

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière : Électronique
Spécialité : Systèmes des télécommunications

Présenté par

Baya Kaouthar

&

Benrabah Salsabil

Débruitage des signaux d'émission acoustique par la transformée en ondelettes continue

Proposé par : Satour Abida

Année Universitaire 2024-2025

Remerciements

Nous tenons à remercier Le Dieu qui nous a donné la bonne santé et la persévérance durant notre cursus. Nous tenons ensuite à remercier fortement notre encadreur Mme SATOUR Abida pour leur précieux conseil, aide et soutien. Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury pour la lecture de ce document.

N'oublions surtout pas de remercier nos parents pour leur amour, leur soutien morale et matériel et leur encouragement qui nous ont toujours donné une confiance en soi et une motivation à aller de l'avant, sans oublier de remercier nos amis pour leur présence et leur sincère amitié. Nous espérons que ce travail constituera un pas vers un long parcours plein d'objectifs et de succès. Enfin Prions dieu à préserver notre pays en sécurité.

ملخص:

خلال هذا العمل، كنا مهتمين بالاختبار غير المدمر للمواد بواسطة تقنية الانبعاث الصوتي (EA). تسمح هذه التقنية بمراقبة صحة الهياكل في الوقت الحقيقي بطريقة سلبية. الهدف هو تحسين حساسية أجهزة EA من أجل استكشاف الإشارات ذات السعة المنخفضة جدًا، والتي عادةً ما يتم تجاهلها واعتبارها مصادر للضوضاء بواسطة نظام EA. وللقيام بذلك، تم ضبط عتبة اكتساب الإشارة على 5 ديسيبل أقل من العتبة المقدرة تلقائيًا بواسطة نظام EA. تتضمن الإشارات المكتشفة بعد خفض عتبة الاستحواذ إشارات الضوضاء النقية بالإضافة إلى الإشارات المرتبطة بأوضاع الضرر. من أجل التمييز بين الإشارات المفيدة وتلك المرتبطة بالضوضاء، تم تطوير طريقة لإزالة الضوضاء عن طريق التحويل الموجي المستمر باستخدام تقنية العتبة الناعمة جنبًا إلى جنب مع معيار SFM (قياس التسطیح الطيفي). وقد أتاح هذا النهج الفرصة للوصول إلى إشارات الإنذار المبكر التي لم تكن صالحة للتحليل في السابق.

الكلمات المفتاحية: تقنيات الاختبار غير المدمرة؛ الانبعاث الصوتي؛ إزالة الضوضاء؛ التحويل إلى موجات محصورة؛ SFM.

Résumé :

Durant ce travail, nous nous sommes intéressés au contrôle non destructif des matériaux par la technique d'émission acoustique (EA). Cette technique permet de suivre l'état de santé des structures en temps réel de manière passive. Le but étant d'améliorer la sensibilité des dispositifs d'EA afin d'explorer des signaux de très faible amplitude, habituellement ignorés et considérés comme sources de bruit par le système d'EA. Pour le faire, le seuil d'acquisition des signaux a été fixé à une valeur inférieure de 5 dB par rapport au seuil estimé automatiquement par le système d'EA. Les signaux détectés après l'abaissement du seuil d'acquisition comporte les signaux de bruit pur ainsi que les signaux associés aux modes d'endommagement. Afin de discriminer les signaux utiles à ceux associés au bruit, une méthode de débruitage par la transformée en ondelettes continue en utilisant une technique de seuillage doux combinée avec le critère SFM (Spectral Flatness measure) a été développée. Cette approche a offert la possibilité d'accéder à des signaux précurseurs auparavant inexploitable pour l'analyse.

Mots clés : Techniques de contrôle non destructif ; Emission acoustique ; Débruitage, La transformée en ondelette continue ; Mesure de platitude du spectre.

Abstract :

During this work, we were interested in the non-destructive testing of materials by acoustic emission technology (EA). This technique allows us to monitor the health of structures in real time in a passive way. The goal is to improve the sensitivity of EA devices in order to explore signals of very low amplitude, usually ignored and considered as sources of noise by the EA system. To do this, the signal acquisition threshold was set to 5 dB below the threshold automatically estimated by the EA system. The signals detected after the acquisition threshold is lowered include the pure noise signals as well as the signals associated with the damage modes. In order to distinguish useful signals from those associated with noise, a method of denoising by continuous wavelet transformation using a soft threshold technique combined with the SFM (spectral flatness measure) criterion was developed. This approach has provided the opportunity to access early warning signals that were previously unusable for analysis.

Keywords: Non-destructive testing (NDT) techniques; Acoustic emission; Denoising; The contained wavelet transform; Spectral flatness measure.

Table des matières

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

**CHAPITRE I CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR EMISSION
ACOUSTIQUE 4**

1.1 INTRODUCTION 5

1.2. CONTRÔLE NON DESTRUCTIF (CND) : 5

1.2.1. Définition 5

1.2.2. Le rôle du CND au cours des différentes étapes de fabrication 6

1.2.3. Principe du CND 7

1.2.3.1 L'examen visuel direct 8

1.2.3.2 Le ressuage 8

1.2.3.3 Le contrôle magnétique 9

1.2.3.4 La radiographie 9

1.2.3.5 Les contrôles par courants de Foucault 10

1.2.4 Contrôle non destructif par ultrasons (CND) 11

1.2.4.1 Principales méthodes de contrôle par ultrasons 11

1.3 L'ÉMISSION ACOUSTIQUE 13

1.3.1 Généralités 13

1.3.2 Sources d'émission acoustique 14

1.3.3 Acquisition 15

1.3.3.1 Les capteurs 15

1.3.3.2 Les préamplificateurs 15

1.3.3.3 Le système d'acquisition 16

1.3.3.4 Paramétrage d'acquisition 16

1.3.3.5 Paramètres exploitables pour l'analyse 17

1.3.4 Techniques pour la localisation des sources d'E.A 19

1.3.5 Avantages et inconvénients de la méthode d'émission acoustique (EA)	20
1.4 CONCLUSION	20
CHAPITRE II ANALYSE DES SIGNAUX	22
2.1 INTRODUCTION	23
2.2 TRANSFORMÉE DE FOURIER (TF)	23
2.3 TRANSFORMÉE DE FOURIER INVERSE	24
2.4 LA TRANSFORMÉE DE FOURIER RAPIDE (FFT)	24
2.4.1 Définition	24
2.4.2. Applications de la Transformée de Fourier Rapide (FFT)	25
2.4.3 Les avantages et les inconvénients	26
2.4.4 Exemples	27
2.5 TRANSFORMÉE DE FOURIER À COURT TERME « TFCT OU STFT »	29
2.5.1 Définition	30
2.5.2. Les Avantages et les inconvénients	31
2.6 LA TRANSFORMÉE EN ONDELETTES	32
2.6.1 Origine et évolution de l'analyse en ondelettes	32
2.6.2 Fondements mathématiques de la transformée en ondelettes	33
2.6.3 Propriétés des ondelettes	34
2.7 TRANSFORMÉE EN ONDELETTES CONTINUE (TOC)	34
2.7.1 Choix de l'ondelette mère (l'ondelette mère)	36
2.7.2 Ondelette de Morlet complexe	38
2.7.3 Exemples	40
2.8 CONCLUSION	41
CHAPITRE III DEBRUITAGE DES SIGNAUX D'EMISSION ACOUSTIQUE	42
3.1 INTRODUCTION	43
3.2 ETAT DE L'ART DES TECHNIQUES DE DÉBRUITAGE DES SIGNAUX	44
3.2.1 Techniques dans le domaine temporel	44

