

Modélisation de l'Emission Acoustique : aide à l'identification de paramètres pertinents pour décrire l'endommagement des matériaux composites

Acoustic Emission modeling from the source to the detected signal: model validation and identification of relevant descriptors

T. LE GALL¹, N. GODIN¹, T. MONNIER², C. FUSCO¹

1 : Université de Lyon, INSA de Lyon, MATEIS UMR5510, F-69621 Villeurbanne, France

2 : Université de Lyon, INSA de Lyon, LVA EA 677, F-69621 Villeurbanne, France

Résumé

L'Emission Acoustique (EA) est une méthode d'évaluation et de caractérisation non destructive particulièrement bien adaptée pour identifier la cinétique des différents mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites. Le but de cette étude est de quantifier l'impact du milieu de propagation notamment de la géométrie sur les caractéristiques du signal d'EA afin de déterminer les descripteurs pertinents, images du mécanisme d'endommagement. Pour cela une modélisation allant de la source au signal enregistré est effectuée à l'aide du code d'éléments finis ABAQUS® pour différentes géométries allant du mini composite à la pièce semi-technologique

Abstract

Acoustic Emission (AE) testing is a non-destructive evaluation method which is especially suited for structural health monitoring in composite materials in order to identify the acoustic signatures of several damage mechanisms. The objective of the present study is to quantify the impact of the propagation media, particularly the samples geometry, on AE signal's characteristics. As a consequence, it will be easier to determine which parameters are the most relevant to describe the damage mechanism. For this purpose, using finite element simulation software ABAQUS®, sources representing AE sources were generated inside the material for geometry ranging from mini-composite to technological devices.

Mots Clés : Emission acoustique, endommagement, descripteurs, modélisation

Keywords : Acoustic emission, damage mechanisms, descriptors, modelling

1. Introduction

Les matériaux composites étant de plus en plus utilisés pour des applications longue durée, il est nécessaire de connaître leurs mécanismes d'endommagement afin de prévoir leur durée de vie [1]. Permettant de détecter en temps réel les mécanismes d'endommagement, la technique d'émission acoustique (EA) apparait alors comme bien adaptée pour répondre à cette problématique. En effet, les évènements se produisant au niveau microscopique (rupture de fibre, fissuration matricielle, décohésion fibre/matrice, délaminage, etc.) donnent naissance à une onde élastique qui se propage jusqu'à la surface du matériau. En y positionnant un capteur, il est alors possible de mesurer le déplacement engendré par la propagation de l'onde. On peut ainsi récupérer des informations sur le mécanisme source à l'origine de cette onde. Expérimentalement, on émet l'hypothèse que deux sources différentes, d'un point de vue mécanique, conduisent à deux signaux mesurés différents. Le signal est caractérisé à l'aide de descripteurs issus des formes d'onde. Grâce à des algorithmes de classification, les signaux sont structurés en classes pouvant correspondre aux différents mécanismes d'endommagement [2]. Cependant, au cours de sa propagation, l'onde issue de la source subit de nombreuses transformations. Le signal est d'abord fortement modifié par le milieu de propagation [3] (déphasages, réflexions, séparation de modes, distorsion due à la dispersion), puis par le système d'acquisition. L'interprétation d'un signal d'EA apparait dans ce contexte particulièrement difficile:

comment différencier ce qui est caractéristique de la source de ce qui provient des transformations liées à la propagation et à l'acquisition ? Pour répondre à cette question, une étude expérimentale seule n'est pas suffisante, il faut avoir recours à la modélisation [4-5]. Une partie de la réponse à ces questions réside dans la prise en compte des étapes de transformation du signal d'EA. C'est l'objectif de l'approche quantitative de l'EA. Cette approche repose sur l'utilisation de techniques de modélisation pour évaluer l'impact de chaque étape de transformation sur le signal. L'objectif de cette étude est de simuler, la fissuration dynamique et la propagation des ondes acoustiques. Le but est d'établir un lien fort et explicite entre l'évènement mécanique (rupture d'une fibre, décohésion, fissuration matricielle, délaminage), l'état de la matière (niveau d'endommagement) et le signal mesuré par le capteur (Fig. 1).

Dans cet article, nous étudierons plus précisément l'influence de la géométrie du milieu de propagation sur le signal d'EA et sur les descripteurs pertinents en ayant recours à la simulation numérique par éléments finis [6].

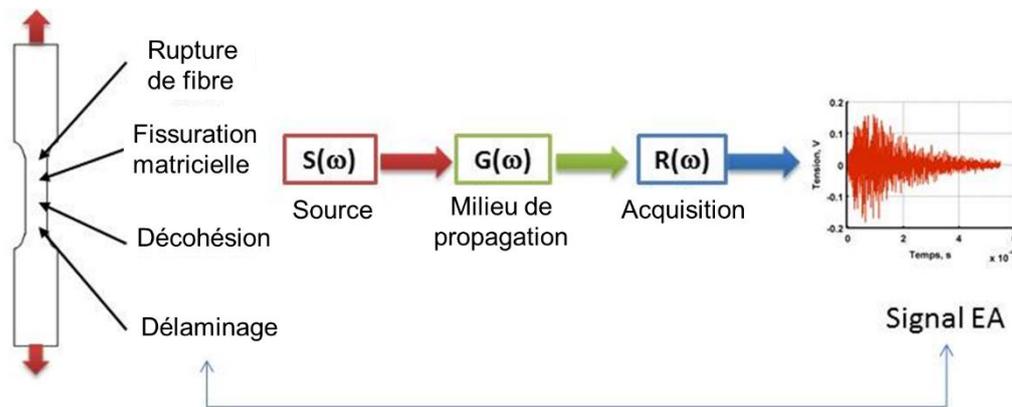


Fig1 : Les différents éléments de la chaîne de modélisation de l'émission acoustique.

