP, et GFRP soumis à des essais de traction et de flambement. Durant ces essais la propagation ainsi que l'évolution des mécanismes d'endommagement ont été suivies par émission acoustique à l'aide des capteurs piézoélectriques résonnants placés sur les différentes éprouvettes présentant une sensibilité importante entre 100 kHz et 1 MHz. Les mécanismes sources des signaux d'EA recueillis sont identifiés en utilisant plusieurs paramètres temporels: l'amplitude, la durée, l'énergie, le temps de montée, le nombre de coups [9-12]. Les données ont été traitées sous MATLAB (fig.5).

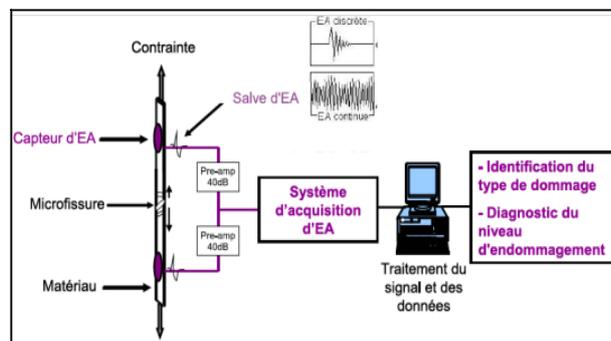


Figure 5 : Dispositif expérimental d'EA

### 4.1 Essai de traction

La classification appliquée aux salves d'EA recueillies au cours des essais de traction sur des échantillons, constitués de fibres de carbone et de résine époxyde (CFRP), est représentée dans la figure 6. Le résultat fait apparaître quatre classes de signaux différents. La première classe contient des signaux dont l'amplitude est comprise entre 37 et 70 dB, ces signaux proviennent de microfissurations matricielles. La gamme d'amplitude de deuxième classe est centrée entre 79 et 85 dB, en nombre important, apparaissant juste après les microfissurations de la matrice, sont probablement issus des décohésions des interfaces fibre de carbone/résine. Leurs caractéristiques sont très différentes de celles des signaux de classe 1, leur énergie est notamment beaucoup plus importante avec des temps de montée plus courts. La troisième classe correspond à des événements d'amplitude comprise entre 81 et 90dB, nous les attribuons au délaminage. La dernière classe obtenue contient quelques signaux, eux aussi très énergétiques (au dessus de 85 dB), mais ils apparaissent principalement en fin d'essai. Ils se réfèrent donc à la rupture des fibres. Ils sont présents uniquement au niveau de la zone de rupture en fin d'essai.

La chronologie d'apparition des différents types d'endommagement (fig.6b) montre que la microfissuration matricielle est le mécanisme d'endommagement prépondérant tout au long des essais. Les décohésions interfaciales qui commencent dès le début des essais sont beaucoup moins importantes que les microfissurations matricielles. Il y a un chevauchement entre les signaux de décohésion et de délaminage. En fin d'essai, quelques ruptures de fibres apparaissent et conduisent à la rupture des échantillons.

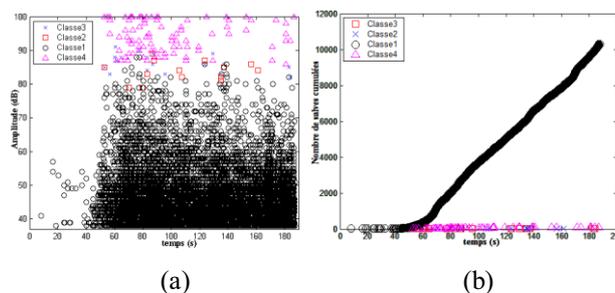


Figure 6 : a) Distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par classification et b) Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement dans le stratifié CFRP

L'analyse statistique multivariable appliquée à des données d'EA obtenues au cours des essais sur des

