

L'utilisation de l'émission acoustique pour le suivi d'essais dynamiques

The use of acoustic emission for monitoring dynamic tests

Anthony Foulon¹, Julien Berthe², Alain Proust¹

1 : MISTRAS GROUP
27 rue Magellan 94370 Sucy en Brie
e-mail : anthony.foulon@mistrasgroup.com et alain.proust@mistrasgroup.com

2 : DMAS, ONERA
F-59014 Lille
e-mail : julien.berthe@onera.fr

Résumé

L'utilisation de matériau composite dans l'industrie est de plus en plus importante notamment dans le domaine aéronautique. L'utilisation de ces matériaux nécessite une compréhension de leur comportement mécanique et de leur mode d'endommagement. Habituellement les tests mécaniques réalisés sont instrumentés par différentes techniques afin d'en tirer le maximum d'information et notamment l'émission acoustique (EA). Cette technique est très adaptée aux essais mécaniques quasi-statique et de fatigue à faible fréquence pour déterminer l'apparition des premiers endommagements. Cependant lorsque les vitesses de sollicitation augmentent, l'acquisition sous forme de signaux transitoires devient compliquée. La technique proposée dans l'article repose sur la fonction streaming. Cette fonction enregistre un seul intervalle de temps sans tenir compte d'un seuil d'acquisition. Celui-ci est ensuite « redécoupé » et de nouveaux paramètres sont alors calculés. L'utilisation de ce traitement nous a permis d'étudier le comportement d'éprouvette en carbone époxy pour des vitesses de sollicitation allant de 5 mm/min à 500 mm/min. Deux seuils d'endommagement ont été définis et leurs évolutions en fonction des vitesses de sollicitation ont été caractérisés.

Abstract

The use of composite material in industry is more and more important especially in the aeronautical field. The use of these materials needs an understanding of their mechanical behavior and in particular the damage mechanisms. Usually the mechanical testing performed on this material is instrumented with different techniques like acoustic emission in order to get the maximum information. Acoustic Emission is very efficient for quasi-static and low frequency fatigue mechanical testing to determine the appearance of the first damage. Nevertheless, when the strain rate is increasing, acquisition of transient signal becomes difficult. In this paper we propose a method based on AE streaming acquisition. This acquisition mode allows us to obtain only one great time sampling without threshold effect. This signal is then "cut" and new genuine features are processed. The use of this method allowed us to study the behavior of epoxy carbon composite specimen during dynamic testing (5 mm/min to 500 mm/min). Two criteria based on the energy have been identified and studied in function the loading rate.

Mots Clés : Emission acoustique, Caractérisation mécanique, essais dynamiques

Keywords: Acoustic emission, mechanical characterization, dynamic tests

1. Introduction

L'analyse et la caractérisation des endommagements des matériaux composites sont des sujets largement traités durant les dernières années. Diverses techniques de mesure sont couramment utilisées pour parvenir à évaluer les différents types d'endommagements : jauges de déformation, thermographie infrarouge, corrélation d'image (CIN), observations MEB,... Ces techniques généralement couplées entre-elles permettent d'obtenir des informations satisfaisantes sur des essais statiques et/ou fatigue avec des fréquences de sollicitation relativement basses. Leurs utilisations deviennent cependant difficiles lorsque l'on commence à étudier le comportement de ces matériaux à des vitesses de déformation intermédiaires ou élevées.

Dans le cas de notre étude, nous allons proposer une stratégie d'acquisition et traitement spécifique de l'Emission Acoustique afin d'en tirer des informations significatives lors de ces essais à vitesse intermédiaire car les signaux d'endommagement se superposent dans le temps.

2. Matériaux techniques et méthodes

2.1 Matériau

Le matériau utilisé pour l'étude est un composite Carbone/Epoxy (T700/M21) avec une stratification $[+/- 45^\circ]_s$.

