

Analyse des Mécanismes d'Endommagement par Emission Acoustique des Matériaux Composites Utilisant la Méthode de l'Implant Piézo-électrique

Seif Eddine HAMDI*, Rachid EL GUERJOUA**
& Med Hédi BEN GHOZLEN*

*Laboratoire de Physique des Matériaux, Faculté des Sciences de Sfax, B.P.802, 3018 Sfax- TUNISIE

seif3eddine@yahoo.com

ghozlenh@yahoo.fr

**LAUM, CNRS, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 9, FRANCE

Rachid.el_Guerjouma@univ-lemans.fr

Résumé: Des études antérieures développées en laboratoire ont validé une méthode originale permettant la surveillance de santé en temps réel d'une structure composite à l'aide de capteurs piézoélectriques insérée. Un des problèmes empêchant l'application industrielle d'une telle technique est le manque d'une méthode efficace capable de détecter et distinguer parmi les types d'endommagement se produisant pendant le service. Avec ceci en arrière pensée, la réponse mécanique, le développement de l'endommagement et l'activité d'émission acoustique pendant l'essai de traction d'un composite à matrice verre-époxy ont été étudiés. Un des problèmes restants est l'analyse des signaux d'EA afin d'identifier les mécanismes d'endommagement les plus critiques. Dans ce travail, notre contribution consiste à coupler une analyse conventionnelle des données d'émission acoustique à une analyse statistique multivariable, en effet, l'objectif de cette analyse est une classification des sources d'EA durant le processus d'endommagement au sein d'une structure stratifié verre/époxyde. De cette façon, le papier contribue au développement de la technique d'émission acoustique pour la surveillance in situ du développement des défauts dans des composites à matrice polymère.

Mots clés: Matériaux composite, Endommagement, Emission Acoustique (EA), Piézoélectricité, K-moyennes.

INTRODUCTION

Etant donné qu'une fissure de quelques micromètres dans un matériau peut-être la cause de sa rupture complète. Aussi la détection de fissure mobilise-t-elle de plus en plus de chercheurs en raison des exigences croissantes des citoyens en matière de fiabilité des machines, des ouvrages et des moyens de transport, d'où la nécessité de suivre leur comportement dans les conditions naturelle d'utilisation.

Dans le but de diminuer les durées et les coûts de maintenance, notre étude s'est orientée vers des capteurs intégrés à la structure. Notre choix s'est porté sur des pastilles piézoélectriques grâce à leurs caractéristiques adaptables dans le cadre de notre travail des matériaux composites dit « sensibles ».

Notamment, parmi les diverses approches qui permettent de traquer les défauts d'homogénéité structurelle, les techniques d'émission acoustique et l'ultrason se distinguent par leur faible coût, leur

facilité de mise en œuvre, leur caractère inoffensif pour l'homme et non destructif pour les matériaux.

Les travaux de recherche actuels sur l'EA sont dédiés à l'identification et à la discrimination des mécanismes d'endommagement dans des matériaux et des structures à partir de paramètres pertinents extraits des signaux d'EA. Notre travail se situe dans ce cadre. Le travail proposé s'intéresse à une analyse par émission acoustique et par ultrasons de l'endommagement en statique des composites à matrice polymère. Notre contribution consiste à coupler une analyse conventionnelle des données d'émission acoustique à une analyse statistique multi variable. C'est pourquoi une méthodologie nécessitant l'emploi de classificateurs, basée sur l'analyse du signal et l'identification de la nature des sources d'EA, a été développée.

L'objectif de cette analyse est une classification des sources d'EA durant le processus d'endommagement au sein d'une structure stratifié verre/époxyde en utilisant une instrumentation insérée.

1. Contrôle de santé par capteurs intégrés

1.1. Présentation et caractérisation des pastilles piézoélectriques

Les systèmes de mesure intégrés aux structures sont le plus souvent issus du Contrôle Non Destructif (CND) classique. Pour adapter ces méthodes à la mesure in-situ, il est nécessaire de réduire la taille des capteurs ou plus généralement des systèmes sensitifs et en particulier leurs épaisseurs. Ainsi dans les travaux réalisés durant cette étude, nous avons utilisé des pastilles piézoélectriques nues de faible épaisseur (moins de 0.25 mm) et coûtant moins d'un Euro pièce

D'une façon générale, la piézoélectricité relie une déformation à une variation de moment dipolaire dans le matériau. Selon le type de matériau, plusieurs formalismes permettent d'expliquer la piézoélectricité, dans une approche simplifiée, on peut définir un coefficient piézoélectrique « d » en se référant à l'effet inverse comme le coefficient de proportionnalité entre une déformation S et un champ électrique appliqué E . On écrira alors :

$$S = dE \quad (M/V) \quad (1)$$

Afin de caractériser plus complètement les propriétés piézoélectriques d'un matériau, il convient de prendre en compte la nature tensorielle des grandeurs physique en jeu. Ainsi:

- Le champ électrique est un vecteur, ou encore un tenseur d'ordre 1,
- la déformation est représentée par un tenseur symétrique d'ordre 2, le tenseur des déformations.