échantillons, constitué des fibres hybride et résine époxyde (HFRP), a permis d'identifier trois classes qui correspondent à trois types d'endommagement comme le montre la figure 7. La première classe de signaux des amplitudes généralement comprises entre 35-65dB. Les caractéristiques de ces signaux sont identiques à celles des signaux identifiés comme de classe 1 sur les échantillons précédemment testés et correspondent à la microfissuration matricielle. La seconde classe observée a une distribution d'amplitude comprise majoritairement entre 79 et 85dB. Ces signaux sont identiques à ceux observés dans les échantillons CFRP et correspondant aux décohésions interfaciales. La troisième classe correspond à une amplitude comprise entre 85 et 100dB. Ces signaux très énergétiques apparaissent en fin d'essai ressemblent fortement à ceux observés dans les échantillons de CFRP et correspondent aux ruptures des fibres.

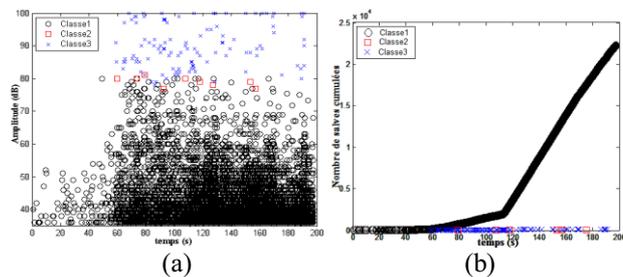


Figure 7 : a) Distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par classification et b) Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement dans le stratifié HFRP

L'analyse est appliquée aux signaux d'EA recueillis au cours des essais sur des échantillons constitués de fibres de verre et de résine époxyde. Cette analyse fait apparaître trois types de signaux comme le montre figure 8. Les premiers signaux ont des paramètres d'EA identiques à ceux observés dans le cas de la microfissuration matricielle qui ont une amplitude comprise majoritairement entre 30 et 75 dB. Ces signaux apparaissent dès le début de l'essai et leur nombre croît avec la charge. Un deuxième type de signaux a une distribution d'amplitude comprise majoritairement entre 68 et 75 dB et qui correspond à la décohésion interrassiale fibre/résine. Un troisième type de signaux apparait en fin d'essai. Ils ont une amplitude comprise entre 75-100 dB. Ces signaux correspondent à la rupture de fibres.

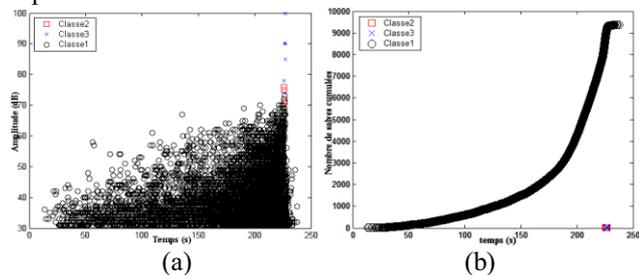


Figure 8 : a) Distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par classification et b) Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement dans le stratifié GFRP

## 4.2 Essai de flambement

L'activité d'émission acoustique collectée au cours des essais de flambement en statique sur des échantillons de CFRP, HFRP et GFRP a été étudiée en termes d'amplitude et de nombre de signaux collectés en fonction du temps.

A titre d'exemple, la figure 9 donne un résultat typique de l'activité acoustique au cours d'un essai de flambement en statique d'éprouvette constituée de fibres de carbone(CFRP). Cette figure représente l'amplitude et le nombre de signaux cumulés en fonction du temps. La première classe de signaux des amplitudes généralement comprises entre 39dB et 45dB. Ces signaux proviennent de microfissurations matricielles. La deuxième classe a une distribution d'amplitude comprise majoritairement entre 75dB et 85dB et qui correspond à la décohésion des fibres. Un troisième type de signaux apparait en fin d'essai. Ils ont une amplitude comprise entre 85-100dB. Ces signaux correspondent à la rupture de fibres.