3.2.2 Techniques dans le domaine fréquentiel.....	44
3.2.2.1 Filtrage passe-bas/passe-bande	44
3.2.2.2 Soustraction spectrale	44
3.2.2.3 Filtrage de Wiener	45
3.2.3 Méthodes statistiques et adaptatives	45
3.2.3.1 Débruitage bayésien.....	45
3.2.3.2 Seuillage adaptatif.....	46
3.2.4 Techniques d'apprentissage automatique basées sur l'intelligence artificielle (IA)	46
3.3 DÉBRUITAGE PAR ONDELETTES	46
3.3.1 Les méthodes classiques de seuillage en ondelettes	47
3.4 DESCRIPTION DE L'ALGORITHME DE DÉBRUITAGE	49
CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSION.....	53
4.1 INTRODUCTION	54
4.2 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE	54
4.2.1 Description du matériau	54
4.2.2 Essais mécaniques suivis par émission acoustique.....	55
4.3 RÉSULTATS.....	57
4.3.1 Signaux détectés avant l'essai de traction.....	57
4.3.2 Signaux détectés après l'essai de traction.....	58
4.3.3 Mesure de la Platitude du Spectre (Spectral Flatness Measure SFM). 60	
4.4 CONCLUSION	66
CONCLUSION GENERALE	67
BIBLIOGRAPHIE	70

Liste des figures

Figure 1.1 : principe du CND	8
Figure 1.2 : L'examen visuel direct	8
Figure 1.3 : Le ressuage	9
Figure 1.4 : Le contrôle magnétique.....	9
Figure 1.5 : La radiographie	10
Figure 1.6 : Les contrôles par courants de Foucault	10
Figure 1.7 :L'échographie ultrasonore	12
Figure 1.8 : Description du phénomène de l'émission acoustique	14
Figure 1.9 : Schéma d'une chaine d'acquisition de signaux d'émission acoustique	16
Figure 1.10 : Principaux paramètres d'acquisition des salves d'E.A	18
Figure 1.11 . Localisation des sources d'EA	19
Figure 2.1 : Représentation temporelle et fréquentielle de deux signaux stationnaires	28
Figure 2.2 : Représentation temporelle et fréquentielle d'un signal non stationnaire	29
Figure 2.3 : Exemples d'ondelettes mères : a) ondelette de chapeau mexicain, b) ondelette de Meyer, c) ondelette Gaussienne	32
Figure 2.4 : Ondelette mère de Morlet complexe pour une valeur de $z_0 = 5$	37
Figure 2.5 : Analyse par TOC du premier signal d'EA	40
Figure 2.6 : Analyse par TOC du deuxième signal d'EA	41
Figure 3.1 : Courbe de seuillage dur	48
Figure 3.2 : Courbe du seuillage doux	49
Figure 3.3 : Algorithme de débruitage des signaux d'EA	52
Figure 4.1 : Géométrie d'un spécimen en composite [$\pm 45^\circ$]	55
Figure 4.2 : Dispositif expérimental, (a) machine de traction INSTRON, (b) Amarrage de l'éprouvette et disposition des capteurs de l'E.A., (c) Préamplificateurs, (d) Système d'acquisition d'E.A.....	56

Figure 4.3 : Caractéristiques des signaux de bruit prises à 25 dB (a) et à 29 dB (b).....	58
Figure 4.4 : Evolution de l'activité acoustique au cours du temps d'une éprouvette de composite, (a) La charge et le nombre de salves, (b) Amplitude des salves.....	59
Figure 4.5 : SFM calculé avant et après débruitage des signaux d'origine bruit (.) (Juste avant le chargement lorsque l'échantillon est prêt à être testé), et (◉) tous les signaux enregistrés pendant le chargement	62
Figure 4.6 : Procédure de débruitage appliquée à deux signaux d'amplitude 25 dB : (a) premier signal avant et après débruitage ; le débruitage du signal indique une corrélation avec le bruit (SFM > 0,01) ; (b) second signal avant et après débruitage ; le débruitage du signal montre qu'il n'est pas corrélé au bruit (SFM < 0,01)	63
Figure 4.7 : Scalogramme des deux signaux débruités d'amplitude 25 dB	64
Figure 4.8 : Comparaison entre un signal ayant une amplitude supérieur au seuil (31 dB) et un autre signal d'E.A. obtenu après débruitage (25 dB)	65
Figure 4.9 : Maximum d'amplitude de la FFT associé aux événements d'E.A.....	66

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : CND durant les étapes de fabrication	7
Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients de la méthode d'émission acoustique	20
Tableau 2.1 : Les applications de FFT	26
Tableau 2.2 : Les avantage et les inconvénients de transformée de Fourier rapide	27
Tableau 2.3 : Les Avantages et les inconvénients de STFT	32
Tableau 2.4 : Famille des ondelettes [Matlab]	37

Liste des abréviations

CND Contrôle Non Destructif.

CNN Competitive Neuronal Network.

EA Emission Acoustique.

EPA Euro Physical Acoustics.

FFT Fast Fourier Transform.

FWT Fast Wavelet Transform.

HDT Heat Definition Time.

HLT Hits Lockout Time.

IA Intelligence artificielle.

LSFM Long-Term Spectral Flatness Measure.

PAUT Phased Array Ultrasonic Testing.

PDT Peak Definition Time.

RSB Rapport signal sur bruit

SFM Spectral Flatness Measure.

STFT Short-Time Fourier Transform.

TF Transformée de Fourier.

TFC Transformée de Fourier continue.

TFD Transformée de Fourier Discrète.

TFCT Transformée de Fourier à Court Terme.

TO Transformée en Ondelette.

TOC Transformée en Ondelettes Continue.

TOCI Transformée en Ondelettes Continue Inverse.

TOFD Time-of-Flight Diffraction.

VAD détection d'activité vocale.

