



Détection précoce des processus de corrosion dans l'acier par analyse des signaux d'émission acoustique: apport des techniques de débruitage par ondelettes

S. Montrésor et M. Bentahar

LAUM, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France
silvio.montrésor@univ-lemans.fr

Cette communication présente une comparaison de différentes techniques de débruitage appliquées à la détection des mécanismes de corrosions observables sur des échantillons d'acier soumis à un stress chimique. Cette problématique est d'un grand intérêt pour les installations industrielles du secteur des matériaux et la chimie notamment dans la mesure où le coût de leur fonctionnement dépend du pouvoir d'anticipation des acteurs engagés dans leur surveillance et leur maintenance, sans parler des coûts environnementaux liés à leur dégradation quand elle s'avère inévitable. Les signaux d'émissions acoustiques recueillis durant les premiers stades du processus de corrosion doivent permettre de mener à sa caractérisation. Comme ces signaux présentent un faible rapport signal à bruit, il est nécessaire de procéder à leur réhaussement. Dans ce contexte, différents algorithmes de débruitage utilisant des méthodes à seuil appliquées aux coefficients de transformées en ondelettes sont comparés.

1 Introduction

Dans le domaine du contrôle non destructif, les sources d'émission acoustique (EA) peuvent être nombreuses et varient selon les matériaux étudiés et les conditions expérimentales qui les produisent. Nous nous intéressons ici à l'EA produite par une plaque d'acier soumise à un stress de corrosion résultant d'un dépôt d'un film de solution acide en surface. La corrosion est la cause de nombreux phénomènes microscopiques agissant sur la structure du matériau susceptibles de générer des signaux d'émission acoustique. Entre autres, on distingue la dissolution du métal, le dégagement d' H_2 gazeux, la rupture d'un film épais d'oxyde et la propagation de fissure [1, 2, 3, 4]. Ces phénomènes sont susceptibles d'apparaître successivement ou en même temps. Lors du processus de corrosion, l'activité acoustique évolue au cours du temps, comme le montrent, entre autres, les travaux de A. Prateepasen [1], dans lesquels ont été étudiés les signaux d'EA produits dans le cadre de corrosion accélérée. Il existe trois périodes d'activité distinctes. La première, d'une durée d'environ une heure et demi, présente une forte activité émissive. La deuxième correspond à une brusque diminution du nombre de coups dans les signaux d'EA. Au cours de la troisième période, on observe une lente augmentation de l'activité. Il est possible de discriminer tous ces signaux en fonction de leurs caractéristiques temporelles, comme le temps de montée, la fréquence moyenne et le nombre de coups. On obtient de cette façon des groupes distincts associés à des sources d'EA de différentes natures. Ces résultats exposés dans [1, 5, 6, 7, 8, 9] sont obtenus à partir d'expériences faisant intervenir différents aciers lors de réactions forcées électrochimiquement en milieux acides. Il existe une constance sur les plages de fréquences observées sur les signaux d'EA obtenus pour ces différentes conditions. Le seuil d'acquisition des signaux est généralement haut afin de s'affranchir des signaux de faible amplitude susceptibles d'être due uniquement au bruit de fond enregistré par les capteurs et de ce fait inexploitable en l'état; cependant quelques références [10] font état de l'utilisation d'un seuil assez bas (< 23 dB). Afin de caractériser les propriétés temps-fréquences du bruit ambiant, il est nécessaire de capter ses réalisations sur le matériau inerte avant l'exposition à l'acide. De cette manière on peut alors procéder au débruitage des signaux d'EA en appliquant une méthode qui s'inspire directement des méthodes soustractions spectrales employées dans d'autre contexte d'application, comme par exemple le rehaussement des signaux de parole. En

vertu du caractère fortement transitoire des signaux d'EA nous utilisons une famille d'ondelettes comme base de décomposition. Un travail antérieur [11] consiste en l'application de cette méthode au cas de la caractérisation précoce des endommagements pour les matériaux composites. D'autres publications portant sur la caractérisation des endommagements sur les matériaux composites, que ce soit pour effectuer des tâches de rehaussement ou de la classification, ont montrés que le choix des analyses en ondelettes était judicieux dans ce contexte [13, 12, 14, 15].