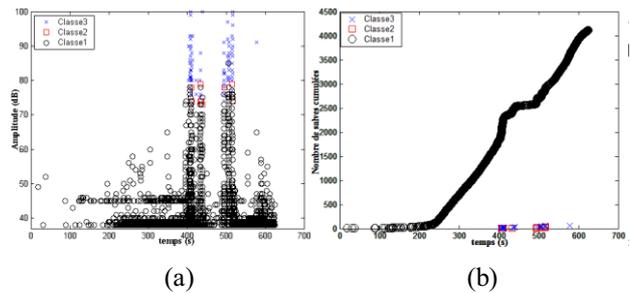


Figure 9 : a) Distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par classification et b) Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement dans le stratifié CFRP

L'analyse effectuée sur des échantillons de stratifié HFRP soumis à des essais de flambement en statique, montre l'apparition des trois classes. Ils correspondent aux signatures acoustiques de trois types d'endommagement comme le montre la figure 10. La première classe de signaux des amplitudes généralement comprises entre 39-55 dB et qui correspondent à la microfissuration matricielle. La seconde classe observée a une distribution d'amplitude comprise majoritairement entre 79 et 85dB et ceci correspondant aux décohésions interfaciales. La troisième classe correspond à une amplitude comprise entre 91 et 100 dB. Ces signaux très énergétiques, ils se réfèrent donc à la rupture des fibres, ils sont présents uniquement au niveau de la zone de rupture en fin d'essai. Les caractéristiques de ces signaux sont identiques à celles des signaux identifiés sur les échantillons précédemment testés. Cette analyse montre que les stratifiés CFRP et HFRP ont le même mode d'endommagement au cours des essais de flambement en statique.

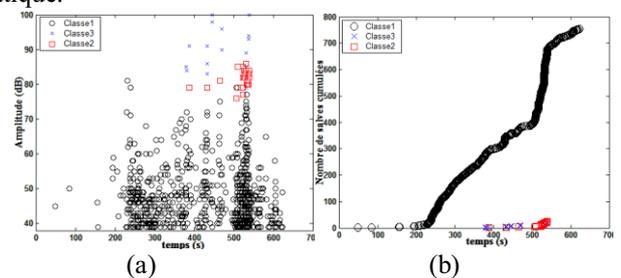


Figure 10 : a) Distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par classification et b) Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement dans le stratifié HFRP

L'analyse statistique multivariable appliquée à des données d'EA obtenues au cours des essais de flambement sur des éprouvettes constituées des fibres verre et de résine époxyde (GFRP), a permis d'identifier deux classes qui

correspondent à deux types d'endommagement comme le montre la figure 11. Les premiers signaux ont des paramètres d'EA identiques à ceux observés dans le cas de la microfissuration matricielle, d'amplitude comprise entre 35 et 50 dB. Un deuxième type de signaux apparaît en fin d'essai qui a des amplitudes entre 95 à 100 dB. Ces signaux ont des paramètres d'EA qui se rapprochent plus de ceux dus à la rupture des fibres.

Nous avons remarqué que la classification ne permet pas d'identifier de décohésions interfaciales au cours des essais de flambement de ces matériaux.

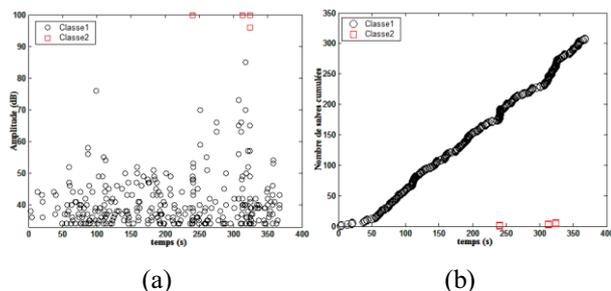


Figure 11 : a) Distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par classification et b) Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement dans le stratifié GFRP

## 5 Conclusion

Ce travail avait pour objet d'étudier le comportement mécanique en traction et flambement en statique de différents stratifiés croisés. Ces stratifiés sont constitués de résine époxyde renforcée par des fibres de carbone (CFRP), fibres hybride (HFRP) et fibres de verre (GFRP) avec différentes séquences d'empilement. L'étude statique a permis de mettre en évidence l'effet du type de renfort de la séquence d'empilement et des épaisseurs des couches à 90° sur les valeurs de la contrainte et du déplacement à la rupture des stratifiés. Le matériau constitué de fibres de carbone possède des caractéristiques mécaniques et la rupture plus élevées que les autres.