Introduction Générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les pièces et structures mécaniques utilisées dans l'industrie sont fabriquées à partir des matériaux soigneusement choisis pour répondre à des exigences fonctionnelles, géométriques et technologiques spécifiques. Toutefois, en service, ces matériaux peuvent subir diverses sollicitations mécaniques, thermiques ou chimiques qui engendrent des mécanismes d'endommagement internes tels que la rupture des fibres, la fissuration matricielle ou encore le délaminage pour les matériaux composites. Ces dégradations, souvent invisibles à l'œil nu, peuvent compromettre la sécurité des structures, voire entraîner des défaillances critiques.

Pour éviter toute détection tardive d'un dysfonctionnement, des techniques de contrôle non destructives (CND) sont indispensables. Elles permettent d'évaluer l'état de santé des matériaux sans altérer leur intégrité, en identifiant la présence des défauts ou d'anomalies internes. Parmi ces méthodes, on peut citer la radiographie, les ultrasons, la magnétoscopie, ou encore les courants de Foucault. Ce travail se concentre plus particulièrement sur une méthode passive et prometteuse de contrôle par ultrasons : l'émission acoustique (EA). Il s'agit d'une technique non destructive efficace pour suivre en temps réel l'apparition et l'évolution des mécanismes d'endommagement qui peuvent apparaître lors de dégradation des matériaux.

Le principe de la technique d'émission acoustique repose sur la détection des ondes ultrasonores générées par des micro-fissures ou d'autres phénomènes internes lors de la sollicitation d'un matériau. Ces ondes peuvent être détectées à l'aide des capteurs placés à la surface de la pièce et sont représentées sous forme de signaux, porteurs de l'information sur les sources d'endommagement. L'hypothèse de base précise que deux sources distinctes produisent des signaux mesurables différents. Ces signaux sont ensuite caractérisés à l'aide de descripteurs issus de la forme d'onde, puis classifiés à l'aide d'algorithmes afin d'identifier les mécanismes d'endommagement.

Cependant, un défi majeur lors de l'analyse des signaux d'EA réside dans la présence de bruit, souvent d'origine mécanique ou électronique, qui altère le signal utile et complique son interprétation. Ce bruit rend difficile la détection des signaux de très faible amplitude, ceux qui pourraient contenir des informations précurseurs importantes sur un nouveau phénomène qui peut se produire. Pour surmonter cette difficulté, il est nécessaire de mettre en œuvre des

méthodes avancées de traitement et de débruitage des signaux, capables d'améliorer le rapport signal sur bruit sans altérer les composantes significatives du signal.

Dans ce contexte, la transformée en ondelettes continue (TOC) apparaît comme un outil particulièrement bien adapté au traitement des signaux non stationnaires comme ceux issus de l'EA. Ce mémoire de master vise à exploiter la TOC pour débruiter les signaux d'EA et améliorer leur analyse. Une attention particulière est portée à l'exploitation de signaux de très faible amplitude, dont le but d'abaisser le seuil d'acquisition et ainsi élargir la capacité de détection du système d'EA.

Ce travail contribue à renforcer l'efficacité du contrôle non destructif par émission acoustique, en apportant des outils d'analyse performants pour l'étude des signaux complexes et faiblement détectables, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans la surveillance de l'intégrité des structures industrielles.

Le présent travail est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre introduit les méthodes de contrôle non destructives en général, et se focalise sur la technique d'émission acoustique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse des signaux. Il présente différentes méthodes de décomposition du signal, à savoir la transformée de Fourier (TF), la transformée de Fourier à fenêtre glissante (STFT), et se focalise ensuite sur la transformée en ondelettes continue (TOC), mieux adaptée à la nature des signaux EA.

Le troisième chapitre est dédié aux techniques de débruitage des signaux, en particulier celles reposant sur la transformée en ondelettes. Une méthode fondée sur l'utilisation des signaux de références mesurés expérimentalement est développée et testée.

Enfin, le quatrième chapitre présente la méthodologie expérimentale adoptée ainsi que les résultats obtenus. Ces derniers sont analysés et discutés afin d'évaluer.

CHAPITRE I

Contrôle non destructif par émission acoustique

1.1 Introduction

Dans les différents secteurs industriels, et en particulier dans le domaine des industries de pointe, les fabricants sont confrontés à un défi majeur : garantir la sécurité des personnes et des équipements, ce qui peut avoir un impact négatif sur la réputation de la marque. Ce défi a encouragé les ingénieurs à développer la technique du « contrôle non destructif » comme solution efficace à ce problème [1]. Cette technique est utilisée tout au long des différentes étapes de fabrication pour détecter les défauts, sans compromettre l'intégrité de la pièce inspectée. Elle connaît une adoption croissante, jour après jour, dans les différents secteurs industriels [2].

Lors de contrôle des matériaux soumis à des sollicitations mécaniques, l'émission acoustique (EA) constitue une technique de contrôle non destructif particulièrement prometteuse pour détecter précocement l'endommagement.

Ce chapitre est structuré en deux sections principales qui constituent des bases essentielles pour introduire les notions élémentaires sur le contrôle non destructif en générale et particulièrement sur la technique d'EA. La première, rappelle les principes des méthodes de contrôle non destructives actuellement appliquées dans la majorité des domaines industriels. La deuxième partie est consacrée à l'état de l'art sur la technique d'émission acoustique qui représente le but principal de notre travail.

1.2. Contrôle non destructif (CND) :

1.2.1. Définition

Le Contrôle Non Destructif(CND) est un ensemble de techniques qui permettent d'inspecter l'intégrité des composants des structures industrielles pour détecter d'éventuels défauts pouvant survenir lors de la fabrication ou pendant la période d'utilisation, sans les endommager ou les détruire. Cette technique permet également de localiser, dimensionner et caractériser d'éventuels défauts

La technique de CND est utilisée dans divers secteurs industriels, en particulier dans ceux qui produisent des pièces de haute valeur en faibles quantités, ou qui nécessitent une grande fiabilité de fonctionnement.

La méthode de contrôle non destructif (CND) utilise une variété d'instruments, tant dans le domaine industriel que dans les laboratoires. Ce type de contrôle vise à vérifier l'intégrité et la performance des matériaux et des structures, en s'assurant qu'ils sont exempts de défauts ou de fissures susceptibles d'affecter leur fonctionnement [2]. Il contribue également à l'amélioration des normes de fabrication en détectant précocement les anomalies au cours du processus de production, ce qui permet de réduire le taux des pièces défectueuses et d'améliorer la qualité du produit final [2]. De plus, le contrôle non destructif joue un rôle clé dans la préservation de la réputation de la marque, en garantissant des produits sûrs et fiables, notamment dans les secteurs sensibles [2]. Ces méthodes se distinguent par le fait qu'elles n'endommagent ni les matériaux ni les structures inspectées, ce qui les rend idéales pour des contrôles réguliers et continus. Elles permettent également de réduire considérablement les risques de pannes ou d'accidents futurs, grâce à la détection précoce des problèmes potentiels avant qu'ils ne s'aggravent. [3]

1.2.2. Le rôle du CND au cours des différentes étapes de fabrication

La technique de Contrôle Non Destructif (CND) est appliquée au cours des différentes étapes de fabrication [2] :

En cours de fabrication	L'utilisation le CND à cette étape constitue une forme de maintenance préventive des composants de la ligne de production, permettant une intervention rapide pour détecter les défauts sans perturber le déroulement du processus de fabrication, ce qui contribue à réduire le temps et le coût de production.
En service	Le contrôle en service est réalisé en tant qu'opération de maintenance visant à détecter les défauts, analyser leurs caractéristiques et identifier les signes d'usure de la pièce. En se basant sur les résultats de ce contrôle, le technicien peut prendre les mesures nécessaires.