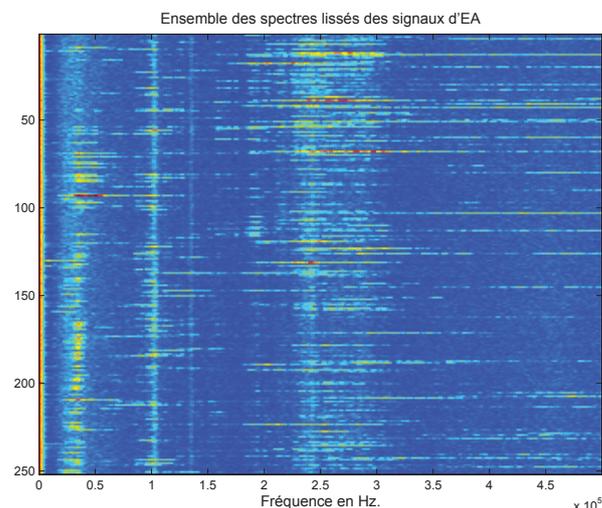


FIG. 1 – Ensemble des spectres des signaux d'EA sur un des quatre capteurs durant la phase de corrosion. Les spectres sont calculés sur les signaux bruts avant débruitage.

2 Débruitage par ondelettes

Etant donné leur faible amplitude les signaux d'EA situés dans la gamme [22dB 30dB] présentent un rapport signal à bruit très bas, aussi, il est nécessaire de procéder à leur rehaussement (débruitage) avant d'en faire l'analyse. 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 présente des caractéristiques non-stationnaires (présence de

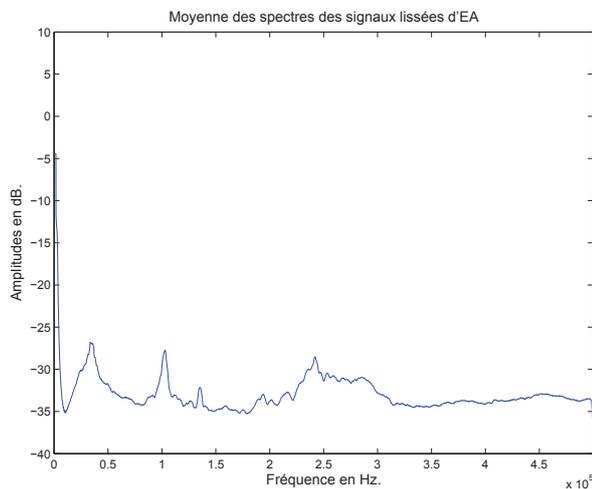


FIG. 2 – Moyenne des spectres des signaux d'EA recueillis sur un des quatre capteurs durant la phase de corrosion avant débruitage.

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 [16]. 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 [17]. Dans un article récent [13] 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 [18] :

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

$\psi(t)$ 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 [18] 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.

2.1 Méthodes et stratégies de seuillage

Nous avons distingués ici deux stratégies de seuil : seuillage dur et seuillage doux. 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 appliquée la technique du seuillage doux, évitant ainsi les effets de discontinuité du seuil. Soit $M = |C(k, j)|$, pour le seuillage dur on pose :

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

pour le seuillage doux :

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

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 [13], les seuils calculés pour les coefficients présentent une dépendance d'échelle mais également de temps. D'autre part les estimations des seuils sont effectuées non pas à partir d'hypothèses sur la distribution statistique des niveaux du bruit mais à partir d'estimations empiriques obtenues à partir d'un certain nombre de réalisations captées sur la chaîne d'acquisition du dispositif.

2.2 Critères d'évaluation

Pour chacun des débruitages effectués nous calculons deux critères d'évaluation. Le premier représente le rapport signal sur bruit à postériori (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 où il permet d'évaluer la qualité de la restauration en terme de fidélité au signal d'origine.

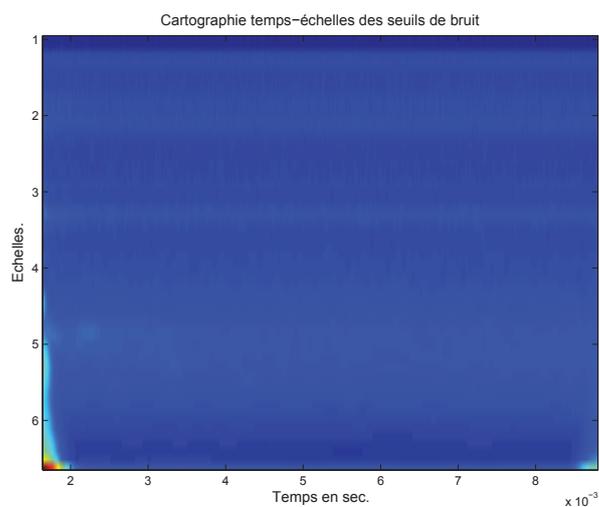


FIG. 3 – Carte temps-échelle des seuils de bruit estimés à partir de la base des signaux obtenus pendant la phase d'acquisition sur le matériau inerte. L'échelle 1 correspond à la demi-fréquence d'échantillonnage.