2. Simulation : Milieu de propagation et sources

Pour étudier l'influence de la géométrie du milieu de propagation sur les paramètres d'EA, une simulation par éléments finis est réalisée à l'aide du logiciel ABAQUS® pour des éprouvettes de différentes géométries (Fig. 2). L'épaisseur est de 3.7 mm. Les différentes géométries représentent le matériau à l'échelle du mini-composite (EPL 3), à l'échelle composite (éprouvette classique de traction EPL 16) et en dernier à l'échelle d'une « pièce semi-technologique » (EPL80). Les éprouvettes sont modélisées en 3 dimensions. L'analyse a été réalisée en dynamique explicite, le calcul explicite étant mieux adapté pour simuler les phénomènes de propagation d'onde. Dans une première approximation, le matériau est considéré homogène, isotrope. Les éléments 3D hexagonaux, d'une taille de 400 μm , C3D8R ont été utilisés pour le maillage. L'amortissement est modélisé par l'introduction de coefficients de Rayleigh. La validation des conditions de calcul a été réalisée par comparaison avec des signaux obtenus après rupture de mines de crayons [6]. L'effet capteur est introduit grâce à l'aide d'une fonction de transfert basée sur la sensibilité des capteurs en réception mesurée par la méthode de réciprocité [7]. Les sensibilités de deux capteurs (un capteur PAC $\mu 80$ et un capteur PAC R15) sont mesurées par réciprocité. Les signaux (vitesses particulières en surface), filtrés entre 10 kHz et 1,2 MHz, sont convolués par la réponse impulsionnelle des capteurs.

Le système d'acquisition a aussi un impact sur le signal puisqu'il filtre les signaux enregistrés. Le préamplificateur, positionné en début de chaîne, filtre les données à l'aide d'un filtre passe-bande du second ordre (pente de 12 dB/octave). Deux bandes passantes sont analysées, une première comprise entre 20 kHz et 1,2 MHz et une seconde comprise entre 100 kHz et 400 kHz. Le système d'acquisition

filtre lui aussi les données à l'aide d'un filtre passe-bande du quatrième ordre (pente de 24 dB/octave). Seul l'effet du préamplificateur est étudié.