Durant ces essais la propagation ainsi que l'évolution des mécanismes d'endommagement ont été suivies par émission acoustique. La classification réalisée avec les descripteurs temporels a permis d'identifier les différents modes d'endommagement apparus sur ces éprouvettes au cours des essais de flambement et de traction en statique.

## References

[1] A. El Mahi, A. Bezazi. "Describing the Flexural Behaviour of Cross-ply Laminates Under Cyclic Fatigue" *Applied Composite Materials*, Vol 16, No° 1, pp. 33-53, (2009).

[2] A. El Mahi, A. Bezazi, J.-M. Berthelot, "The fatigue behaviour and damage development in cross-ply laminates in flexural tests." *European Conference on Composite Materials (ECCM 10)*, Belgium, (2002).

[3] A. Bezazi, A. El Mahi, J.-M. Berthelot, "Experimental analysis of behavior and damage of sandwich composite materials in three-point bending. Part 1. Static tests and stiffness degradation at failure studies." *Strength of Material*, Vol 39, n° 2. pp.170-177, (2007).

[4] A. Bezazi, A. El Mahi, J.-M. Berthelot, B. Bezzazi, "Flexural fatigue behaviour of cross-ply laminates. An

experimental approach." *Strength of Material*, pp.66-83, (2003).

[5] A. El Mahi, J.-M. Berthelot, J. Brillaud, "Stiffness reduction and energy release rate of cross-ply laminates during fatigue test", *Composite Structures*, Vol 30, pp. 123-130, (1995).

[6] C. Hochard, P. Herzog, D. De Vadder, J. Payan, *Résistance et surveillance des composites stratifiés*, (2006).

[7] H.Y. Chou, H. Zejli, A. Thionnet, A. Bunsell, A. Mouritz, M. Bannister, 'Détection et discrimination par émission acoustique des endommagements dans les composites. Comparaison expérience modélisation', *Comptes Rendus des JNC17 - Poitiers* (2011)

[8] N. De. Greef, L. Gorbatikh, Stepan V. Lomov, I. Verpoest, "Damage development in woven carbon fiber/epoxy composites modified with carbon nanotubes under tension in the bias direction", *Composites: Part A* 42 1635–1644 (2011).

[9] K.Morioka, Y.Tomita, "Effect of lay-up sequences on mechanical properties and fracture behavior of CFRP laminate composites", *Materials Characterization* 45, 125-136 (2000)

[10] E. Eglitis, K.Kalnins, C. Bisagni, 'Study on buckling behavior of laminated shells under pulse loading', *27Th International congress of the aeronautical sciences* (2010).

[11] M. Assarar, Étude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs, *Thèse Université du Maine* 2007

[12] 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 Université du Maine* (2008).

[13] A. Marec, R. Berbaoui, J.-H. Tomas, A. El Mahi, R. El Guerjouma, "Investigation of damage mechanisms of composite materials: multivariable analysis based on temporal and wavelet features extracted from acoustic emission signal", *NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering* Nantes, France, (2009)

[14] M. Kharoubi, L. Fatmi, A. El Mahi, R. El Guerjouma et R. Berbaoui, "Identification de dommage par EA de stratifiés composites chargés en statique et en cyclique", *10ème Congrès Français d'Acoustique*, Lyon 12-16 (2010).

[15] 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 (6), pp.1441-1464, (2008).