3 Expérimentations et bases de tests

Les expérimentations ont été réalisées sur deux plaques en acier, l'une carrée de 25 cm de côté et l'autre rectangulaire de 11 cm sur 19 cm d'environ 0.7 cm d'épaisseur, voir Figures 4 et 5. Le mécanisme de corrosion est déclenché par le dépôt d'un film d'une solution acide sur une surface délimitée de la plaque à l'aide d'une pipette. La surface est préalablement abrasée afin de faciliter la pénétration de la solution acide. Les acquisitions ont été réalisées avec le logiciel AEwin. Le seuil d'acquisition a été fixé à une valeur de 22 dB. La gamme des fréquences explorées est de 20 kHz à 1 Mhz.



FIG. 4 – Matériel expérimental : les deux plaques d'acier, les transducteurs, le flacon d'acide ainsi que la graisse de silicone utilisée pour le couplage des transducteurs à la plaque.



FIG. 5 – Expérience : plaque d'acier et capteurs d'EA utilisés pour la caractérisation de la corrosion. On distingue la zone abrasée sur laquelle a été déposée un film de solution acide.

L'amplitude maximale des signaux enregistrés présente de grandes variations sur la durée (cf Figure 7). On observe une grande concentration de signaux aux alentours de 22 à 25 dB; pour les signaux d'amplitude supérieures à cette gamme, on observe des allures de signaux typiques d'EA. On note également des

oscillations en très basses fréquences qui résultent du parasitage de la manipulation par des vibrations transmises par le sol à la plaque d'acier.

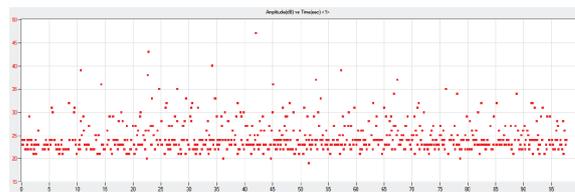


FIG. 6 – Carte d'amplitude des signaux d'EA. De très nombreux signaux occupent la bande 22-25 dB.

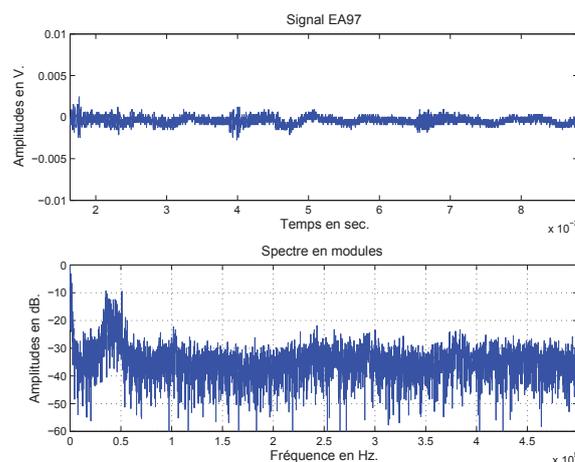


FIG. 7 – Signal d'EA et son spectre. On distingue un pic assez large centré autour 40 kHz.

Afin de tester les performances de l'algorithme, nous avons constitué une base de données de signaux comprenant des signaux d'EA mélangés à deux types de bruit : du bruit réel provenant du dispositif d'acquisition des signaux d'EA et du bruit simulé constitué par bruit blanc modulé en rampe afin d'obtenir des variations locales de rapport signal à bruit. Pour chacune de ces trois classes nous disposons d'environ 250 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 3 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, dans une moindre mesure, des dépendances temporelles des niveaux d'amplitude relevés.