On représentera donc la piézoélectricité par un tenseur d'ordre 3 et on écrira :

$$S_{ij} = d_{kij} E_k \quad (2)$$

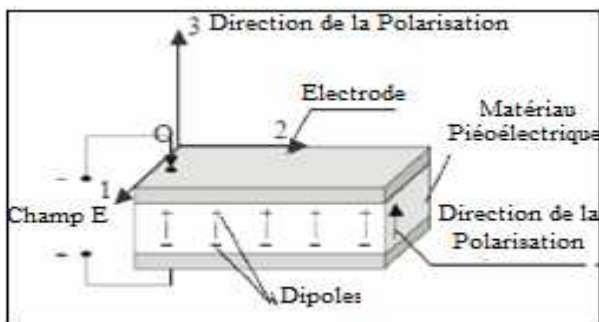


Figure 1. Polarisation des pastilles piézoélectriques.

1.2. La méthode de l'implant piézo-électrique et problèmes d'intégration

L'objectif de ce travail n'est pas le développement d'une technique de mesure, mais l'identification des mécanismes sources des données d'émission acoustique sur les matériaux à différents stades de l'endommagement.

Les méthodes de contrôle de santé intégré des structures mécaniques soulèvent deux questions importantes qui sont le respect de l'intégrité de la

structure et des capteurs ainsi que la robustesse de la méthode face à des anomalies dans l'insertion des capteurs.

En effet, l'insertion d'un élément étranger dans un matériau hôte a pour effet immédiat de modifier localement le comportement mécanique de la structure. D'autre part, le capteur lui même doit être capable de résister aux concentrations de contraintes internes lors de l'élaboration de la structure (phénomène de retrait) et aux sollicitations mécaniques durant le cycle de vie du matériau. Il est donc intéressant d'étudier l'impact de l'insertion du capteur sur les propriétés mécaniques de la structure et réciproquement.

A ce sujet, nous évoquerons les principaux effets de cet impact par interprétation des signaux d'émission acoustique orientées vers la discrimination des mécanismes d'endommagement au sein d'un matériau composite à base polymère.

2. Application à l'identification des sources en émission acoustique

2.1. Présentation et caractéristiques physiques de l'EA

L'EA se produit quand un petit déplacement de surface d'un matériau est généré. Ceci se manifeste en raison des ondes de fatigue produites quand il y a un dégagement rapide d'énergie dans un matériau ou sur sa surface.

Mis sous contrainte, le matériau peut assister à une création d'une fissure au niveau d'un de ses défauts, ou à la croissance d'une fissure préexistante, entraînant au niveau de celle-ci la création d'une onde mécanique transitoire. Par conséquent, une source qui produit un événement d'EA est le phénomène qui décharge l'énergie élastique dans le matériau, qui se propage alors comme onde élastique. Les événements d'EA peuvent également venir tout à fait rapidement quand les matériaux commencent à échouer, dans ce cas des taux d'activité d'EA sont étudiés différemment que les événements individuels. Les événements d'EA qui sont généralement étudiés incluent la prolongation d'un cycle de fatigue ou la rupture de fibre dans une matière composite pendant le processus de l'endommagement du matériau traité.

Cette technique permet donc de détecter en temps réel l'existence de défauts évolutifs. Elle permet de conclure des jugements sur le niveau d'endommagement d'un matériau, les processus de ruptures et la localisation des défauts. Par extension, l'analyse par émission acoustique est utilisée comme une sorte de technologie non destructive (NDT) en se basant sur l'exploitation du fait que l'EA est lié à un dégagement irréversible d'énergie: si la structure est de nouveau sollicitée, aucune activité ne sera détectée jusqu'à ce que le niveau de contrainte dépasse celui atteint précédemment: Ce phénomène est connu sous la nomination de l'effet Kaiser.