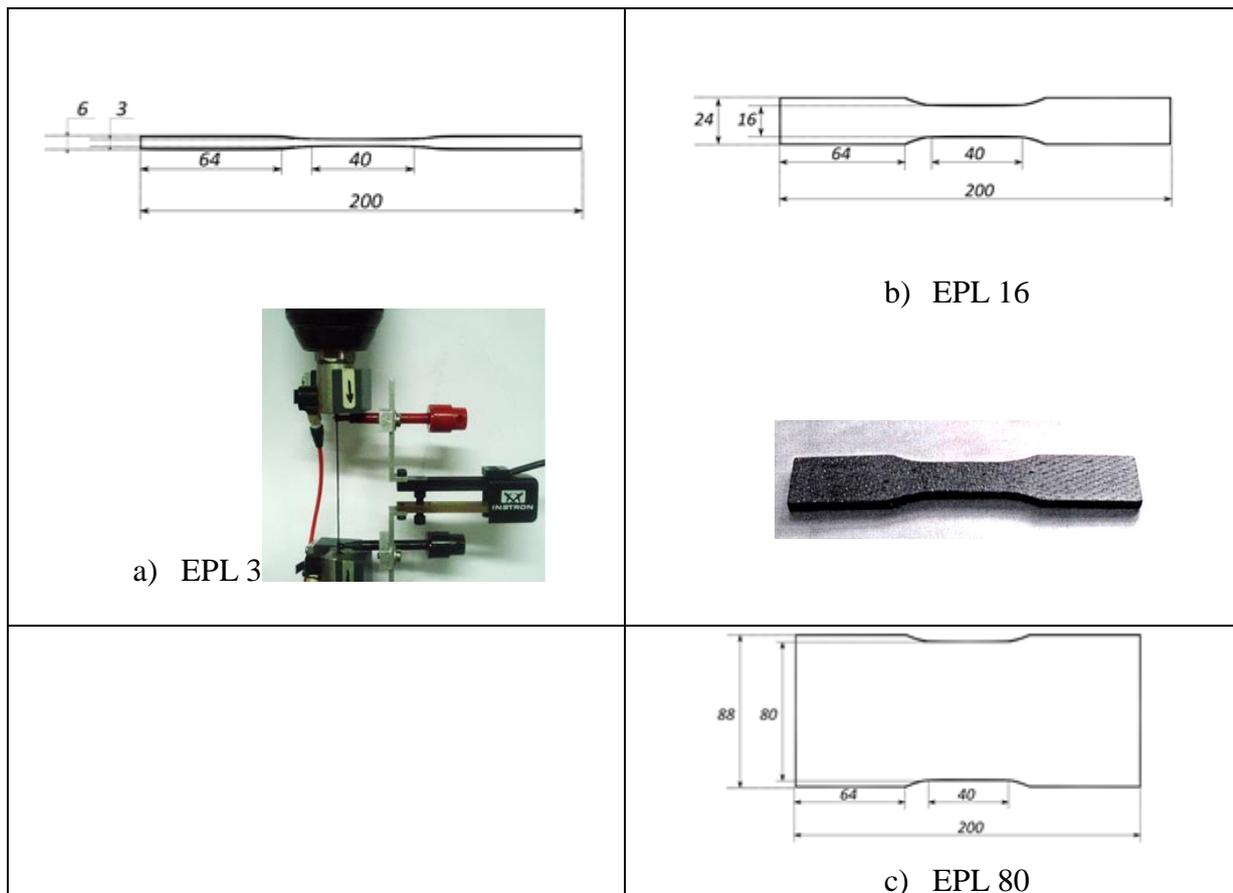


Fig. 2 – Différentes géométries d'éprouvettes simulées. Les dimensions sont en millimètres.

Dans un premier temps, les éprouvettes des trois géométries sont excitées par un chirp généré en surface, afin d'exciter un maximum de modes et de fréquences d'une bande fréquentielle allant jusqu'à 1.2 MHz. Cette simulation permettra de définir les différents modes de propagation en fonction de la géométrie de l'éprouvette.

Dans un deuxième temps, deux sources ponctuelles sont simulées dans l'épaisseur des éprouvettes, au milieu de la largeur et dans la zone utile. Bien que les sources réelles d'EA soient plus complexes, dans ce travail elles seront réduites à des sources ponctuelles modélisées par des dipôles de forces. Deux sources sont considérées (Fig. 3) a) la source S1 représente une fissure mode I située dans le plan médian de l'éprouvette b) La source S2 représente une fissure mode II qui se situe en dehors du plan médian. La source S1 est composée d'un dipôle de force d'amplitude $500 \text{ N} \cdot \mu\text{m}$ dans la direction x et de deux autres dipôles dans les directions y et z dont l'amplitude est divisée par deux. La source S2 est moins énergétique.

Certains phénomènes d'endommagement sont plus rapides que d'autres, les deux sources d'EA sont différenciées par rapport à leur temps de montée. Une source libérant de l'énergie rapidement (phénomène fragile) aura un temps de montée court alors qu'une source libérant de l'énergie lentement (phénomène ductile) aura un temps de montée long. La source S1 présente un temps de montée court par rapport à la source S2.

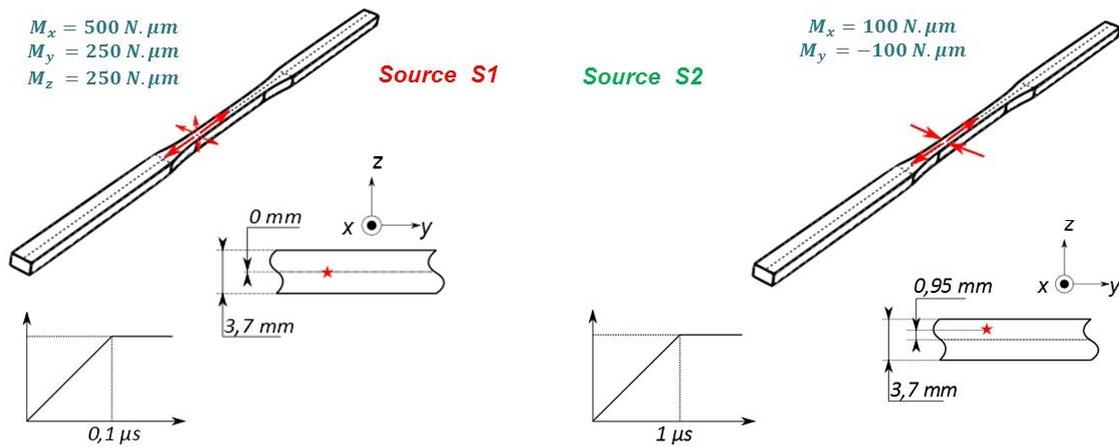


Fig. 3. Principales caractéristiques des sources S1 et S2

3. Résultats et discussion

La vitesse particulière est calculée à la surface de l'éprouvette en allant de l'épicentre de la source à l'extrémité de l'éprouvette dans le sens de la longueur. Dans un premier temps, la réponse fréquentielle du capteur n'est pas prise en compte. Les résultats sont représentés à l'aide d'une transformée de Fourier 2D. Cette représentation (nombre d'ondes en fonction de la fréquence) va permettre de visualiser les modes de propagation activés par les différentes sources.

3.1 Identification des modes excités dans les différentes géométries

La figure 4 représente les résultats obtenus pour les éprouvettes des trois géométries excitées par un « chirp ». Pour une même source large bande, les signaux propagés sont influencés par le milieu de propagation et notamment par sa géométrie. Dans le cas des éprouvettes EPL 80 et EPL 3, les modes de propagation se superposent respectivement aux courbes de dispersion d'une plaque et d'une poudre. Dans les géométries étudiées, le signal ne peut se propager que selon des modes bien déterminés :

- pour l'éprouvette de plus grande géométrie EPL 80, ce sont les modes de plaque qui se propagent sous la forme de modes symétriques (S) et antisymétriques (A).
- pour l'éprouvette EPL 3 représentant un mini composite ce sont les modes de poutre, avec les modes de torsion (T), longitudinaux (L) et de flexion (F).
- pour l'éprouvette de traction classique EPL 16: les modes de propagation ne sont ni des modes de plaque ni de poutre. La transformée de fourrier est beaucoup plus complexe L'identification des modes est quasiment impossible. Ce résultat met en évidence une difficulté pour l'interprétation des résultats obtenus pour cette géométrie en analyse modale.