Des éprouvettes rectangulaires ont été découpées avec les dimensions suivante :

$$L \sim 130 \text{ mm} ; l \sim 15 \text{ mm} ; ep \sim 1 \text{ mm}$$

2.2 Essais mécaniques

Les essais ont été réalisés sur un vérin hydraulique Schenck (Fig. 1). Celui-ci est piloté en déplacement pour les basses vitesses jusqu'à 0,1 m/s. A ces vitesses-là, l'essai ne dure que quelques millisecondes.

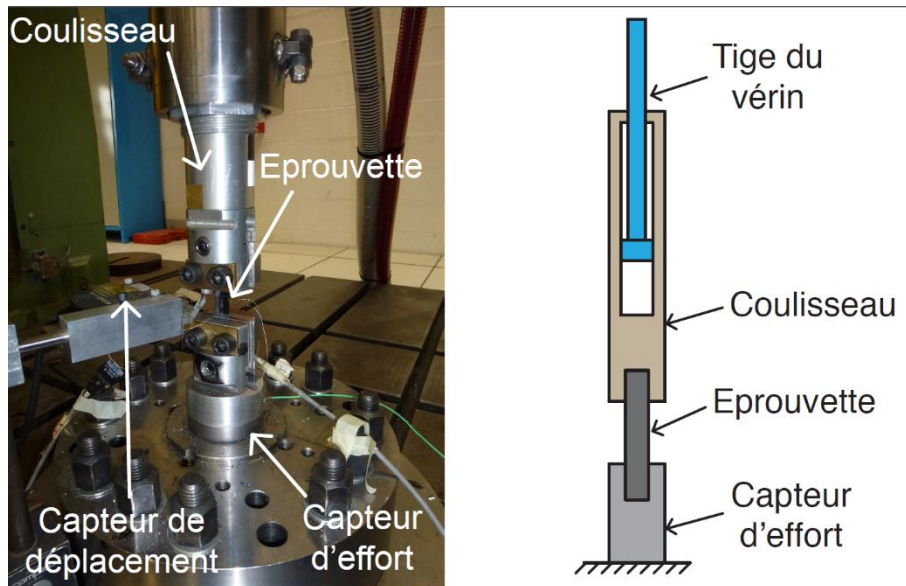


Fig. 1 : Photo et schéma du montage dynamique.

En plus de l'émission acoustique, les essais sont suivis par Jauges de déformation (1 jauges longitudinale et 1 jauge transversale). La mesure d'effort est réalisée à l'aide d'une cellule piézoélectrique Kistler. L'acquisition des paramètres mécaniques est réalisée à l'aide d'un système Dewetron avec une fréquence d'acquisition maximale de 1 MHz.

2.3 Emission acoustique

La norme européenne EN 1330-9 [1] appelle Emission Acoustique (EA), le phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant des micro-déplacements locaux internes au sein d'un matériau soumis à sollicitation.

Les matériaux composites sont très émissifs. J. Roget [2] liste les mécanismes sources particuliers pour ces matériaux :

- les ruptures de fibres ;

- les décohésions fibre-matrice ;
- les fissurations de la matrice ;
- des phénomènes plus macroscopiques (propagation de fissure).

Cette technique de contrôle non destructif est déjà utilisée dans les domaines des appareils à pression. Elle permet ainsi d'apporter une solution industrielle à l'évaluation de l'intégrité des structures composites (qualification à l'état neuf, inspection en service) [3].

L'utilisation de l'EA pour des essais de laboratoire permet la détermination du premier endommagement mais également la caractérisation des différents endommagements et ceci en temps réel [4] [5] [6] [7].

Cependant, peu d'études existent sur le suivi d'essai dynamique ou celles-ci sont peu explicites sur la méthode utilisée [8].

Dans le cadre de ces essais, le matériel d'acquisition des signaux d'EA utilisé est un système MISTRAS avec une carte d'acquisition 2 voies PCI2. Les capteurs miniatures utilisés sont des nano 30 (gamme d'utilisation 125 – 750 kHz).