2.2. Signature acoustique des sources et paramètres exploitables

Les outils d'EA ne produisent pas activement des ondes, comme en ultrasons conventionnels. Plutôt, ils détectent passivement les émissions des sources acoustiques. Afin de caractériser le signal EA, on prend le risque de supposer que chaque salve (EA discrète) correspond à un événement physique dans le matériau et où la forme de la salve est directement liée aux caractéristiques de cet événement. Par conséquent, il est donc d'une importance majeure de se doter des paramètres permettant la caractérisation d'un type de signal visant ainsi l'identification des divers mécanismes d'endommagements mis en jeu dans le but de contrôler l'état de santé des structures.

Il existe un grand nombre de paramètres, qui lorsque la salve est numérisée, sont extraits, calculés et présentés pour affichage selon le mode choisi par l'utilisateur. Cependant, quelques uns sont extraits classiquement de l'analyse d'un signal temporel de l'EA. (figure 2).

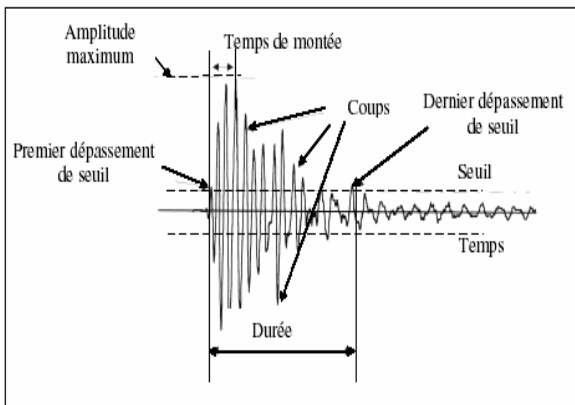


Figure 2. Principaux paramètres mesurés sur une salve d'émission acoustique.

3. Analyse statistique multivariable et classification des signaux

3.1. Analyse multiparamétrique

Cette méthode consiste à mettre en évidence, par le biais de multiples corrélations, s'il existe une ou plusieurs relations de dépendances particulières entre ces paramètres de forme (amplitude, durée, nombre de coups, énergie, fréquence,...). L'observation de ces relations de dépendance par la représentation choisie permet alors d'identifier parmi la totalité des signaux d'EA (ou pour un nombre plus restrictif) s'il existe une seule et unique ou plusieurs populations de signaux. D'autre manière, chaque relation de dépendance est caractéristique d'un phénomène physique émissif ou d'une propriété des signaux d'EA.

Dans ce cadre, de nombreux travaux (S.Huguet et al, Godin et al) menés sur des échantillons « modèles » de matériaux composites unidirectionnelles, ont permis d'identifier quatre types de signaux dénommés

signaux de type A, B, C et D respectivement leurs principales caractéristiques sont regroupés dans le tableau 1. Nous aurons recours, tout au long de notre travail, à ce type d'analyse, dans le but de déduire le nombre de mécanismes émissifs au cours de l'essai et d'établir une carte chronologique du processus de l'endommagement au sein du matériau.

	Amplitude (dB)	Temps de montée	Durée du signal	Décroissance du signal	Type du signal	Forme du signal
Type A (fissuration de matrice)	~50-70	Moyen	Moyenne	Lente	Résonnant	
Type B (décohésions)	~55-80	Court	Moyenne	Courte	Impulsionnel	
Type C (ruptures de fibres)	~70-100	Court	Courte	Courte	Impulsionnel	
Type D (délamimage)	~55-70	Lent	Très longue	Lente	Résonnant	

Tableau 1. Caractéristiques des types de signaux A, B, C, D.

3.2. Analyse statistique

Dans les cas les plus complexes, lorsque les populations des données se superposent ou lorsque le nombre de paramètres corrélés est supérieur à deux, l'analyse des signaux d'EA aux moyens de simples corrélations en deux dimensions n'est plus efficace. Afin d'augmenter la puissance de l'analyse multiparamétrique, il peut s'avérer utile de commencer par segmenter les données c'est à dire les diviser en classes. C'est l'objet de la méthode des k-moyennes (K-means). Cette méthode repose sur le fait que Chaque signal d'émission acoustique est représenté dans un espace multidimensionnel par un vecteur, dont les coordonnées sont les différents paramètres acoustiques. Par exemple, un signal acoustique peut-être défini de la façon suivante :

$$\vec{S} = f(\text{amplitude, énergie, nombre de coups, durée, temps de montée, etc.})$$

Par extension, une classe (cluster) est un groupe de signaux ou de données qui de par leur similitude ou leur correspondance à un même phénomène physique se distingue (diffère) des autres données.