3.2 Identification des descripteurs pertinents pour deux sources, fissure Mode I et mode II, en surface matériau

L'objectif des simulations est de définir un ensemble de descripteurs pertinents : descripteurs caractéristiques de la source, non impactés par la géométrie ni par la distance de propagation.

Les signaux sont fenêtrés avant le calcul des descripteurs. Le début du signal est déterminé à l'aide d'un seuil. La fin du signal est déterminée à l'aide d'un critère énergétique.

L'analyse des transformées de Fourier 2D met en évidence des différences pour les deux sources dans les modes excités (Fig. 5). La FFT2D des signaux générés par la source S1 ne montre pas de sollicitation du mode A0 ou de flexion, ni des autres modes antisymétriques. Seuls les modes symétriques sont sollicités ce qui indique que la source est positionnée dans le plan médian de

l'éprouvette. Enfin, on observe des sollicitations importantes aux hautes fréquences, ce qui indique un évènement libérant de l'énergie rapidement.

La FFT2D des signaux générés par la source S2 montre que le mode A0 ou de flexion est sollicité indiquant que la source est située dans un plan décalé par rapport au plan médian.

Le contenu fréquentiel est de plus basse fréquence que celui de la source S1 ce qui indique bien un évènement dont la libération d'énergie est plus lente.

La position de la source dans l'épaisseur des éprouvettes influe très nettement sur les modes sollicités, plus elle est positionnée dans un plan proche des faces extérieures de l'éprouvette, plus les modes antisymétriques (ou de flexion) sont excités. En évaluant l'intensité relative des modes A0 et S0 ou F11 et L01, il serait donc possible d'avoir des informations sur la position de la source dans l'épaisseur de l'éprouvette. De même, le temps de montée de la source a clairement une influence sur les plages de fréquences sur lesquelles les modes sont sollicités. Plus le temps de montée de la source est faible, plus les modes sont excités à des fréquences élevées.

Sur le signal numérique, un certain nombre de descripteurs dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel sont calculés (Fig. 6 et Fig 7). Pour le signal calculé en surface matériau, certains descripteurs comme l'amplitude, l'énergie ou le temps de montée sont très affectés par la distance propagation et par la géométrie. L'amplitude du signal diminue avec la distance (Fig. 6). Cette diminution est due à l'atténuation géométrique d'une part et d'autre part à l'étalement des signaux du fait de la dispersion qui joue un rôle non négligeable dans la diminution d'amplitude. Cette diminution d'amplitude affecte particulièrement le mode fondamental de flexion, mode plus dispersif dans les gammes de fréquences considérées en EA. L'amplitude pic est bien dépendante des caractéristiques de la source. En effet, les signaux issus de la source S1 (fissure en mode I) ont globalement une amplitude pic supérieure aux signaux issus de la source S2 (cisaillement). En revanche, ce descripteur n'est pas indépendant de la géométrie. Plus la largeur de l'éprouvette diminue, plus l'amplitude pic augmente, à tel point que l'amplitude pic des signaux issus de la source S2 dans l'éprouvette EPL3 est égale à l'amplitude pic des signaux issus de la source 1 dans l'éprouvette EPL80.

De même que pour l'amplitude pic, on observe une légère diminution de l'énergie en fonction de la distance de propagation (Fig. 6). La source S1 libère plus d'énergie que la source S2, pour une même géométrie, l'énergie des signaux issus de la source S1 est bien supérieure à celle des signaux issus de la source S2. Par conséquent, l'énergie dépend bien des caractéristiques de la source. Cependant, plus l'éprouvette est étroite, plus l'énergie des signaux est grande. Ce descripteur est donc dépendant de la géométrie d'éprouvette. L'énergie des signaux issus de la source S2 dans l'éprouvette EPL3 est d'ailleurs plus importante que l'énergie des signaux issus de la source S1 dans l'éprouvette EPL80.

La présence des congés sur les bords latéraux des éprouvettes a aussi une influence sur l'évolution de l'énergie en fonction de la distance à la source. Cet effet est particulièrement visible sur les signaux issus de l'éprouvette EPL3. En effet une diminution plus importante de l'énergie est observable entre 40 et 60 mm.

La propagation affecte aussi d'autres caractéristiques du signal telle que le temps de montée (Fig. 7) (évolution erratique). Ces résultats montrent la nécessité de corriger ces descripteurs (si cela est possible) pour qu'ils restent représentatifs du mécanisme source. Le taux de passage par zéro, le barycentre fréquentiel, le coefficient de dissymétrie spectrale et les puissances partielles ont été identifiés comme étant particulièrement pertinents. Ils présentent tous une évolution constante en fonction de la distance de propagation, ils sont indépendants de la géométrie et leur valeur est liée aux caractéristiques de la source.

Corrélés entre eux, ces descripteurs permettent de mettre clairement en évidence les deux mécanismes sources et ce quelle que soit la géométrie (Fig. 8).