Lors de la réception d'un produit	Le contrôle non destructif est utilisé pour s'assurer de la qualité du produit et de sa conformité aux spécifications techniques définies au préalable dans le cahier des charges, ou encore aux normes en vigueur.
Avant la livraison du produit fini	L'inspection, généralement réalisée au sein du département de contrôle qualité, a pour objectif de détecter les défauts ou anomalies dans le produit fini, facilitant ainsi le tri des pièces non conformes avant leur livraison au client.

Tableau 1.1 : CND durant les étapes de fabrication

1.2.3. Principe du CND

Les méthodes de CND consistent à appliquer un type d'excitation à la pièce à inspecter. En présence d'un défaut, cette excitation provoque une perturbation (Figure I.1). Ce défaut est ensuite détecté de manière expérimentale à l'aide de dispositifs tels que des capteurs, des caméras ou des systèmes d'imagerie, ce qui permet de localiser précisément l'anomalie [2]. Selon le type d'excitation on peut distinguer deux principales techniques de contrôle : le contrôle par excitation électromagnétique et le contrôle par excitation mécanique. Les techniques de CND par excitation électromagnétique regroupent plusieurs méthodes utilisées pour exciter ou sonder un matériau à l'aide de rayonnements électromagnétiques (généralement dans l'UV, visible, infrarouge, ou même micro-ondes). Parmi ces méthodes, on distingue notamment les méthodes photo-thermiques, qui reposent sur le couplage entre l'excitation lumineuse (photonique) et une réponse thermique du matériau et les méthodes photo-acoustiques basées sur l'effet mécanique (légère déformation de la surface) provoquée par les photons émis par la source électromagnétique. Quant aux techniques de CND par excitation mécanique, le matériau est excité par des ondes acoustiques, ou diverses contraintes mécaniques, pour ces techniques on distingue les méthodes ultrasonores et les méthodes vibratoires.

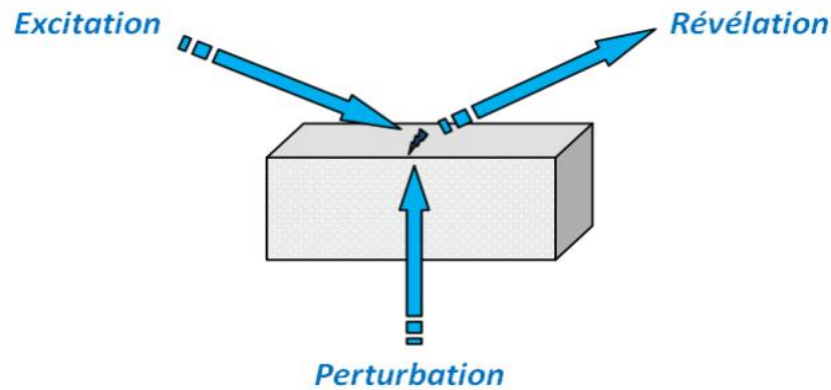


Figure 1.1 : principe du CND [2]

1.2.3.1 L'examen visuel direct

L'inspection visuelle directe consiste à évaluer les caractéristiques externes de la pièce et à détecter les défauts visibles à l'œil nu (Figure I.2).

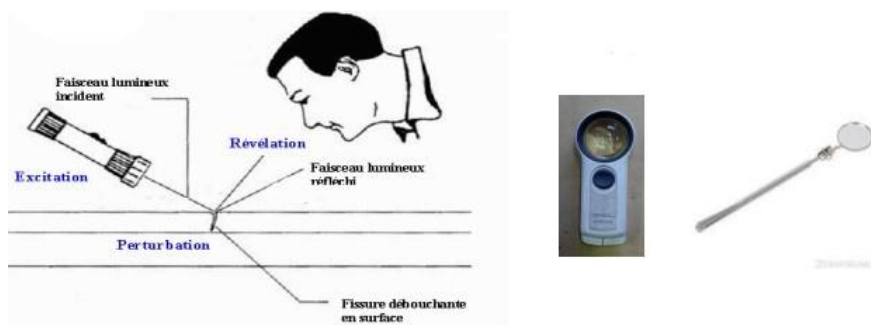


Figure 1.2 : L'examen visuel direct [4]

1.2.3.2 Le ressuage

Ce test consiste à introduire un liquide mouillant dans les fissures apparentes, puis à révéler sa présence à l'aide de méthodes telles que la poudre ou les rayonnements ultraviolets, avant de procéder à un examen visuel de la pièce (Figure I.3).



Figure 1.3 : Le ressuage [4]

1.2.3.3 Le contrôle magnétique

Il permet de détecter les défauts non visibles et proches de la surface en utilisant un champ magnétique ou un fort courant électrique, puis, à l'aide de poudre métallique, les lignes de champ sont visualisées dans les zones des défauts (Figure I.4).

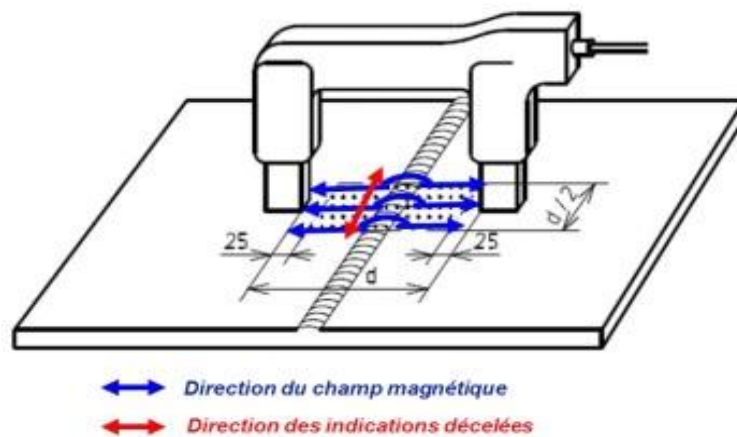


Figure 1.4 : Le contrôle magnétique [4]

1.2.3.4 La radiographie

La radiographie CND est une méthode d'inspection qui utilise des rayons X ou gamma pour visualiser l'intérieur d'un matériau ou d'un composant sans l'endommager. Elle permet d'obtenir une image photosensible de la pièce à examiner, révélant ainsi les zones susceptibles de présenter des défauts tels que les fissures, les porosités et les soudures défectueuses (Figure I.5).