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 d'EA en bruit de mesure et en bruit blanc modulé. Ces résultats montrent principalement que l'approche temps-échelle avec seuillage dur se révèle la plus efficace un écart de 5 à 10 dB, selon le contexte du bruit, pour RSBRES par rapport aux approches UNI et CHAN. 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 stratégies de seuillage on distingue là encore une différenciation importante entre l'approche TE et le groupe UNI et CHAN. Les résultats sont inversés pour l'approche TE. En ce qui 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 9 et 7 donnent un aperçu qualitatif de l'application de la méthode TE sur un signal d'EA pris dans la gamme 22-25dB.

TABLEAU 1 – 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.

Seuillage	Méthode	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

TABLEAU 2 – RAPPORTS SIGNAL À BRUIT CALCULÉS POUR LA BASE DE SIGNAUX D'EA EN BRUIT CND. LE RAPPORT SIGNAL À BRUIT EST DE 3 DB.

Seuillage	Méthode	RSBPOST	RSBRES
Dur	UNI	10.01	11.54
Dur	CHAN	11.75	10.72
Dur	TE	7.41	14.28
Doux	UNI	8.15	13.26
Doux	CHAN	7.64	11.24
Doux	TE	5.89	7.02

Sur les représentation temps-fréquence, ces signaux possèdent des coefficients d'ondelette de forte énergie au début du signal. On observe deux types de signaux d'EA. Les premiers, ont une fréquence de l'ordre de 200 kHz et un temps de montée de l'ordre de 10 à 100 Vs. Le second type correspond à des signaux de bruit et ne présente aucune caractéristique fréquentielle prédominante. Les caractéristiques des signaux enregistrés correspondent à ceux présents dans la littérature, notamment pour les caractéristiques fréquentielles mises en jeu.

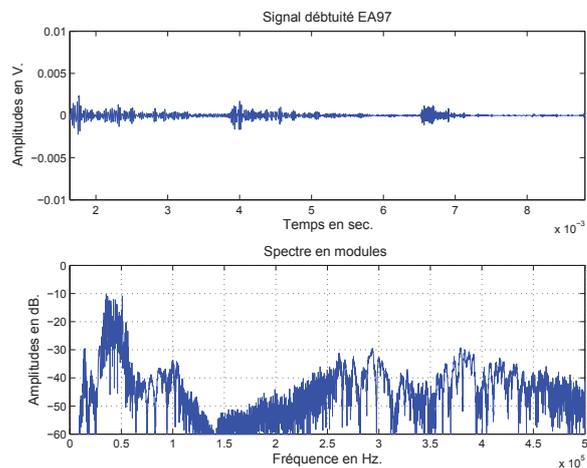


FIG. 8 – Signal d'EA débruité et son spectre

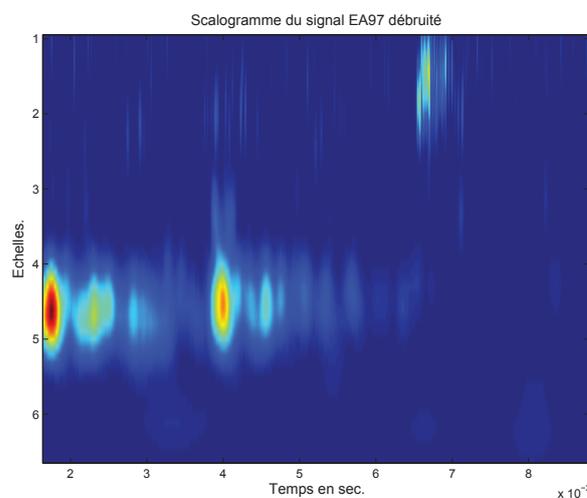


FIG. 9 – Représentation temps-échelle du signal d'EA de la Figure 8 débruité. La composante fréquentielle de 40 kHz du signal d'émission est décomposée en plusieurs salves. On remarque également une seconde salve, à droite, centrée autour de 400 kHz.