Nous essayerons de répondre tout au long de ce papier à une question fondamentale concernant la validité des résultats, en vérifiant si les similitudes observées entre les signaux correspondent-elles réellement à un même phénomène physique ou inversement les différences enregistrées entre les classes correspondent-elles à différents mécanismes d'endommagement.

4. Matériaux et procédure expérimentale

4.1. Composite stratifié à plis croisés

Le matériau composite stratifié présenté dans cette étude est constitué 16 plis croisés verre/époxy [(0/90)4]s. La mise en œuvre est réalisée au sein du laboratoire avec le dosage suivant : 30% de fibres, 10% de durcisseur et 60% de résine époxyde.

On a tenté une intégration de deux pastilles piézoélectrique au sein du stratifié, la figure 3 explique la séquence d'empilement du matériau ainsi que la figure 4 expose les échantillons élaborés pour les essais de traction et de flexion.

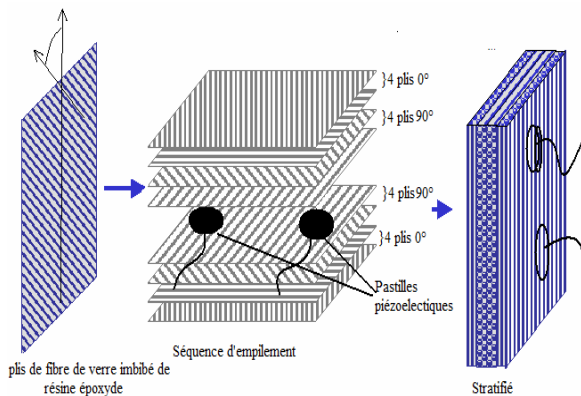


Figure 3. Séquence d'empilement du stratifié.

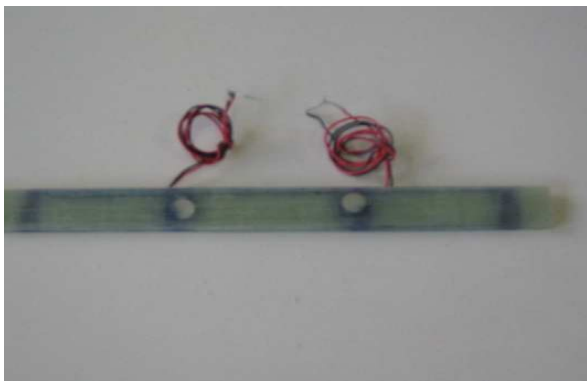


Figure 4. Éprouvette stratifié avec pastilles intégrés.

4.2. Essais mécaniques

Les essais de traction et de flexion trois points sur éprouvettes de composites à plis croisés ont été réalisés sur une machine de marque Instron (figure 5), équipée avec une cellule de force de 100kN

L'emploi d'une vitesse différente, quel que soit le type d'essais, permet de subir l'effet viscoélastique produit par les résines, nous essayerons de suivre cet effet afin de récupérer l'influence de la variation de la vitesse sur le comportement des composite lors de la comparaison de résultats provenant de différents essais.

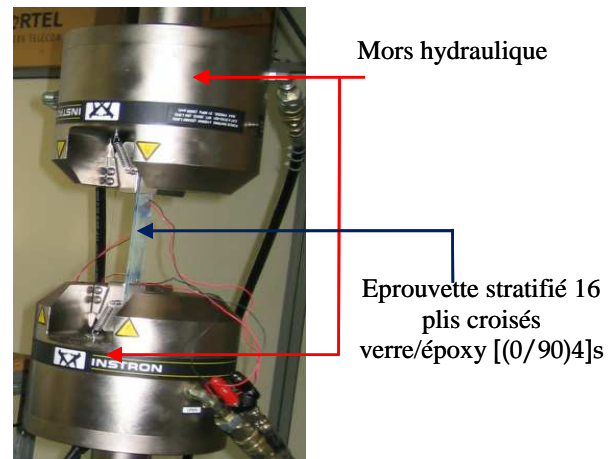


Figure 5. Dispositif de mesure pour la traction.

5. Résultats et discussion

5.1. Résultats des essais statiques

Des essais de traction ont été effectués sur des éprouvettes en composites stratifiés de 16 plis croisés verre/époxy [(0/90)4]s. La figure 6 donne l'évolution de la force en fonction du déplacement pour un échantillon simple et un autre à pastilles piézoélectriques incorporés. On remarque que le stratifié instrumenté atteint sa force à la rupture avant le stratifié simple, ce qui nous mène à conclure que l'incorporation des pastilles piézoélectrique au sein du composite stratifié entraîne une dégradation de ses propriétés mécaniques.

