

Un algorithme de seuillage doux modifié pour la transformée en ondelettes: Application au débruitage de signaux d'émission acoustique

Abida SATOUR¹, Silvio MONTRÉSOR², Mourad BENTAHAR², Rachid EL GUERJOUA² Fouad BOUBENIDER³

¹Laboratory of Characterization and Instrumentation,
Technical and Scientific Research Center for Welding and Testing, BP 64.
Road of Dely Ibrahim, Cheraga, Algiers, Algeria

²Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM), UMR CNRS 6613, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, Le Mans Cedex 9, France

³Laboratory of Materials Physics,
University of Sciences and Technology Houari Boumediene, BP 32. El Allia-Bab Ezzouar, 16111, Algiers, Algeria
satourabida@yahoo.fr, silvio.montresor@univ-lemans.fr,
mourad.bentahar@univ-lemans.fr, rachid.elguerjouma@univ-lemans.fr,
fboubenider@yahoo.fr

Résumé – Nous présentons une méthode de débruitage par transformée en ondelettes de signaux d'émission acoustique (EA) utilisés pour la caractérisation des processus d'endommagements de matériaux composites sous contraintes mécaniques. L'objectif est d'améliorer la sensibilité de la chaîne de traitement afin de pouvoir prendre en compte les signaux d'EA de très faible amplitude, considérés comme précurseurs, qui apparaissent au début des tests de contrainte menant à la rupture du matériau. Nous présentons un algorithme de seuillage modifié pour les coefficients d'ondelettes résultants de la décomposition des signaux d'EA bruités. Cet algorithme prend en compte les variations de la statistique du bruit aux différents points de la représentation temps-échelle du signal. L'amélioration du rapport signal sur bruit des signaux d'EA permet de descendre la sensibilité du dispositif de 5 dB, il devient ainsi possible d'inclure dans la chaîne de traitement des signaux précurseurs auparavant inaccessibles.

Abstract – We present in this paper a wavelet based denoising algorithm applied to the enhancement of acoustic emission signals. Acoustic emission signals are widely used to the characterization of damages process in glass fiber reinforced composites under stress tensile tests. The aim is to improve the sensitivity of the overall processing scheme in order to take in account acoustic emission signals of weak amplitude which occurs at the beginning of stress tests. These signals are considered as precursors of the damage mechanisms which lead to the failure of composite material. We present a modified thresholding denoising algorithm applied to wavelet coefficients resulting from noised acoustic emission signals. Our algorithm takes in account statistical variations of the noise in the time-scale plane. The improvement of the signal to noise ratio on acoustic emission signals allows to increase to 5 dB the sensitivity of the overall processing and leads to the taken in account of precursor signals.

1 Introduction

Les matériaux composites sont devenus l'objet d'un intérêt croissant aujourd'hui dans le monde industriel, aéronautique et automobile notamment, en rapport avec leurs excellentes propriétés mécaniques. Malgré tout, dans certaines situations critiques, de fortes contraintes ou de chocs, ces matériaux peuvent être sujets à différents endommagements qui vont affecter leur résistance mécanique. Plusieurs méthodes ont déjà été développées dans le but de contrôler l'apparition et le suivi de ces endommagements. Parmi ces méthodes, l'analyse des signaux d'émission acoustique (EA) est apparue comme un moyen de contrôle non-destructif efficace et en lien avec la nature des changements de structure intervenants dans le matériau. Dans

le but d'attribuer un mécanisme d'endommagement aux ondes captées par transduction, différentes approches de traitement du signal ont été proposées, incluant des méthodes d'apprentissage statistique supervisé ou non-supervisé [2][4]. La plupart des analyses soulignent l'importance des descripteurs fréquentiels associés aux signaux d'EA, que ce soit en contexte stationnaire ou non stationnaire. Il existe ainsi trois domaines de fréquences caractéristiques de la plupart des signaux d'EA liés aux endommagements de matériaux polymères structurés en fibres: A partir de 300 kHz pour la rupture de fibre, de 30 à 150 kHz pour la fissuration de matrice et de 180 à 290 kHz pour le délaminage. Les conditions expérimentales sont telles que seuls les signaux d'EA ayant une amplitude supérieure à 30 dB sont pris en compte. Les raisons de cette limitation sont liées