5 Conclusion

Nous avons présenté une méthode de débruitage par ondelettes appliquée à des signaux d'EA obtenus à partir de plaques d'acier soumises à un stress de corrosion. 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 dans cette contribution une estimation en prenant en compte les variations locales du bruit sur l'échelle de temps. La validation de la méthode sur une base de données de signaux d'EA associée à du bruit réel relatif aux conditions de mesures et du bruit simulés montrent un réel avantage de la prise en compte de la dimension temps. La méthode utilisée permet d'augmenter la sensibilité du dispositif de détection permettant d'incorporer des signaux d'émission acoustique dans le processus

d'analyse habituellement non pris en compte en raison de leur forte contamination par le bruit de mesure. Les expériences réalisées à partir d'un processus de corrosion initiée par le dépôt d'une solution acide sur une plaque d'acier ont permis de retrouver les propriétés fréquentielles des signaux d'émission acoustique en corrosion publiées dans des études précédentes mais sous des conditions différentes. En particulier les travaux en perspectives visent à réaliser un monitoring du processus de corrosion afin de pouvoir obtenir des interprétations plus précises des résultats obtenus à partir du débruitage des signaux d'EA en liaison avec l'évolution des propriétés physico-chimiques des aciers étudiés.

6 Remerciements

Nous tenons à remercier Mrs Jean-Christophe Thébaud et Philippe Gautier pour leur précieuse contribution à la partie expérimentale de ce travail.

Références

- [1] A. Prateepasen, Pitting Corrosion Monitoring Using Acoustic Emission, *Pitting Corrosion*, Prof. NasrBensalah (Ed.), ISBN : 978-953-51-0275-5. 2012.
- [2] J. Watson and P. Cole, Acoustic emission for corrosion detection, *Advanced Materials Research*, vol. 13, pp. 231–236, 2006.
- [3] C. Jirarungsatian, A. Prateepasen, Pitting and Uniform Corrosion Source Recognition using Acoustic Emission Parameters, *Corrosion Science*, Vol. 52. No. 1, January, pp. 187-197. 2010.
- [4] S. Yuyama, Fundamental aspects of acoustic emission applications to the problems caused by corrosion, *Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Non-Destructive Testing and Electrochemical Methods*, pp. 43–74, 1986, Moran/Labine éditeurs.
- [5] L. Djeddi, R. Khelif, S. Benmedakhene, and J. Favergeon, Reliability of acoustic emission as a technique to detect corrosion and stress corrosion cracking on prestressing steel strands, *Int. J. Electrochem. Sci*, vol. 8, pp. 8356–8370, 2013.
- [6] G. Du, J. Li, W.K. Wang, C. Jiang and S.Z. Song, Detection and characterization of stress-corrosion cracking on 304 stainless steel by electrochemical noise and acoustic emission techniques, *Corrosion Science*, Vol. 53, pp 2918–2926, 2011.
- [7] K. Darowicki, A. Mirakowski and S. Krakowiak, Investigation of pitting corrosion of stainless steel by means of acoustic emission and potentiodynamic methods, *Corrosion Science*, Vol. 45, pp. 1747–1756, 2003.
- [8] L. Jaubert, Etude de la corrosion uniforme d'aciers non alliés et inoxydables, *Ph.D. dissertation*, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004.
- [9] H. Mazille, R. Rothea and C. Tronel, An acoustic emission technique for monitoring pitting corrosion of austenitic stainless steels, *Corrosion Science*, Vol. 37, No. 9, pp. 1365-1375, 1995.
- [10] Y.P. Kim, G. Santarini, Ability of acoustic emission technique for detection and monitoring of crevice corrosion on 304L austenitic stainless steel, *NDT & E International*, Vol. 36, December 2003, pp. 553-562.
- [11] A. Satour, S. Montrésor, M. Bentahar, R. El Guerjouma, F. Boubenider, Acoustic emission signal denoising to improve damage analysis in glass fibre-reinforced composites, *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol 29 :1,pp. 65-79, 2014.
- [12] 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).
- [13] 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.
- [14] H. Loutas, V. Kostopoulos, C. Ramirez-Jimirez, 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).
- [15] A. Satour, S. Montrésor, M. Bentahar, R. El Guerjouma, F. Boubenider, New approach for the damage mechanisms identification in the glass-epoxy composite, *Proceedings of Acoustics 2012 Nantes conference*, 463-468, 23-27 April 2012, Nantes, France.
- [16] R. Ranta, V. Louis-Dorr, C. Heinrich, D. Wolf, F. Guillemin, Débruitage par ondelettes et segmentation de signaux non-stationnaires : réinterprétations d'un algorithme itératif et application à la phonoentérogaphie, *Traitement du Signal*, Vol.20 no 2, 119-135, 2003.
- [17] D. L. Donoho, De-Noising by Soft-Thresholding, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol 41,no 3, 613-627, May 1995.
- [18] S. G. Mallat, A wavelet tour of signal processing. *Academic Press*, San Diego, 1999.