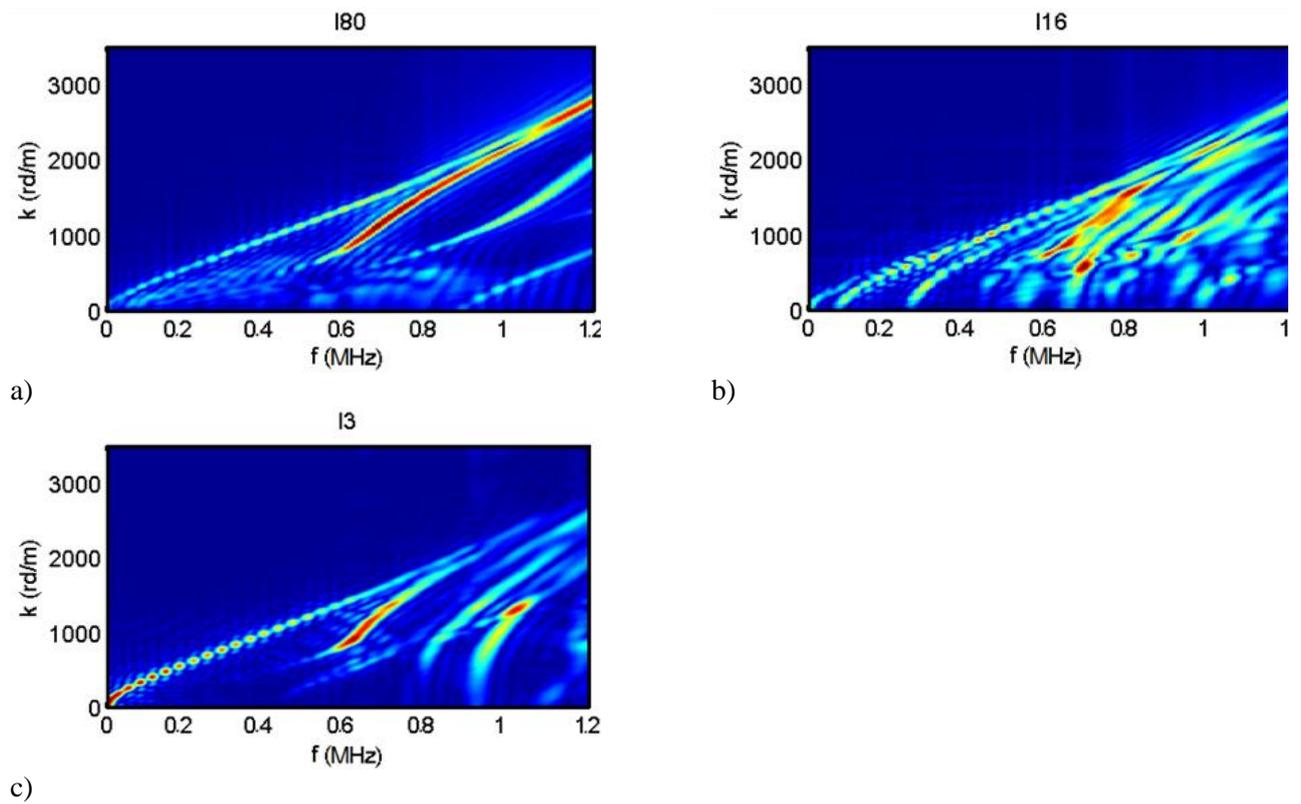


Fig. 4 : Transformée de Fourier 2D pour les trois géométries pour une même source simulée en surface (chirp) a) Epreuve de plus grande dimension EPL 80, b) Epreuve classique de traction EPL 16, c) Epreuve fine représentative d'un minicomposite EPL 3

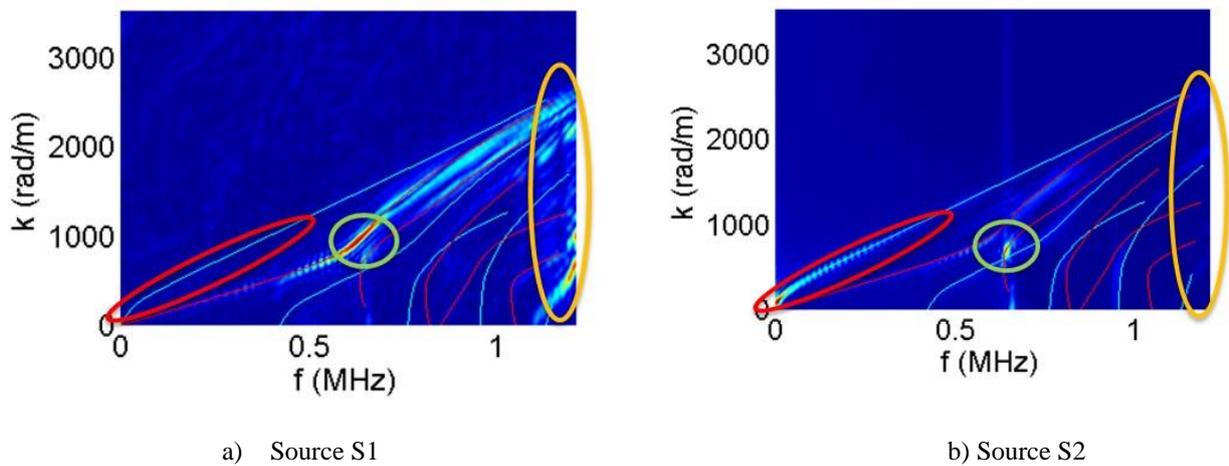


Fig. 5 : FFT2D des signaux d'EA générés par une fissure de mode I, source S1, et par une fissure de mode II, source S2, dans l'éprouvette EPL3.