au niveau de bruit parasite perturbant fortement les signaux en dessous de ce seuil. Les sources de bruit proviennent d'une part de la chaîne d'acquisition et d'autre part du bruit d'origine mécanique généré par les conditions de l'essai (transmission mécanique de la machine de traction à travers les pinces de l'échantillon, glissement des transducteurs...). Sur la figure 1 représentant la courbe de charge d'un échantillon on peut constater que les signaux d'EA sont plus nombreux à l'approche de la rupture. Il également existe un grand nombre de signaux dans la zone d'amplitude 25-30 dB avec notamment une proportion plus importante de ceux-ci dès les premières secondes du test. La méthode que nous présentons a pour objectif de prendre en compte cette dernière zone d'intérêt dans le processus de suivi du matériau.

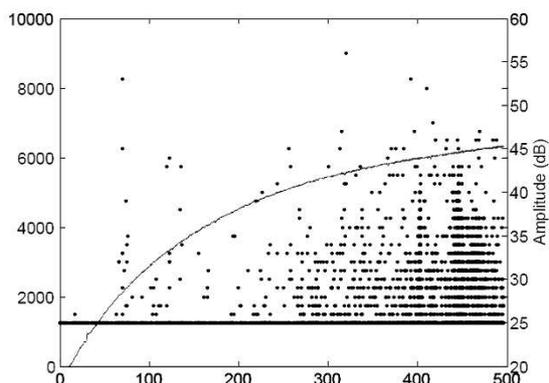


FIG. 1: Courbe de charge d'un échantillon de matériau polymère en traction. La graduation de l'axe des abscisses représente le temps en secondes. L'axe des ordonnées représente la charge mécanique. L'axe des ordonnées à droite représente les niveaux d'amplitudes associés aux points sur le diagramme figurant l'occurrence de chacun des signaux d'émission acoustique en fonction du temps.

2 Description de l'algorithme

Etant donné leur faible amplitude les signaux d'EA situés dans la gamme [25 dB 30 db] présentent un rapport signal à bruit très bas aussi il est nécessaire de procéder à leur rehaussement (débruitage) avant d'en faire l'analyse.

2.1 Ondelettes et débruitage

Par débruitage on sous-entend une procédure qui consiste à partir des observations $x(n)$ à retirer en partie ou en totalité la composante de bruit $b(n)$ d'un signal original $s(n)$ qui y est superposée additivement.

$$x(n) = s(n) + b(n). \quad (1)$$

La difficulté réside dans le fait que le signal présentent des caractéristiques non-stationnaires (présence de transitoires par

exemple) et que la nature du bruit est par ailleurs insuffisamment déterminée. Le débruitage par ondelettes a déjà été abordé dans le cadre non-stationnaire [6]. Dans le contexte de l'étude des signaux d'EA, nous avons mis en oeuvre un algorithme de débruitage basé sur une méthode modifiée de seuillage introduite précédemment par David Donoho [5]. Dans un article récent [3] consacrée à l'EA, les auteurs comparent différentes méthodes de débruitages basées sur une transformée en ondelettes discrètes non redondante couplée à des méthodes de seuillage de coefficients d'ondelettes par échelle. Afin de s'affranchir de la variance par translation de la représentation nous avons pour la représentation du signal analysé $f(t)$, opté pour la transformée en ondelettes continues à coefficients complexes [1]:

$$CWT_f(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt. \quad (2)$$

$\psi(t)$ est l'ondelette analysante, t et u sont respectivement les paramètres de temps et d'échelle. Une discrétisation du plan temps-échelle en fraction d'octave [1] est ensuite appliquée afin de disposer d'un ensemble discret des coefficients d'ondelette $CWT_f(u, s)$. Un seuillage est ensuite appliqué sur les coefficients en modules, la phase étant laissée intacte.