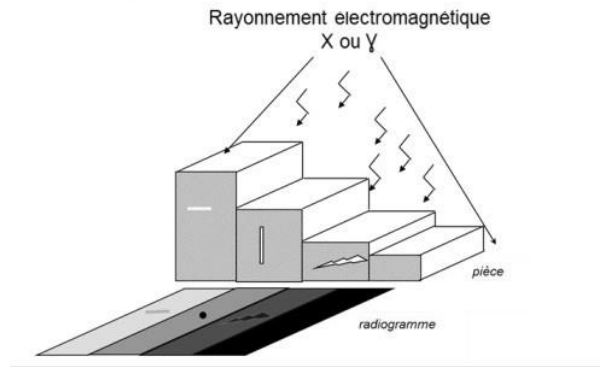


Figure 1.5 : La radiographie [4]

1.2.3.5 Les contrôles par courants de Foucault

Le contrôle par courants de Foucault est une méthode de CND qui utilise des courants électriques induits (appelés *courants de Foucault*) pour détecter des défauts de surface ou proches de la surface dans des matériaux conducteurs, principalement des métaux (Figure I.6). Elle consiste à générer un champ magnétique à l'intérieur d'une bobine déplacée sur la surface d'une pièce métallique. Toute perturbation causée par un défaut dans les lignes de courant ou les courants induits à l'intérieur de la pièce entraînera un changement dans le coefficient d'auto-induction, qui sera détecté.

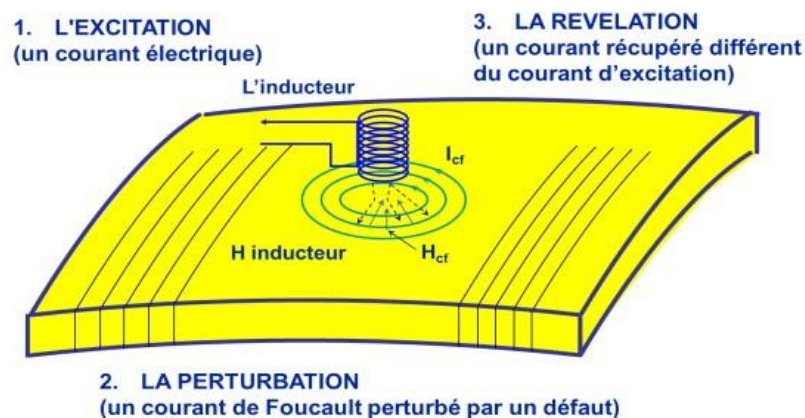


Figure 1.6 : Contrôle par courants de Foucault [4]

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques qui peuvent se propager dans un milieu matériel. Elles se déplacent sous forme d'ondes de compression dans les fluides et

peuvent adopter plusieurs modes dans les solides, notamment les ondes longitudinales et les ondes transversales [1]. Leur vitesse de propagation dépend des propriétés du matériau, comme la densité et le module d'élasticité.

Nous verrons rapidement les méthodes ultrasonores utilisés à l'heure actuelle dans la plupart des secteurs industriels.

1.2.4 Contrôle non destructif par ultrasons (CND)

Le contrôle par ultrasons trouve actuellement dans l'industrie une place importante. Il offre de nombreux avantages par rapport aux autres techniques : un pouvoir de pénétration important, précision dans la localisation des défauts, sensibilité satisfaisante à la détection des défauts, la rapidité et la possibilité de n'utiliser qu'une seule face de l'objet à contrôler. Lors de CND par ultrasons, les ondes ultrasonores sont utilisées pour détecter des défauts dans les matériaux en analysant leur réflexion, leur transmission ou leur absorption. Lorsqu'une onde rencontre une discontinuité (fissure, inclusion) une partie est réfléchi, ce qui permet d'identifier et de caractériser les défauts [2,3]. Du point de vue génération et détection des ondes ultrasonores, on peut classer les techniques de contrôle par ultrasons en deux catégories : les méthodes actives (échographie, ondes guidée, etc.) et les méthodes passives (Emission acoustique, imagerie passive).

1.2.4.1 Principales méthodes de contrôle par ultrasons

1- Contrôle par ondes de volume ultrasonore

Elle consiste à détecter les défauts en balayant la pièce à examiner et en observant les échos reçus. Elle peut être effectuée selon deux techniques différentes : technique par échographie et technique par transmission [2] :

- Méthode par transmission : Utilisation de deux sondes opposées pour détecter les variations de propagation des ondes.
- Méthode à échos (pulse-écho) : Mesure des ondes réfléchies par une discontinuité pour localiser et dimensionner les défauts.

La méthode pulse-écho ou échographie ultrasonore (Figure I.7) est la plus répandue, car elle permet d'obtenir des informations précises sur la position et la taille des défauts grâce à l'analyse du temps d'écho [2].

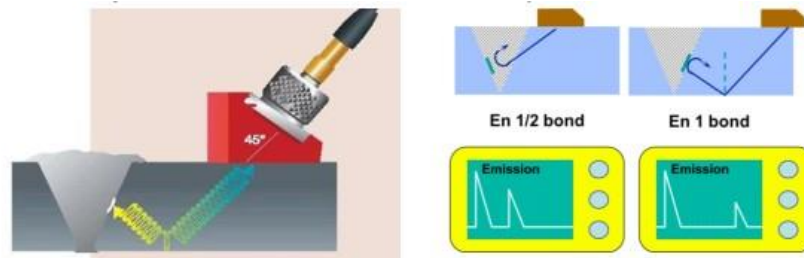


Figure I.7 L'échographie ultrasonore [4]

2- Contrôle par phased-array (PAUT)

Systèmes multiéléments permettant de moduler l'angle du faisceau ultrasonore pour une meilleure imagerie et une inspection plus rapide [3].

3-Contrôle par TOFD (Time-of-Flight Diffraction)

Technique basée sur la diffraction des ondes aux extrémités des défauts, particulièrement efficace pour l'inspection des soudures [3].

4- Contrôle par ondes guidées de Lamb

Le CND par ondes guidées ultrasonore représente un des outils très répandu pour la quantification et l'identification d'éventuels défauts dans les matériaux. En effet, les ondes guidées présentent l'avantage de se propager sur de grandes distances et d'explorer toute l'épaisseur d'une pièce, permettant ainsi d'examiner des grandes surfaces de manière très rapide.

Dans le cadre de notre travail on s'intéresse particulièrement au CND par émission acoustique qui fait partie des techniques de contrôle par ultrasons.