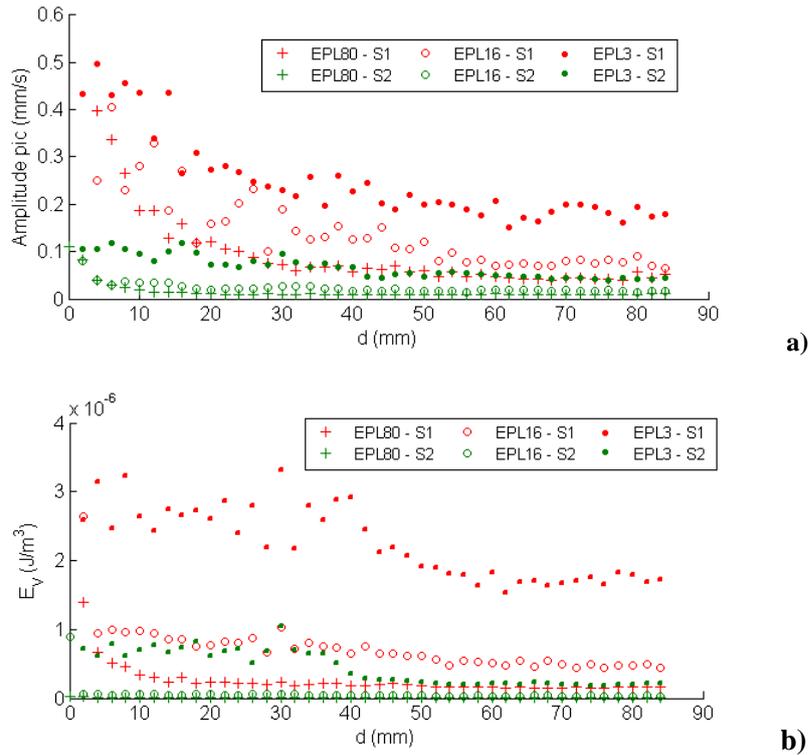


Fig.6 Evolution de a) l'amplitude, b) l'énergie en fonction de la distance à la source pour trois géométries d'éprouvette (EPL3, EPL16 et EPL80). En rouge les signaux générés par la source n°1. En vert les signaux générés par la source n°2.

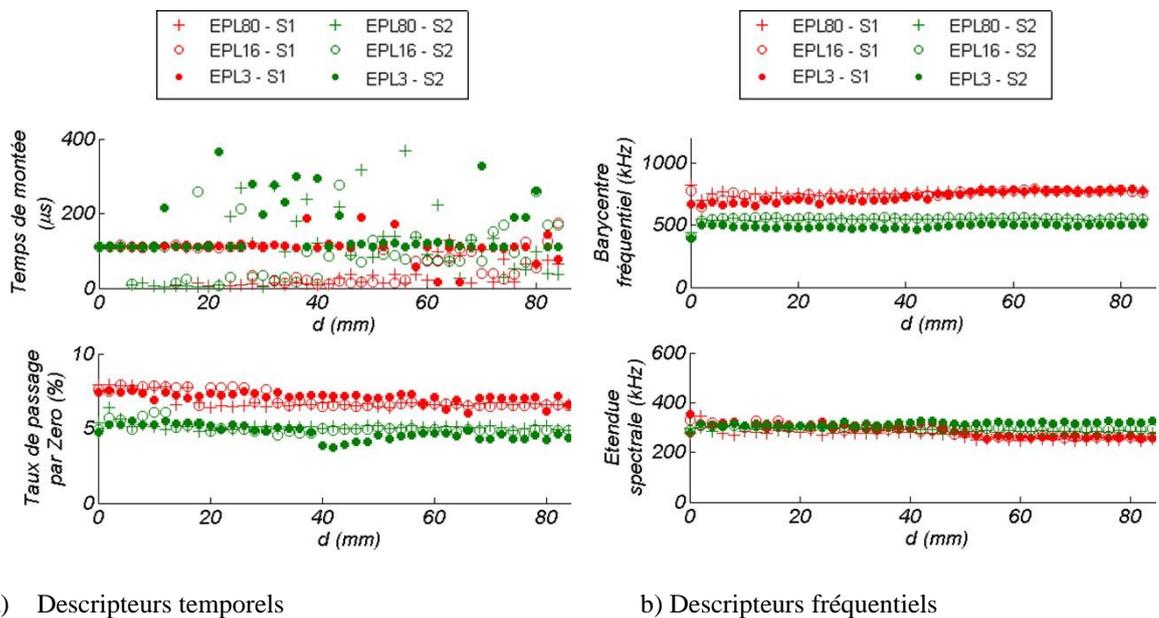


Fig.7. Evolution des descripteurs en fonction de la distance de propagation dans les trois géométries et pour les deux sources S1 et S2.