2.2 Méthodes et stratégies de seuillage

Nous distinguons trois stratégies de seuil différentes: seuillage dur, seuillage doux et seuillage mixte. Cette dernière est une forme intermédiaire entre entre les deux premières stratégies basée sur l'utilisation d'une fonction croissante monotone qui permet de transiter d'une stratégie à l'autre en fonction du niveau d'amplitude du coefficient d'ondelette. Pour les coefficients d'ondelettes d'amplitude élevée c'est le seuillage dur qui s'applique, préservant ainsi le niveau signal que l'on souhaite restaurer. Pour les niveaux proches du seuil est plutôt appliqué la technique du seuillage doux, évitant ainsi les effets de discontinuité du seuil. Les différentes stratégies de seuillages sont rappelées dans les équations qui suivent. Seuillage dur,

$$C(k, j) = \begin{cases} C(k, j) & \text{si } |C(k, j)| \geq S \\ 0 & \text{si } |C(k, j)| < S \end{cases} \quad (3)$$

seuillage doux,

$$C(k, j) = \begin{cases} (|C(k, j)| - S)^{j \arg C(k, j)} & \text{si } |C(k, j)| \geq S \\ 0 & \text{si } |C(k, j)| < S \end{cases} \quad (4)$$

En ce qui concerne les dépendances temps-échelle des seuils nous comparons trois techniques d'application: le seuil unique (UNI), le seuil par échelle (CHAN) et le seuil temps-échelle (TE). Contrairement aux méthodes développées dans la référence [3], les seuils calculés pour les coefficients présentent une dépendance d'échelle mais également de temps. L'hypothèse sous jacente est que, comme la plupart des signaux d'EA recueillis présentent un transitoire d'amplitude élevée durant la première phase de la durée d'acquisition, le rapport signal à bruit présente des disparités importantes en début et en fin de cycle d'acquisition.

3 Expérimentations

3.1 Base de tests

Afin de tester les performances de l’algorithme nous avons constitué une base de données de signaux comprenant des signaux d’EA mélangés à trois types de bruit: du bruit provenant du dispositif d’essais de traction et deux types de bruits simulés, d’une part du bruit blanc et d’autre part du bruit blanc modulé en rampe afin d’obtenir des variations locales de rapport signal à bruit. Pour chacune de ces quatre classes nous disposons de 380 signaux. Nous avons testé les performances de notre méthode de débruitage pour des rapports signal à bruit échelonnés entre -6 et 12 dB. En ce qui concerne les paramètres de l’algorithme, nous avons cherché à comparer d’une part les stratégies de seuil et d’autre part leur dépendance à l’échelle et au temps. La figure 2 représente la carte des seuils de bruit calculés à partir de la classe des signaux de bruit du dispositif. Cette carte fait apparaître clairement des dépendances au niveau des échelles de la représentation. Elle fait également apparaître quoique dans une moindre mesure des dépendances temporelles des niveaux d’amplitude relevés.

3.2 Critères d’évaluation

Pour chacun des débruitages effectués nous calculons deux critères d’évaluation. Le premier représente le rapport signal sur bruit à posteriori (RSBPOST),

$$RSBPOST = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum x(k)^2}{\sum (x(k) - d(k))^2} \right), \quad (5)$$

c’est à dire celui mesuré à partir des échantillons $x(k)$ du signal bruité et ceux du signal obtenu après débruitage, $d(k)$. Le second mesure le rapport signal à bruit résiduel (RSBRES), c’est à dire celui mesuré à partir du signal non bruité et du signal débruité,

$$RSBRES = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum s(k)^2}{\sum (s(k) - d(k))^2} \right). \quad (6)$$

Ce dernier rapport est le plus important en ce sens ou il permet d’évaluer la qualité de la restauration en terme de fidélité au signal d’origine.