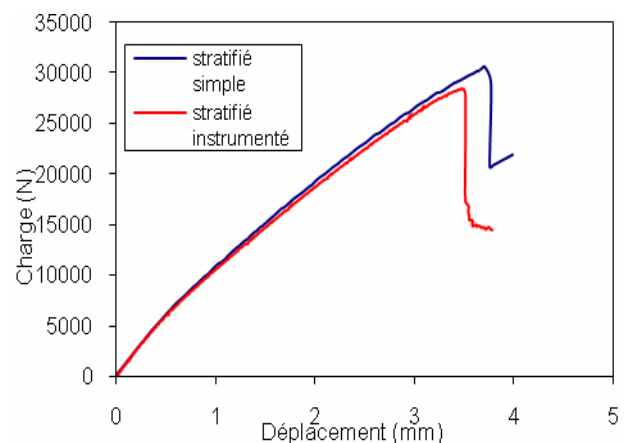


Figure 6. Courbe contrainte-déformation pour stratifié simple, (—) et stratifié instrumenté (—).

Néanmoins, l'intégration de l'instrumentation ramène une activité acoustique plus intense résumée par la figure 7, dont laquelle le nombre de coups cumulés augmente presque linéairement pour un échantillon simple, cependant des fluctuations visibles marque aussi l'activité acoustique du composite instrumenté. Ceci est plus évident par l'étude de la variation de la vitesse en fonction du temps pour le stratifié instrumenté représenté par la figure 8, dans laquelle la vitesse décroît suivant pratiquement les mêmes variations de l'EA.

Ceci est dû au fait que les défauts évolutifs nuisent à la propagation des ondes de Lamb, et leurs taux de concentration est totalement proportionnelle à la vitesse de ces derniers, on conclue que même si les pastilles piézoélectriques peuvent détecter plus facilement des états brusque, elles rassemblent aussi des informations inutiles considérés comme un bruit.

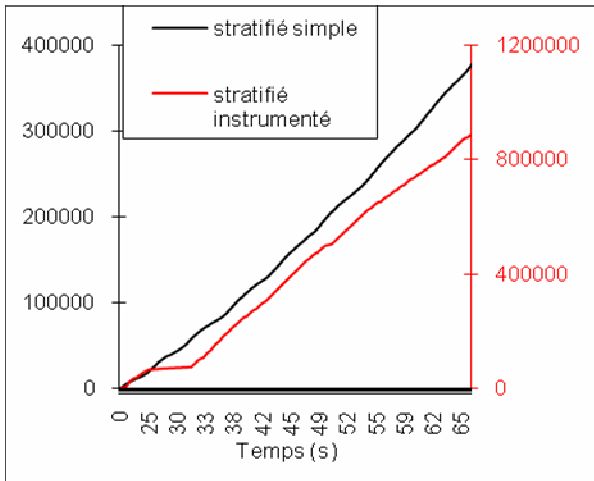


Figure 7. Représentation de l'activité acoustique pour stratifié simple (—) et stratifié instrumenté (—)

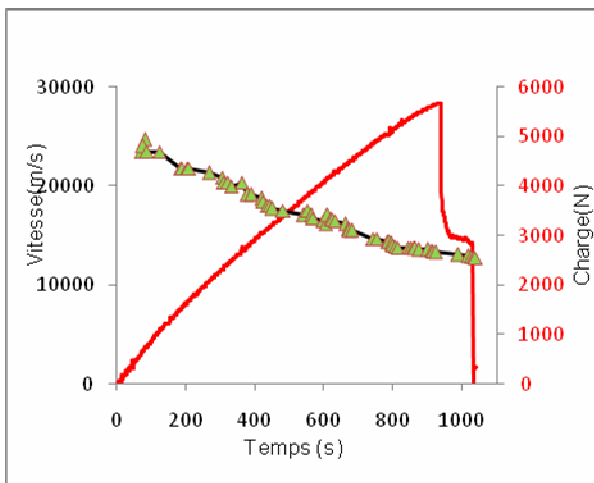


Figure 8. Evolution de la vitesse des ondes de Lamb (▲) en fonction de la contrainte (—).

5.2. Identification de la signature acoustique des sources d'endommagement: Analyse multivariable

D'après la figure 9[A], les mécanismes d'initiation de l'endommagement en statique sont associés principalement à la matrice. En effet la répartition de l'amplitude en fonction de temps, met en évidence la présence de trois classes de signaux : la première correspondant à une fissuration matricielle (type A), suivi par une décohésion fibre/matrice (type B), enfin une décohésion intralaminaires (délamination) provoque la rupture de notre échantillon simple (figure 9. [D]).