3.3 Mise en évidence de l'influence du capteur

Dans un deuxième temps, l'effet de la mesure est pris en compte en intégrant l'effet capteur. Bien qu'en surface matériau les différentes classes de signaux soient bien distinctes, la prise en compte de l'effet du capteur modifie ces descripteurs rendant la séparation des données plus complexe (Fig. 8). Comme le capteur μ 80, le capteur R15 disperse les valeurs des descripteurs, mais ce n'est pas son seul effet, il entraîne aussi un décalage des valeurs. Le taux de passage par zéro des signaux sans

capteur et avec le capteur $\mu 80$ est compris entre 4 et 8 %. Celui des signaux avec l'effet du capteur R15 est compris entre 2 et 6 %. Le barycentre fréquentiel est quant à lui compris entre 200 et 600 kHz avec l'effet du capteur R15 alors qu'il est compris entre 400 et 800 kHz sans capteur et avec capteur $\mu 80$. Enfin, le coefficient de dissymétrie spectrale, centré autour de 2 (donc supérieur à 0), indique une distribution décalée vers les basses fréquences par rapport au barycentre fréquentiel. En revanche, le coefficient de dissymétrie sans effet capteur ou avec l'effet du capteur $\mu 80$ est proche de 0 et indique donc une symétrie de la distribution fréquentielle par rapport au barycentre. Les résultats montrent que les capteurs ont une influence sur la signature modale des sources. L'impact est plus ou moins important selon la bande de fréquence sollicitée par la source et selon le modèle de capteur utilisé. Ils modifient aussi la valeur des descripteurs calculés sur les signaux en générant une dispersion et un décalage des valeurs. Cela conduit à un recouvrement des classes de signaux et, par conséquent, à une difficulté accrue pour l'identification des sources. Plus la fonction de sensibilité du capteur couvre une bande de fréquence étroite et moins celle-ci est plate, plus l'effet sur le signal est important.

Dans l'optique d'une classification des signaux afin de les associer à des mécanismes d'endommagement, ces résultats justifient tout d'abord d'identifier des descripteurs pertinents. Ensuite, ces résultats justifient l'utilisation d'analyses statistiques multi-variables et non mono-paramètres pour classifier les signaux. Les capteurs utilisés pour la mesure peuvent modifier la valeur des descripteurs rendant ainsi les résultats issus d'une analyse mono-paramètre difficilement transposables à d'autres études.

3.4 Effet du système d'acquisition : prise en compte du préamplificateur

Seuls les résultats filtrés entre 100 et 400 kHz sont présentés (Fig. 9). Les signaux filtrés par le préamplificateur ont un barycentre fréquentiel et un taux de passage par zéro moins élevés. Les signaux « mesurés » par le capteur $\mu 80$, avant préamplification, ont un barycentre fréquentiel compris entre 400 et 900 kHz alors que les signaux en sortie du préamplificateur ont un barycentre fréquentiel compris entre 350 et 800 kHz .

Les signaux « mesurés » par le capteur R15, avant préamplification, ont un barycentre fréquentiel compris entre 200 et 600 kHz alors que les signaux en sortie du préamplificateur ont un barycentre fréquentiel compris entre 150 et 450 kHz.

4. Conclusion

En résumé, ce travail a permis de montrer tout l'intérêt de la simulation pour établir des liens quantitatifs entre le signal et la source d'EA. Les résultats obtenus avec cette approche (influence de la nature et de position de la source, de la nature des capteurs ainsi que de leur positions, influence de la géométrie...) vont permettre de fiabiliser la technique d'EA par rapport à la problématique de l'identification de la signature acoustique des différents mécanismes d'endommagement. Les résultats obtenus montrent que les signaux se propagent au sein des éprouvettes suivant des modes bien définis. Ces modes de propagation sont dépendants de la géométrie de l'éprouvette. Chaque source sollicite les modes différemment. Ainsi leur étude par une analyse modale permet d'obtenir des informations sur la source afin de l'identifier. La richesse de cette approche réside dans l'utilisation d'outils de traitement du signal tels que les TF2D ou encore les transformées temps-fréquence (mieux adaptées à une analyse de signaux expérimentaux) qui mettent clairement en évidence la signature acoustique de la source. De plus, la nécessité de prendre en compte l'effet du capteur d'EA pour interpréter les résultats apparaît très clairement.