1.3 L'émission acoustique

1.3.1 Généralités

L'émission acoustique est le phénomène de libération d'énergie, sous forme d'ondes élastiques transitoires, résultant de micro déplacements locaux internes au sein d'un matériau soumis à une sollicitation statique ou dynamique (NORME AFNOR NFA 09350). Les premiers phénomènes d'émission acoustique, constatés depuis fort longtemps, sont audibles ; l'exemple le plus courant est le « cri » de l'étain, manifestation audible du maclage étudié par Mason en 1948 [1].

Les premiers travaux concernant les ondes qui s'étendent dans le domaine ultrasonore ont été réalisés en 1950 par Kaiser [2]. L'émission acoustique (E.A) est utilisée en contrôle non destructif pour suivre la propagation des défauts dans des structures soumises à des contraintes mécanique, thermique ou d'un autre type. L'ensemble des fréquences des ondes concernées s'étend entre 20 KHz et quelques MHz. L'EA peut être utilisée pour détecter, en temps réel, un grand nombre de dégradations évolutives affectant les matériaux et structures : propagation des fissures, corrosion, fuites, déformations plastiques, etc.

Cette technique offre deux avantages majeurs. D'une part, elle permet de surveiller en temps réel l'évolution des sources d'EA sans interrompre le fonctionnement de l'équipement. D'autre part, l'EA est une méthode passive, ne nécessitant aucune excitation externe de la structure contrôlée, ce qui réduit le nombre de signaux à analyser. Toutefois, son principal inconvénient réside dans les interférences liées au bruit de fond, qui compliquent l'analyse quantitative des mécanismes à l'origine des émissions acoustiques.

La figure (1.8) illustre le principe de fonctionnement d'un système de surveillance basé sur l'émission acoustique. Lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte, une fissure peut apparaître ou une fissure préexistante peut s'agrandir, libérant ainsi de l'énergie. Cette libération génère une onde élastique transitoire, captée par un capteur placé à la surface du matériau. Cette méthode permet ainsi de détecter en temps réel la présence de défauts en évolution.

On distingue généralement deux formes d'EA [3] : l'émission continue et l'émission discrète. L'émission acoustique continue se manifeste par des signaux ininterrompus, caractérisés par des salves fréquentes et indissociables dans le temps, rendant leur distinction difficile face au bruit électronique et au bruit ambiant. Ce type d'émission est typiquement

observé lors des déformations plastiques des matériaux métalliques. À l'inverse, l'émission acoustique discrète se présente sous forme de signaux bien définis, semblables à des sinusoïdes amorties ou à des salves distinctes les unes des autres.

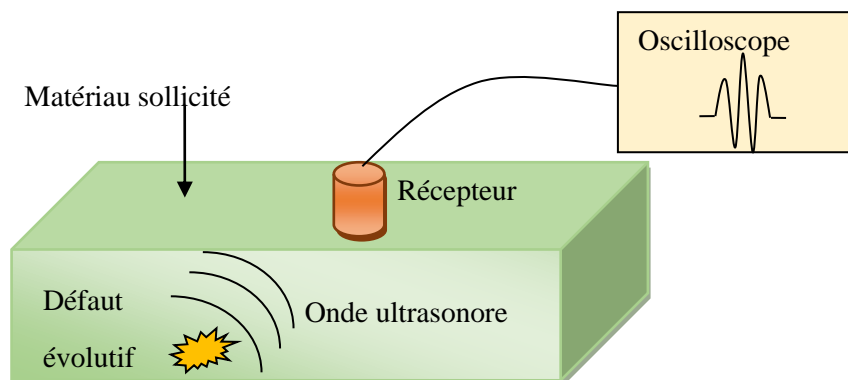


Figure 1.8 Description du phénomène de l'émission acoustique.

1.3.2 Sources d'émission acoustique

Lorsqu'un matériau est sollicité, un ou plusieurs défauts peuvent apparaître ou évoluer, générant une onde mécanique qui se propage à une vitesse déterminée. Ces ondes élastiques sont alors détectables grâce à un capteur positionné à la surface du matériau, qui les convertit en signaux électriques. De nombreux phénomènes physiques peuvent être à l'origine d'émissions acoustiques. Dans les matériaux métalliques, ces sources incluent notamment la fissuration, les inclusions, les transformations de phase, la corrosion (généralisée ou localisée), ainsi que les impacts mécaniques, les glissements ou encore les clivages. En ce qui concerne les composites à fibres, les principales sources d'E.A sont la fissuration de la matrice, la rupture des fibres, la décohésion fibre-matrice, le déchaussement et le délaminage.

1.3.3 Acquisition

L'émission acoustique permet de capter des signaux électriques confirmant l'évolution des mécanismes d'endommagement au sein d'un matériau. Les avancées dans les domaines de l'électronique et de l'informatique ont grandement contribué au perfectionnement de cette méthode de contrôle. Le développement des systèmes informatiques a permis d'améliorer les capacités de stockage et d'acquisition des signaux acoustiques, rendant accessibles des dispositifs performants pour l'enregistrement et le traitement des données. La chaîne d'acquisition fournit ainsi des informations précises sur l'état du système, qu'elle restitue sous une forme exploitable (Figure 1.9).

1.3.3.1 Les capteurs

Les capteurs représentent le premier maillon de la chaîne d'acquisition des données en émission acoustique (E.A.). Leur choix dépend principalement du domaine de fréquences ultrasonores à détecter. Les capteurs les plus couramment utilisés en E.A sont de type piézoélectrique, capables de convertir des vibrations mécaniques en signaux électriques. On distingue deux grandes catégories de capteurs. Les capteurs dits **à large bande** possèdent une réponse régulière sur une large plage de fréquences, pouvant atteindre plusieurs mégahertz. Leur principal avantage réside dans leur capacité à reproduire précisément la forme des signaux, bien qu'ils présentent une sensibilité relativement faible. Les capteurs dits **résonants**, quant à eux, disposent d'une bande passante plus étroite, centrée autour d'une fréquence de résonance. Bien qu'ils altèrent la forme et le contenu fréquentiel des signaux, ils offrent une sensibilité élevée, ce qui les rend particulièrement adaptés à la détection de signaux de faible amplitude.

Pour assurer une bonne transmission des ondes entre la surface de l'échantillon et le capteur, un couplant, généralement à base de graisse silicone, est utilisé.

1.3.3.2 Les préamplificateurs

Les ondes élastiques générées par la libération d'énergie au sein du matériau endommagé se propagent à travers sa structure. Toutefois, une part significative de cette énergie s'atténue en raison des propriétés intrinsèques du matériau, ce qui entraîne une diminution de l'amplitude du signal détecté. Pour compenser cette perte et améliorer la qualité du signal, des préamplificateurs sont généralement utilisés à la sortie des capteurs. Leur gain,

généralement compris entre 20 et 60 dB, permet à la fois d'augmenter le rapport signal/bruit et de filtrer les fréquences indésirables.