4 Résultats et discussion

Nous présentons ici un extrait de l’ensemble des résultats obtenus sur la base de tests. Les tableaux 1 et 2 reportent les résultats des expérimentations pour les signaux de d’EA en bruit blanc et en bruit modulé. Ces résultats montrent principalement que l’approche temps-échelle avec seuillage dur se révèle la plus efficace que ce soit en bruit blanc ou en bruit modulé avec un écart d’environ 10 dB pour RSBRES par rapport aux approches UNI et CHAN. Le classement reste le même dans le cas d’une stratégie de seuil mixte mais avec cependant un écart moins important, 3 dB en bruit blanc et pratiquement 5 dB en

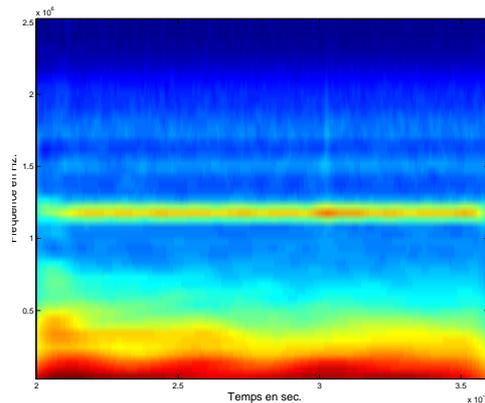


FIG. 2: Carte temps-échelle des seuils de bruit estimés à partir de la base des signaux d’EA

bruit modulé. On peut noter que les approches UNI et CHAN présentent des résultats assez proches quelles que soient les stratégies de seuillage et pour les deux types de bruit. Concernant les stratégie de seuillage on distingue là encore une différenciation importante entre l’approche TE et le groupe UNI et CHAN; ainsi pour ce dernier la stratégie mixte est comme on pouvait s’y attendre intermédiaire entre le seuillage doux qui présente les meilleures résultats et le seuillage dur pour les deux types de bruit. Les résultats sont inversés pour l’approche TE. En concerne les tests sur les bruits de mesure, la méthode TE associée à un seuillage dur offrent également la meilleure performance (14.28 dB) avec cependant un écart plus faible avec les autres couples de méthodes (2 à 3 dB). Les figures 3 et 4 donnent un aperçu qualitatif de l’application de la méthode TE sur des signaux réels.

TAB. 1: Rapports signal à bruit calculés pour la base de signaux d’EA en bruit blanc. Le rapport signal à bruit est de 3 dB.

Type de seuillage	Methode	RSBPOST	RSBRES
Dur	UNI	8.45	7.43
Dur	CHAN	6.77	7.29
Dur	TE	4.27	16.48
Doux	UNI	5.01	12.92
Doux	CHAN	5.04	12.72
Doux	TE	3.85	10.12
Mixte	UNI	6.68	10.23
Mixte	CHAN	5.04	10.06
Mixte	TE	4.10	13.29

5 Conclusion

Nous avons présenté dans cet article une méthode de débruitage par ondelettes appliquée à des signaux d’émission acous-

TAB. 2: Rapports signal à bruit calculés pour la base de signaux d'EA en bruit blanc modulé. Le rapport signal à bruit est de 3 dB.

Type de seuillage	Methode	RSBPOST	RSBRES
Dur	UNI	7.10	4.90
Dur	CHAN	7.22	4.82
Dur	TE	2.69	15.35
Doux	UNI	3.57	9.94
Doux	CHAN	3.59	9.79
Doux	TE	2.37	8.50
Mixte	UNI	5.29	7.02
Mixte	CHAN	5.36	7.09
Mixte	TE	2.56	11.96

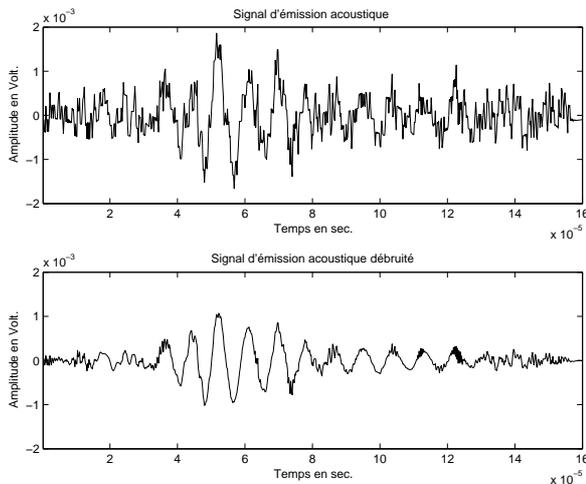


FIG. 3: Représentations amplitude-temps associées à un signal capté par le transducteur du dispositif durant la charge, avant (en haut) et après (en bas) débruitage. Le signal est caractéristique d'une émission acoustique obtenue par fissuration de la matrice du polymère.