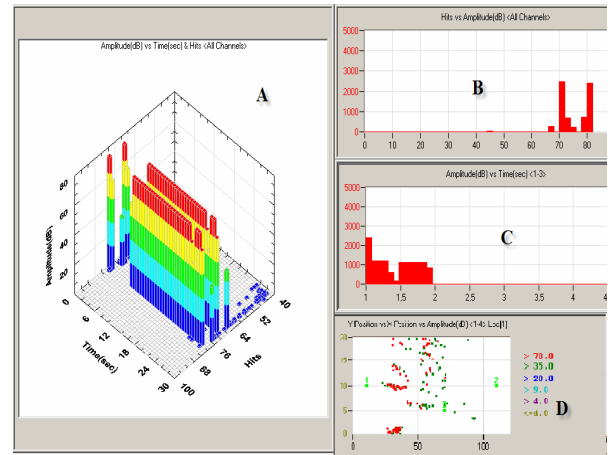


Figure 9. A) Distribution de l'amplitude en fonction du temps; B) Répartition des salves en fonction d'amplitude; C) Répartition des salves en fonction du temps; D) Evénements enregistrés et Localisation de la rupture.

Cependant, notre éprouvette instrumentée ayant des propriétés mécaniques plus faible, ne l'empêche pas de présenter une activité acoustique intense, rendant ainsi la discrétisation conventionnelle des modes d'endommagements difficile, néanmoins la figure 10[A] montre que la rupture finale du composite instrumentée est due au délaminage (figure 10[D]), en présentant un pic d'amplitude autour de 70 dB.

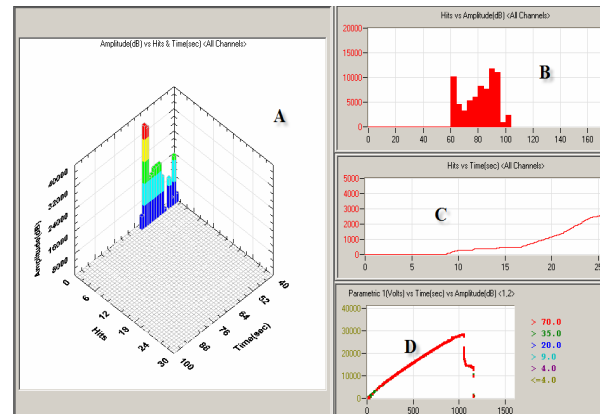


Figure 10. A) Distribution de l'amplitude en fonction du temps; B) Répartition des salves en fonction d'amplitude; C) Répartition des salves en fonction du temps; D) Evénements enregistrés et Localisation de la rupture.

5.3. Identification de la signature acoustique des sources d'endommagement: Analyse statistique (k-moyennes)

Les figures 11 et 12 montent les résultats de la classification des signaux d'EA par la technique des k-moyennes pour les mêmes échantillons. Les premières remarques concernent la répartition chronologique des modes d'endommagement. En effet, on distingue la présence des trois types d'endommagement prévus par l'analyse temporelle, sauf que la fissuration matricielle (type A) est quasiment accompagné dès le début par un détachement des fibres de la matrice ou décohésion (type B), qui est à l'origine d'une concentration de

contraintes à l'interface fibre/matrice et constitue le site privilégié de l'initiation de l'endommagement.

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 de notre composite par délaminage (type D).

Notre deuxième remarque concerne la densité des états d'endommagement, en effet d'après la figure 11, l'initiation de l'endommagement dans le stratifié simple est assuré par la fissuration de la matrice dont la forme temporelle est décrite par la figure 12, accompagner par quelques modes d'endommagements propres à la décohésion (figure 13. [B]), qui vont s'accroître pour favoriser le délaminage (figure 13. [C]) juste avant la rupture.

Cependant, le comportement du stratifié instrumenté représenté par la figure 12, met en relief l'initiation et l'évolution des fissurations intralaminaires dès le début de l'essai en parallèle avec la fissuration matricielle, ces fissures continuent à apparaître jusqu'à la provocation de la rupture. Ceci est certainement dû au fait que l'incorporation des pastilles dont les dimensions sont presque proportionnelles à celles des éprouvettes a engendré des discontinuités dans la matrice, qui ont contribué ensuite à l'initiation de l'endommagement et à une perte de rigidité de l'élément structural, provoquant ainsi un processus de décohésion plane à l'interface des couches successives du stratifié.