Lors des essais à vitesses de déformation intermédiaires, la fonction streaming est principalement utilisée. Le « streaming » consiste en l'enregistrement complet du signal brut en sortie des capteurs après pré-amplification. On se retrouve donc avec une « grande forme d'onde » qui décrit la totalité de l'essai sans effet de seuil de détection. Ce signal brut va ensuite être traité à l'aide du logiciel NOESIS développé par MISTRAS. Celui-ci va « découper » le signal brut en plusieurs segments de temps de durée fixe (ici 204,6 μ s). L'étude de ces « segments » devra nous permettre d'évaluer l'apparition de l'endommagement de l'éprouvette (Fig 2)

La caractérisation de phénomènes « rapides » peut présenter certaines difficultés. La technique proposée a par exemple été utilisée pour des essais de caractérisation de grenailage de précontrainte sur matériau métallique [10]. Le but étant de caractériser la saturation et le taux de recouvrement pour différentes conditions de grenailage à l'aide d'un capteur d'EA.

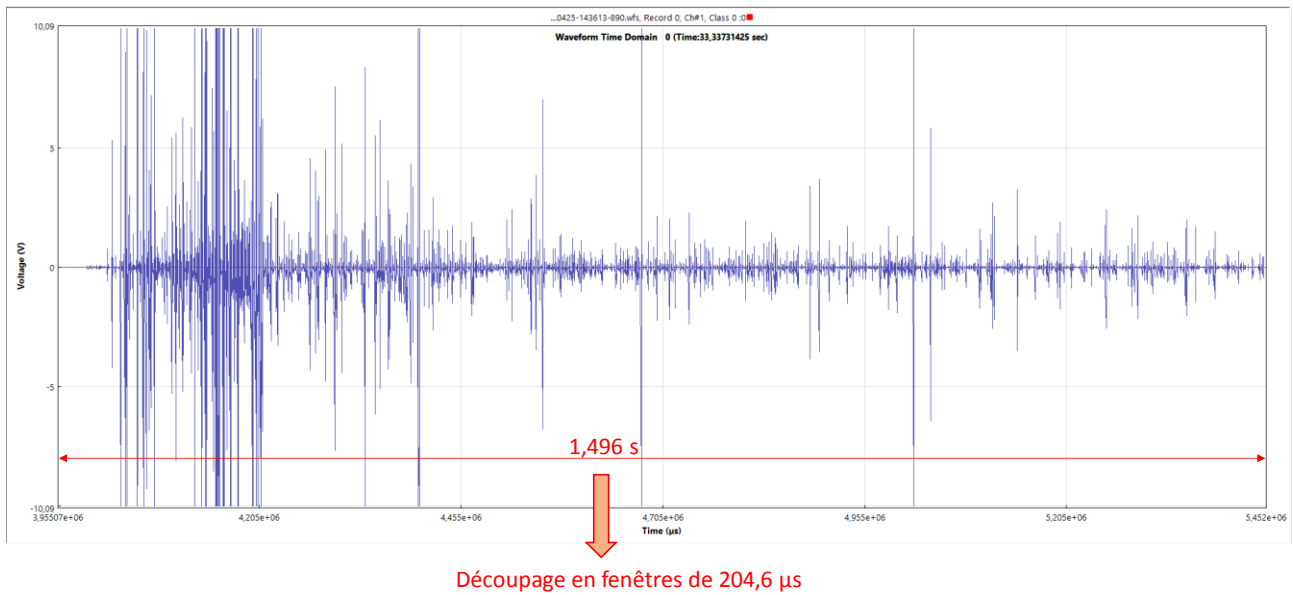


Fig. 2 . Traitement réalisé sur le signal de streaming enregistré durant l'essai.

L'apparition du premier endommagement et du macro-endommagement pour ces matériaux composites sollicités à grande vitesse seront déterminées à partir de l'étude de l'intensité acoustique (cumul en énergie).