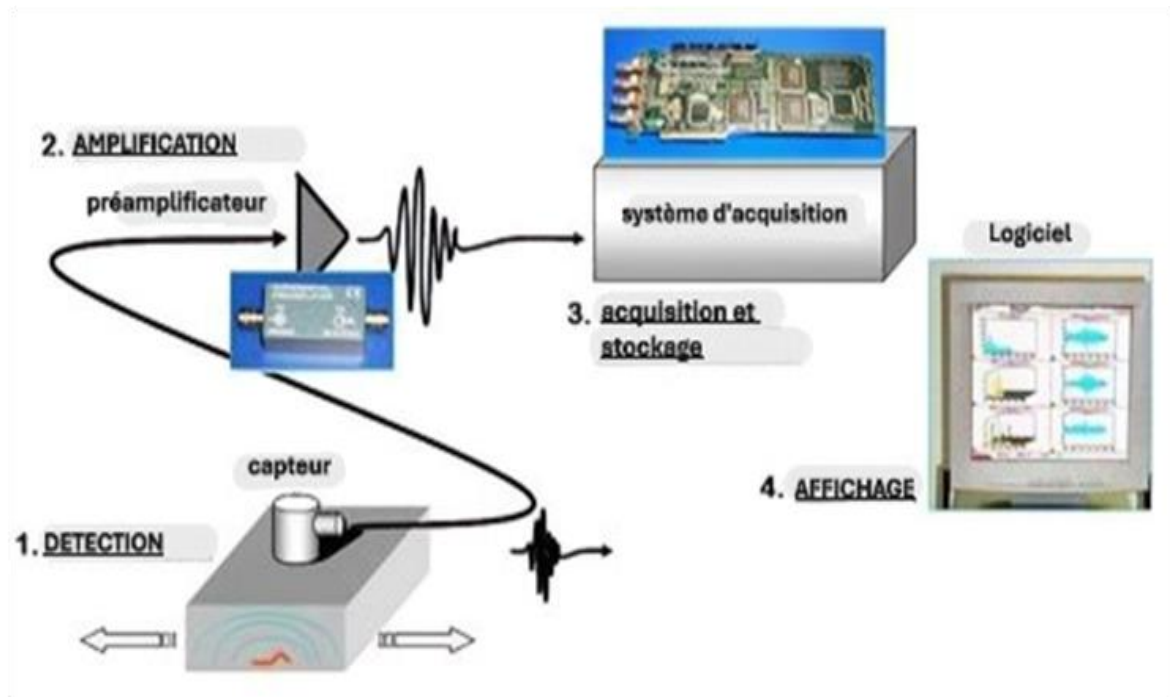


Figure 1.9 : Schéma d'une chaîne d'acquisition des signaux d'émission acoustique. [9]

1.3.3.3 Le système d'acquisition

Les signaux détectés par les capteurs sont collectés puis enregistrés sous forme de fichiers, pouvant être traités ultérieurement à l'aide de logiciels spécialisés, comme MATLAB. Par ailleurs, le système d'acquisition intègre un logiciel embarqué permettant d'extraire des informations sur les salves détectées.

1.3.3.4 Paramétrage d'acquisition

Il est impératif, en amont, de paramétrer correctement le système d'acquisition, notamment en ajustant le gain du préamplificateur, la fréquence d'échantillonnage, les filtres appliqués ainsi que le seuil de déclenchement de l'acquisition

1.3.3.4.1 Seuil d'acquisition

Il représente le seuil de détection en-dessous duquel aucune salve ne sera enregistrée par le système d'acquisition. Le réglage de ce paramètre permet de s'affranchir des bruits

environnants qui correspondent à des bruits électromagnétiques ou des bruits dus à la chaîne d'acquisition.

1.3.3.4.2 Paramètres temporels

Ces paramètres temporels doivent être ajustés afin d'isoler la salve, de définir sa durée et d'éliminer les échos indésirables.

Le PDT (Peak Definition Time)

Permet de déterminer le pic de plus forte amplitude afin, de mesurer le temps de montée de la salve d'E.A.

Le HDT (Hits Definition Time)

Permet de déterminer la fin de la salve (sa durée). Doit être aussi court que possible pour éviter le chevauchement des salves (ce qui équivaldrait à deux salves considérées comme une seule).

Le HLT (Hits Lockout Time)

Permet d'exclure d'éventuelles réflexions tardives dans les signaux d'E.A. Le HLT débute à la fin du dernier HDT.

1.3.3.5 Paramètres exploitables pour l'analyse

L'analyse qualitative et quantitative des mécanismes d'endommagement par émission acoustique (E.A) repose sur l'étude des caractéristiques des signaux détectés par le système d'acquisition. Pour extraire des données pertinentes à partir de ces signaux, il est essentiel d'appliquer une méthode de traitement adaptée. En général, une large gamme de paramètres classiques peut être automatiquement extraite et calculée une fois la salve numérisée. Ces paramètres sont ensuite affichés par le système d'acquisition selon le mode de visualisation choisi par l'utilisateur. Un exemple de signal sous forme de salve est illustré sur la figure I.10.

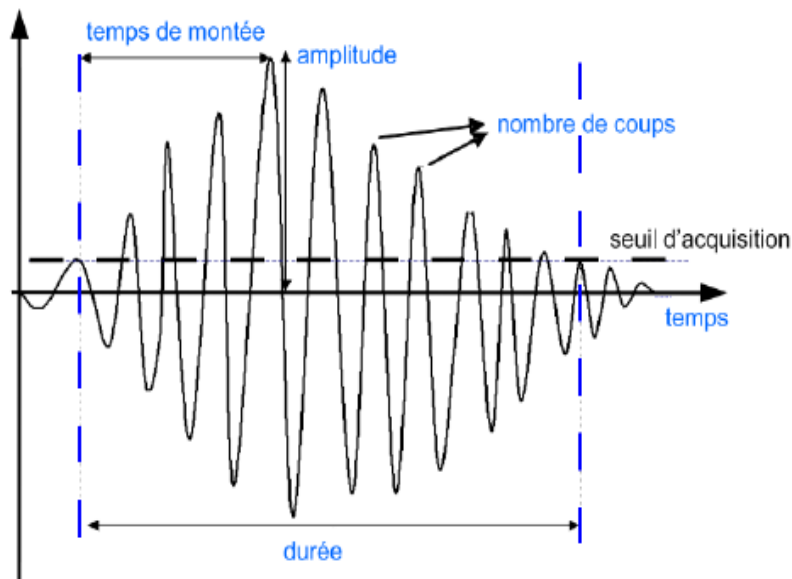


Figure 1.10 : Principaux paramètres d'acquisition des salves d'E.A.

Amplitude maximale : c'est la valeur maximale de la valeur absolue du signal, elle est exprimée en millivolt ou en décibel.

Nombre de coups : c'est le nombre de fois où l'amplitude du signal dépasse le seuil. Ce paramètre est calculé pour chaque salve.