Notre troisième remarque concerne l'absence des défauts propre à la rupture des fibres, en contradiction directe avec la littérature, ce comportement est lié au fait que le besoin d'intégrer les pastilles piézoélectrique au sein du stratifié croisé, nous a poussé à la superposition de 16 plis unidirectionnels enrobés de résine époxyde, ce qui a mener à la perte de la rigidité de l'élément structural, favorisant ainsi le glissement entre les couches du stratifié (délaminage).

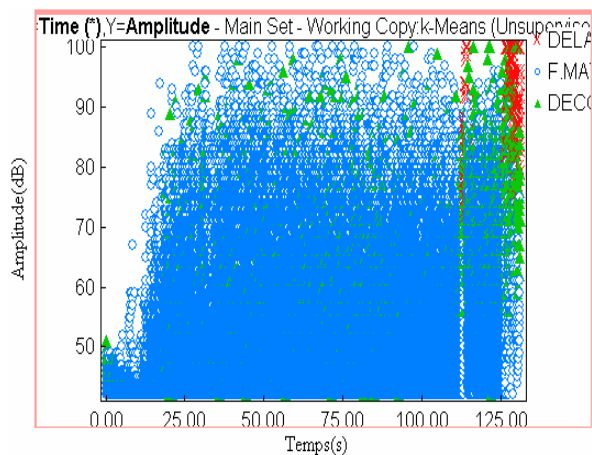


Figure 11. Séparation des données d'EA en 3 classes pour Stratifié simple

: représentation de l'amplitude en fonction du temps, (○) : fissuration matricielle, (▲) : décohésion interfaciale., (×) : délaminage.

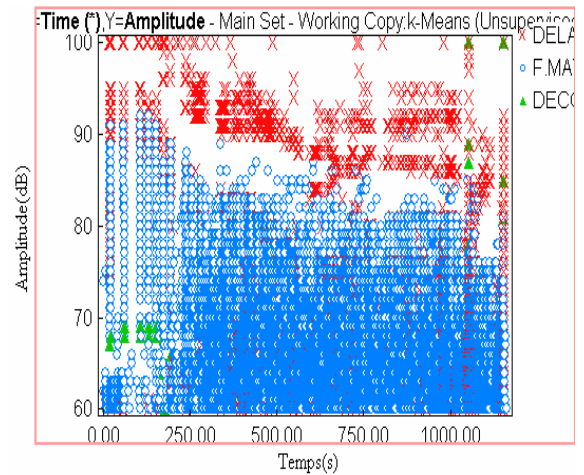


Figure 12. Séparation des données d'EA en 3 classes pour Stratifié instrumenté

: représentation de l'amplitude en fonction du temps, (○) : fissuration matricielle, (▲) : décohésion interfaciale., (×) : délaminage.

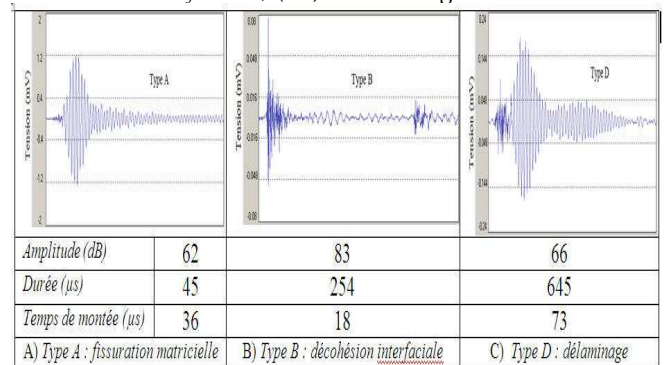


Figure 13. Représentation des formes d'ondes de signaux correspondants à chaque type d'endommagement.

6. Conclusion

L'objectif principal du travail était l'étude par émission acoustique des mécanismes d'endommagement et de la rupture des matériaux composites dit « sensibles » à base polymère.

Dans ce travail, on a montré que les pastilles piézoélectriques permettaient d'explorer différentes techniques de mesures (collecte de l'activité acoustique, propagation d'ondes de Lamb). De plus, grâce à leur faible épaisseur, on a tenté de les insérer au sein de nos échantillons composites. Un problème important demeure : L'étape particulièrement délicate de leur mise en œuvre fait engendrer des discontinuités et des défauts dans la matrice. Lorsque le matériau est soumis à des forces extérieures, ces discontinuités contribuent à l'initiation de l'endommagement et à une perte de rigidité de l'élément structural.