3. Essais réalisés

Des essais à différentes vitesses ont été menés. Les essais sont réalisés pour des vitesses de 50 mm/min et 500 mm/min. Des essais quasi-statiques (5 mm/min) sont également effectués afin d'avoir une référence sur l'endommagement en statique de ce matériau.

Vitesses de déformation	Nbr D'éprouvettes
5 mm/min	2
50 mm/min	2
500 mm/min	2

Tab. 1 Tableau présentant les essais réalisés

Les éprouvettes sont instrumentées par 2 capteurs Nano 30 espacés de 3 cm sur une face et de jauges de déformation sur l'autre face (Fig.3). Le couplage et la fixation sont assurés par une colle silicone.

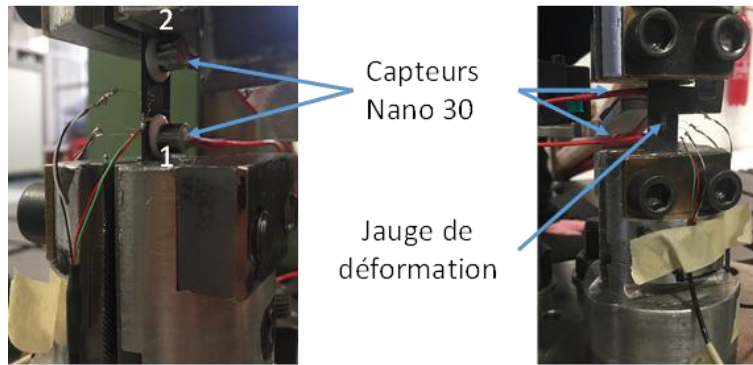


Fig. 3 : Positionnement des capteurs sur l'éprouvette.

4. Résultats

4.1 Traitement des signaux de streaming

Sans l'utilisation du traitement du streaming, les signaux d'EA enregistrés traditionnellement à partir d'un seuil durant l'essai sont peu nombreux et très long (0,1s) par rapport à la durée de l'essai. Les courbes d'intensité acoustique (énergie cumulée en fonction du temps) sont alors tracées avec peu de résolution et nous nous retrouvons avec des difficultés d'interprétation des résultats (Fig. 4).

Le traitement par NOESIS des signaux streaming, nous permet de gagner de la définition. Ainsi des valeurs « d'Absolute Energy » sont calculées pour ces nouveaux signaux permettant d'obtenir une courbe d'intensité acoustique avec plus de définition (Fig. 5) même si le découpage temporel est arbitraire.

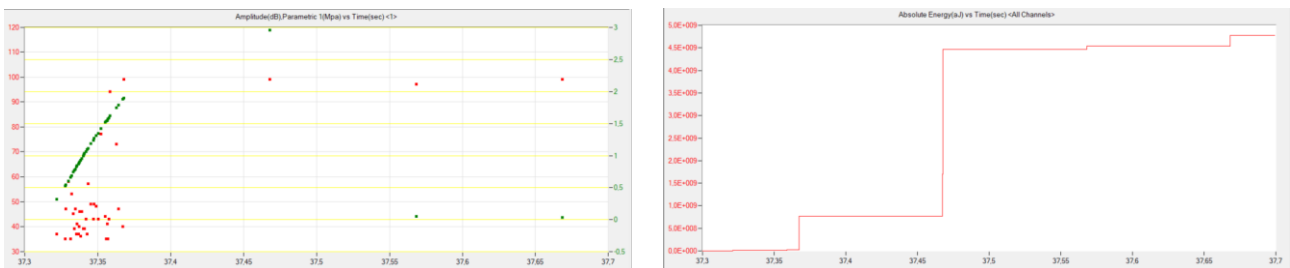


Fig. 4 : Amplitude des salves et Intensité Acoustique pour les essais à 500 mm/min avant traitement NOESIS.