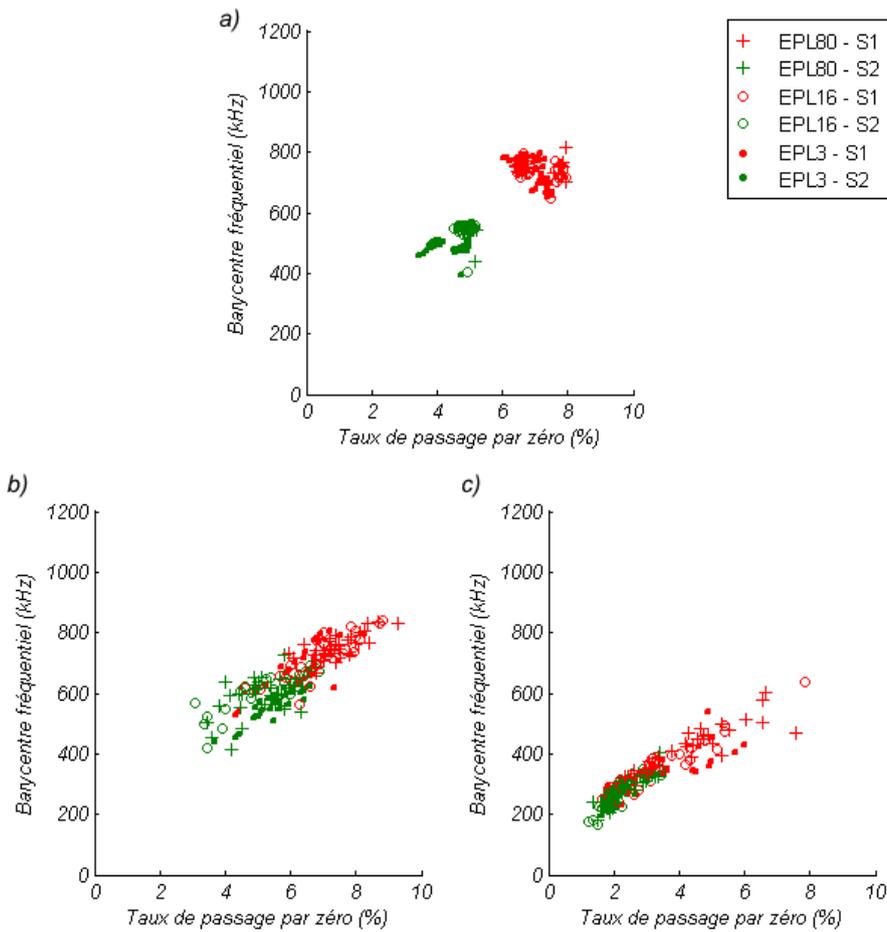


Fig. 8: Diagrammes de corrélation Barycentre fréquentiel - Taux de passage par zéro pour la source S1 et la source S2 a) en surface matériau, sans l'effet capteur. b) Avec un capteur $\mu 80$. c) Avec un capteur R15 pour les 3 géométries (EPL 3 mini-composite, EPL 16 éprouvette de traction, EPL 80 pièce semi-technologique)

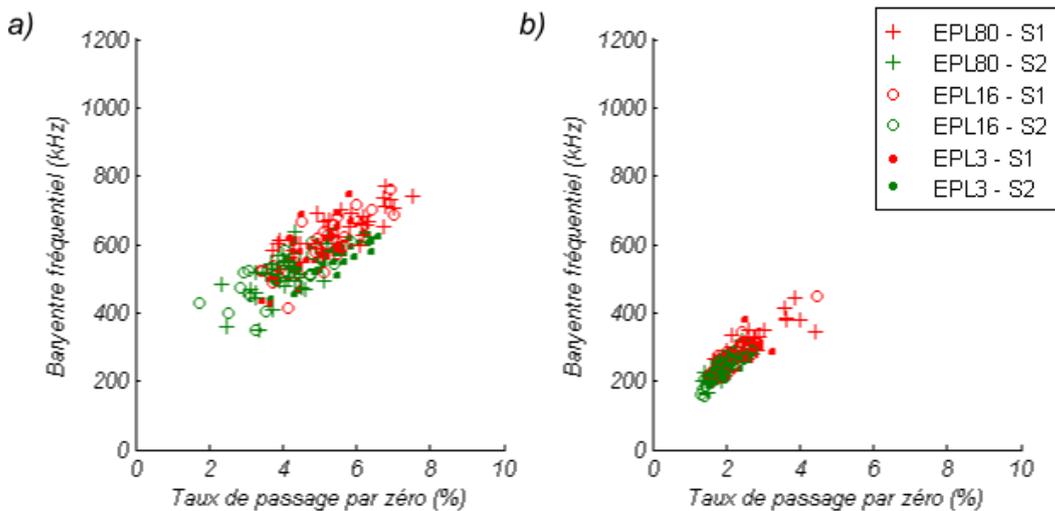


Fig. 9: Diagrammes de corrélation Barycentre fréquentiel - Taux de passage par zéro pour la source S1 et la source S2 Effet des capteurs $\mu 80$ et R15 et effet du préamplificateur réglé sur la bande de fréquence [100 ; 400] kHz. a) Capteur

μ80 + préamplificateur. b) Capteur R15 + préamplificateur(EPL 3 mini-composite, EPL 16 éprouvette de traction, EPL 80 pièce semi-technologique)

Références

- [1] Momon S, Moevus M, Godin N, R'Mili M, Reynaud P, Fantozzi G, Fayolle G. "Acoustic emission and lifetime prediction during static fatigue tests on ceramic matrix composites at high temperature under air". *Composites Part A* 41 913-918, 2010.
- [2] M. Moevus, «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*, vol. 68, pp. 1258-1265, 2008.
- [3] D. Aggelis, «Effect of plate wave dispersion on the acoustic emission parameters in metals,» *Computers and Structures*, vol. 98, pp. 17-22, 2012.
- [4] M. Sause, «Simulation of Acoustic Emission in PLanar Carbon Fiber Reinforced Plastic Specimens,» *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 29, pp. 123-142, 2010.
- [5] Ben Khalifa W., "Modélisation de la propagation et de la réception des ondes élastiques émises par un défaut sous contrainte. Application à la simulation des contrôles non destructifs par émission acoustique," Thèse de l'Université de Valenciennes et du Haut-Cambresis, 2013.
- [6] Le Gall T. Simulation de l'émission acoustique : aide à l'identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement, Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 2016.
- [7] Monnier T., Seydou D. Godin N., and Zhang F., "Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors by the Method of Reciprocity, Theoretical and Experimental Considerations," *Journal of Acoustic Emission*, vol. 30, p. 152-166, 2012.