tique. La méthode utilisée est basée sur une représentation du signal en ondelettes continues associée à la technique de débruitage par seuil sur les coefficients d'ondelettes. A la différence des algorithmes exploitant une estimation du seuil globale ou par canal d'échelle, nous nous proposons ici une estimation en prenant en compte les variations locales du bruit sur l'échelle de temps. Ce dispositif est justifié par la nature du bruit issue du dispositif de test de contrainte dans lequel les signaux d'EA sont synchronisés sur les détection de pic d'amplitude des capteurs. La validation de la méthode sur une base de données de signaux d'EA associée à du bruit de mesure réel et du bruit simulés montrent un réel avantage de la prise en compte de la dimension temps. La méthode utilisée permet de descendre de 5 dB la sensibilité de l'ensemble du dispositif et permet ainsi d'incorporer de nouveaux signaux précurseurs (cf. Fig. 1) dans le processus d'analyse. Ceci permettra dans la suite d'obtenir des informations plus précises sur les méca-

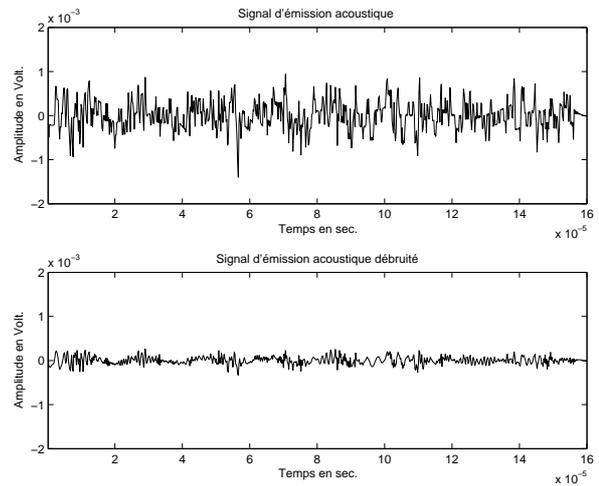


FIG. 4: Représentations amplitude-temps associées à un signal capté par le transducteur du dispositif durant la charge, avant (en haut) et après (en bas) débruitage. Le signal correspond uniquement au bruit de mesure du dispositif.

nismes d'endommagement agissant dans le matériau durant les tous premiers instants du test.

Références

- [1] S. G. Mallat, *A wavelet tour of signal processing*. Academic Press, San Diego, 1999.
- [2] A. Marec, J.-H. Thomas, and 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, 22, 1441-1464 (2008).
- [3] X. Chimentin, D. Mba, B. Charnley, S. Lignon, J. P. Dron, *Effect of te Denoising on Acoustic Emission Signal*. Journal of Vibration and Acoustics, Vol 132, June 2010.
- [4] H. Loutas, V. Kostopoulos, C. Ramirez-Jimenez, M. Pharaoh, *Damage evolution in center-holed glass/polyester composites under quasi-static loading using time/frequency analysis of acoustic emission monitored waveforms*, Composites Science and Technology, 66, 1366-1375 (2006)
- [5] D. L. Donoho, *De-Noising by Soft-Thresholding*, IEEE Transactions on Information Theory, Vol 41, no 3, 613-627, May 1995.
- [6] R. Ranta, V. Louis-Dorr, C. Heinrich, D. Wolf, F. Guillemin, *New approach for the damage mechanisms identification in the glass-epoxy composite Débruitage par ondelettes et segmentation de signaux non-stationnaires: réinterprétations d'un algorithme itératif et application à la phonoentérogaphie*, Traitement du Signal 2003, Vol.20 no 2, 119-135, 2003.