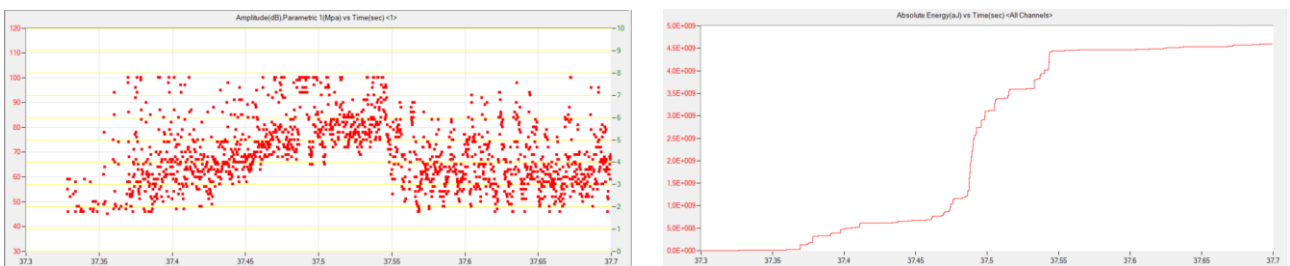


Fig. 5 : Amplitude des signaux redécoupés et Intensité Acoustique cumulée pour les essais à 500 mm/min après traitement NOESIS.

4.2 Identification des seuils d'endommagement

Deux seuils d'endommagement sont définis dans l'analyse des essais. Les seuils sont établis à partir de la courbe d'intensité acoustique (Energie cumulée des signaux EA en fonction du temps). Le premier seuil est défini lors de l'apparition des premiers signaux d'énergie significative. L'intensité acoustique tend à se stabiliser après l'apparition de ces premiers signaux d'EA.

Le deuxième seuil est basé sur l'apparition macro-endommagement. Celui-ci précède généralement de peu la rupture complète de l'éprouvette.

Ces seuils d'endommagement déterminés en temps à l'aide de la courbe d'intensité acoustique sont exprimés en contrainte de Traction σ_{xx} et de Cisaillement σ_{12} .

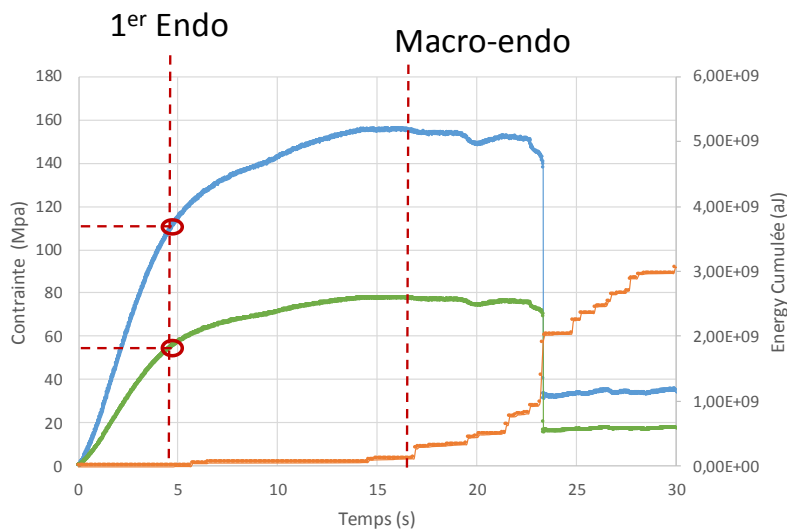


Fig 6 : Identification des seuils d'endommagement sur l'éprouvette 2 des essais quasi-statique (5 mm/min).

4.3 Comparaison des différents essais

La détermination des différents seuils d'endommagement a été réalisée sur tous les essais. Lorsque la vitesse de déformation est plus grande (50 et 500 mm/min), l'utilisation du streaming a été nécessaire. Pour ce qui est du premier endommagement, sa valeur d'apparition semble relativement stable en fonction de la vitesse de sollicitation (Tab.2 Fig. 7). On notera également une bonne répétabilité des résultats.