L'analyse et l'observation des signaux d'EA en fonction du type d'échantillon, au cours des essais, ont permis de définir les principales signatures acoustiques des modes d'endommagement prépondérants dans des matériaux composites : fissuration matricielle, décohésions, délaminage. Ces

signatures acoustiques semblent être peu influencées par la nature et par la constitution des milieux de propagation. Cette étude nous amène à formuler les conclusions propre au fait que l'intégration de l'instrumentation au sein de la composition structurale du matériau favorise la détection de l'initiation, la propagation et l'accumulation des défauts microscopiques précoces dont leurs emplacements chronologique n'étaient pas validés par la littérature, néanmoins cette performance se limite par une dégradation visible des propriétés mécaniques du matériau en question ainsi que la favorisation du délaminage comme mode responsable de la perte des composites.

Dans le cadre de la comparaison en termes de conditions d'acquisition (capteurs intégrés, et capteurs collés à la surface du matériau), les formes des signaux restent en revanche identiques pour des phénomènes semblables au sein du matériau, car elles sont directement reliées à la nature de la source de l'endommagement. La classification de signaux peut donc se faire à partir d'un ensemble de « descripteurs » choisie judicieusement.

En perspective il serait très intéressant d'utiliser l'EA combiné à une instrumentation intégrée à l'échelle industrielle et proposer aussi le développement de modèles de prévision afin de déterminer si ces endommagements macroscopiques sont critiques ou non. Ainsi qu'essayer d'identifier l'endommagement diffus par un système embarqué, qui permet aussi de résoudre les problèmes de couplage pastille structure.

REFERENCES

- [DIO 05] B. Diouf, 'Analyse statistique de l'évolution de l'endommagement dans des matériaux hétérogènes' – Thèse Université du Maine (2005).
- [GIO 98] M. Giordano, & L. Nicolais, 'An acoustic emission characterization of the failure modes in polymer-composite materials'. *Composites Science and Technology*, vol. 58 (1998) 1923–1928.
- [GUE 01] R. El Guerjouma, J.C. Baboux, D. Ducret, N. Godin, P. Guy, S. Huguet, Y. Jayet, T. Monnier, 'Non-destructive evaluation of damage and failure of fiber reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission', *Advanced Engineering Materials* 3 (2001) 601–608.
- [HUG 02] S. Huguet, N. Godin, R. Gaertner, L. Salmon, D. Villard, 'Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester', *Composites Science and Technology*, 62, (2002)1433–1444
- [JAY 96] Y. Jayet, N. Saint-Pierre, J. Tatibouet and D. Zellouf, 'Monitoring the hydrolytic degradation of composites by a piezoelectric method *Ultrasonics*', 34, (1996), 397–400.
- [LIK 03] A. Likas, N. Vlassis, J. Verbeek, 'The global k-means clustering algorithm', *Pattern Recognition* 366 (2) (2003) 451–461.
- [MAR 07] A. Marec, J.-H. Thomas, R. E. I. Guerjouma, 'Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data', *Mechanical Systems and Signal Processing*, (2007)
- [MON 00] T. Monnier, Y. Jayet, P. Guy and J. C. Baboux, 'The piezoelectric implant method: implementation and practical applications', *Smart Mater. Struct.* 9 (2000) 267–272.
- [NEC 05] H. Nechad, A. Helmstetter, R. El Guerjouma, D. Sornette, 'Creep ruptures in heterogeneous materials', *Physical Review Letters* 94, (2005).
- [ONO 94] K. Ono, Q. Huang, 'Pattern recognition analysis of acoustic emission signals, in: *Progress in Acoustic Emission VII*', The Japanese Society for NDI, 1994, pp. 69–78.
- [SAI 98] N. Saint-Pierre, Y. Jayet, P. Guy and Baboux, 'Ultrasonic evaluation of dispersive polymers by the piezoelectric embedded element method: modelling and experimental validation *Ultrasonics*', 36, (1998), 783–8.
- [SAI 96] N. Saint-Pierre, Y. Jayet, I. Perrissin-Fabert and J. C. Baboux 'Influence of bonding defect on the electric impedance of a piezoelectric embedded element', *J. Phys. D: Appl. Phys.* 29, (1996), 2976–82.
- [YOO 00] D.-J. Yoon, W. Weiss, S.P. Shah, 'Assessing damage corroded reinforced concrete using in acoustic emission', *Journal of Engineering Mechanics* (2000) 273–283.