Vitesses de déformation		Seuil σ_{xx} (MPa)	Seuil σ_{12} (MPa)
5 mm/min	1 ^{er} Essai	137,94	68,971
	2 ^{ème} Essai	112,03	56,01
50 mm/min	1 ^{er} Essai	124	62
	2 ^{ème} Essai	102	51
500 mm/min	1 ^{er} Essai	99,49	49,745
	2 ^{ème} Essai	112,83	67,13

Tab. 2 : Tableau présentant la valeur des différents seuils de premier endommagement par EA.

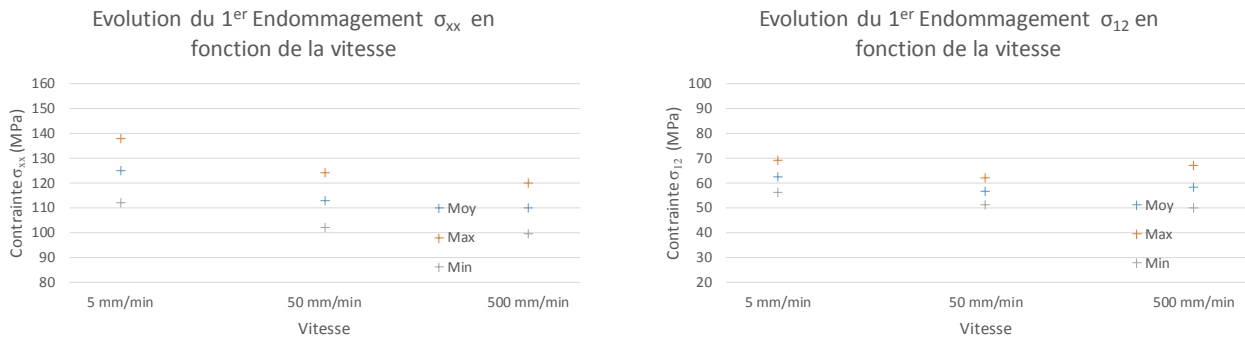


Fig. 7 : Evolution de l'apparition du seuil de premier endommagement par EA en fonction de la vitesse de déformation.

Concernant l'apparition du macro-endommagement, on observe une augmentation du seuil de macro-endommagement déterminée par EA lorsque la vitesse de déformation est plus élevée.

Vitesses de déformation		Seuil σ_{xx} (MPa)	Seuil σ_{12} (MPa)
5 mm/min	1 ^{er} Essai	137,688	68,8438
	2 ^{ème} Essai	155	77,5
50 mm/min	1 ^{er} Essai	157,809	78,9044
	2 ^{ème} Essai	153,237	76,6187
500 mm/min	1 ^{er} Essai	172,763	86,3814
	2 ^{ème} Essai	163,87	81,93

Tab. 3 Tableau présentant la valeur des différents seuils du macro-endommagement par EA .

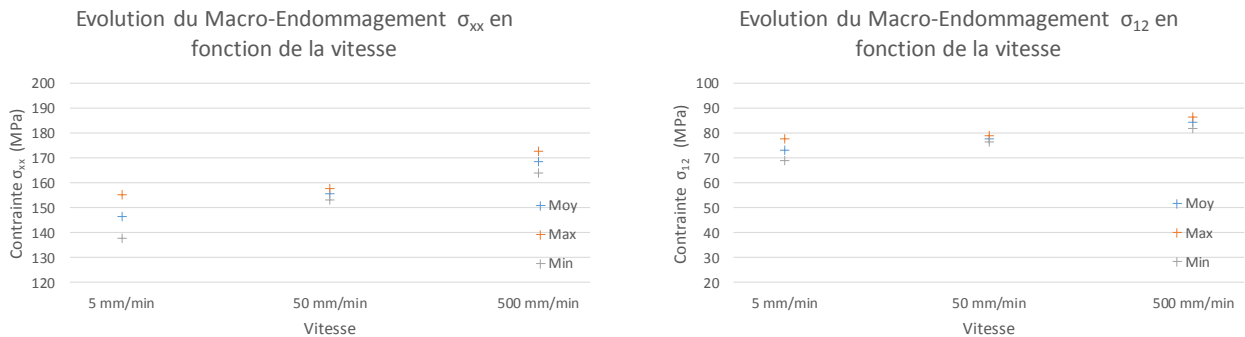


Fig. 8 : Evolution de l'apparition du seuil de macro-endommagement par EA en fonction de la vitesse de déformation.

5. Conclusion et perspectives

Ces essais nous ont permis de valider l'utilisation du streaming et la stratégie de traitement du signal pour l'analyse des signaux d'émission acoustique lors d'essais dynamiques. Durant ces tests, il a clairement été montré l'intérêt indéniable de cette méthode, sans laquelle les essais à 500 mm/min n'auraient pu être exploitables en émission acoustique. Ces résultats prometteurs montrent la possibilité d'aller à une vitesse supérieure sans perte d'information. Cette méthode pourrait être applicable sur d'autres types d'essais, comme des essais de chocs.

Deux seuils d'endommagement ont été définis par EA à partir de la courbe en intensité recalculée. Un seuil de premier endommagement et un seuil de macro-endommagement sont proposés. L'étude

de ces seuils pour les différentes vitesses de déformation montre deux tendances distinctes. Une valeur qui évolue peu pour le seuil de premier endommagement avec la vitesse de sollicitation et une augmentation du seuil de macro-endommagement avec cette même vitesse. Ces évolutions montrent bien le caractère visco-endommageable du matériau. Il serait nécessaire de dupliquer ces essais afin de valider les résultats obtenus sur un échantillon plus important. La mise en place d'essais interrompus est également intéressante afin de caractériser la qualité des seuils vis-à-vis des endommagements observés dans le matériau même si cela semble difficile à grande vitesse.

J. Berthe a développé une technique de détection d'apparition de fissure et sa propagation par caméra Infra-rouge (IR) sur des éprouvettes [0/90°]s lors d'essais à haute vitesse (5, 50, 500 mm/min). Il serait intéressant de coupler les techniques afin de pouvoir détecter par EA les fissures et les localiser par IR.

Références

- [1] EN 1330-9 Essais non destructifs - Terminologie – Partie 9 : termes utilisés en contrôle par émission acoustique.
- [2] J. Roget, « Emission acoustique ». Technique de l'ingénieur, R 3200, pp. 1-10
- [3] “Guide des bonnes pratiques pour le contrôle par Emission Acoustique des équipements sous pressions » AFIAP Association Française des Ingénieurs en Appareil à Pression, Editeur SADAVE, Annexe 7 édition 2016
- [4] S. Barre, M. L. Benzeggagh, « On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene », Composite science and technology, n°152, pp. 369-376, 1994
- [5] A.Monti, A. El Mahi, Z. Jenli, L. Guillaumat, « Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission », Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 90, pp. 100-110, 2016
- [6] A. Proust, H. Wagnier, R. Harry, T. Lorriot, JC. Lenain, “Détermination d'un critère d'amorçage du délaminage au sein d'un matériau composite à l'aide de la technique d'émission acoustique », Matériaux 2006, 13-17 novembre, Dijon, 2006.
- [7] S. Huguet, « Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère ». Thèse, INSA de Lyon, 2002
- [8] S. C. Woo, T. W. Kim, “ High strain-rate failure in carbon/Kevlar hybrid woven composites via a novel SHPB-AE coupled test”, Composites Part B: Engineering, Vol 97, pp. 317-328, 2016
- [9] A. PROUST ; Q. PUYDT ; Shot peening monitoring with Acoustic Emission; Conférence MATERIAUX 2018 – 19-23 Novembre 2018 – Strasbourg