Durée de la salve : Intervalle de temps entre le premier dépassement du seuil et le dernier dépassement du seuil d'une salve.

Temps de montée : temps écoulé entre le premier dépassement du seuil et l'instant où l'amplitude maximale est atteinte.

Le nombre de coups au pic : correspond au nombre de franchissement du seuil par le signal entre le premier dépassement du seuil et l'amplitude maximale.

La fréquence moyenne : rapport du nombre de coups sur la durée de la salve.

L'énergie : intégrale du carré de l'amplitude de la salve : $E = \int A(t)^2 . dt$

La tension efficace moyenne (notée RMS) : elle est considérée comme la racine carré du rapport de l'énergie de la salve E sur sa durée notée D : $RMS = (E/D)^{1/2}$

1.3.4 Techniques pour la localisation des sources d'E.A

Plusieurs travaux rapportés dans la littérature proposent des approches pour résoudre le problème de localisation des sources d'émission acoustique (E.A). Divers algorithmes ont ainsi été développés, permettant une localisation automatique des sources d'E.A à partir des signaux captés par des capteurs placés à la surface du matériau. La majorité de ces méthodes reposent sur le calcul des différences de temps d'arrivée des signaux enregistrés, en tenant compte de la vitesse de propagation des ondes générées. La figure III.4 illustre différentes configurations de capteurs adaptés à la localisation des sources d'E.A selon les géométries des échantillons étudiés.

- une localisation linéaire nécessite l'emploi de deux capteurs
- une localisation plane (2D) nécessite l'emploi d'au moins 3 capteurs
- une localisation 3D nécessite l'emploi de 5 capteurs minimum.

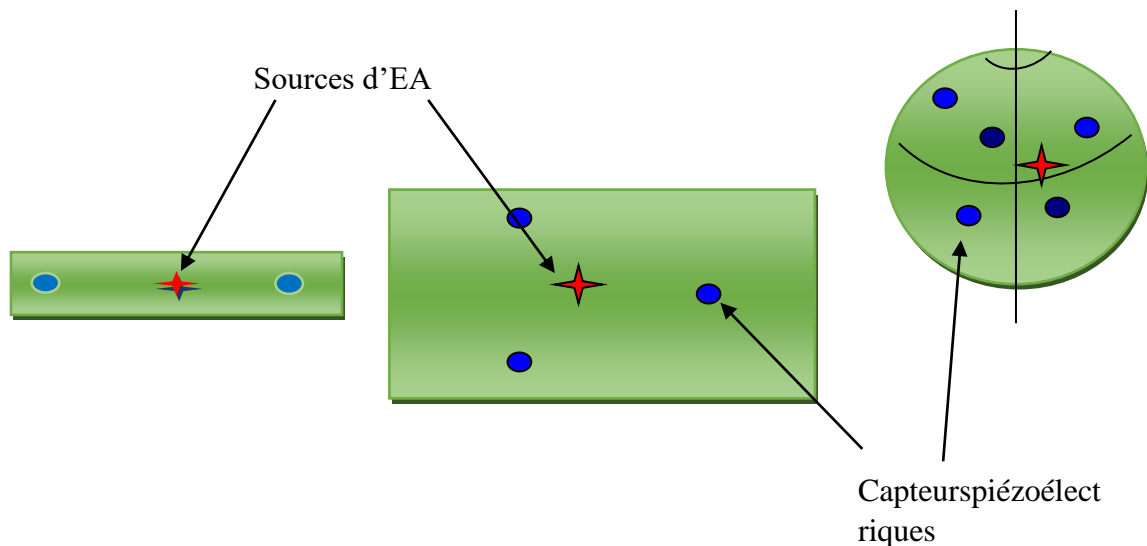


Figure 1.11. Localisation des sources d'E.A

1.3.5 Avantages et inconvénients de la méthode d'émission acoustique (EA)

Le tableau ci-dessous récapitule les avantages et les inconvénients de la technique d'EA.

Avantages	Inconvénients
Surveillance en continu pendant tout l'historique de chargement, sans interrompre l'essai ni déplacer les capteurs.	Reproductibilité limitée : la genèse des fissures est aléatoire, même sur des échantillons identiques.
Peu de capteurs requis , fixés en un ou deux points ; pas de scanning point-à-point ni d'accès aux deux faces nécessaire.	Sensibilité requise très élevée : signaux d'EA beaucoup plus faibles que ceux des ultrasons, d'où besoin d'amplification fiable et de préamplis performants.
Détection en condition réelle ou sous légère surcharge, donc très pertinent pour l'inspection sous charge de service.	Rapport signal/bruit souvent faible à cause du bruit ambiant et de l'affaiblissement des ondes, nécessitant des traitements avancés de filtrage et de localisation.
Spécifique aux phénomènes irréversibles (formation et progression de fissures, frottement interne) ; ne réagit pas aux déformations purement élastiques.	Localisation des sources complexe : base de toute analyse EA, elle réclame plusieurs capteurs et des algorithmes d'inversion sophistiqués.
Pas d'interférence mécanique : le suivi EA n'affecte pas la structure testée et ne demande pas d'injection d'énergie externe.	Nécessité de recouplage : aux techniques visuelles, ultrasons, radiographies, etc., pour valider ou compléter l'interprétation des données.

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients de la méthode d'émission acoustique [7]

1.4 Conclusion

Parmi les différentes méthodes de CND, l'émission acoustique (EA) se distingue comme une méthode de contrôle avancée. Elle offre un fort potentiel dans le suivi de l'endommagement des structures, en particulier dans les domaines où la sécurité et la performance sont des exigences critiques. L'émission acoustique présente l'intérêt majeur de permettre une

surveillance en temps réel, notamment sous conditions de service, et ce, sans perturber le fonctionnement des équipements inspectés. Toutefois, elle requiert un traitement rigoureux des signaux acquis, en raison notamment du faible rapport signal/bruit et des difficultés inhérentes à la localisation précise des sources d'émission.

CHAPITRE II

Analyse des signaux

2.1 Introduction

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons au contrôle non destructif par émission acoustique. Les signaux détectés à l'aide de la technique d'EA portent des informations sur les sources d'endommagement. L'exploitation de cette technique requiert donc une maîtrise approfondie du traitement du signal. La section suivante propose un aperçu des notions fondamentales indispensables pour l'analyse des signaux.

L'analyse des signaux vise à étudier précisément leurs fluctuations et leurs oscillations afin d'optimiser leur codage, d'accélérer leur transmission et d'assurer leur reconstruction fidèle. C'est dans ce cadre que divers outils de traitement du signal, tels que la transformée de Fourier et les ondelettes, ont été développés pour répondre aux exigences croissantes d'efficacité et de précision.

La section suivante présente un bref aperçu historique des fondements mathématiques de la transformée en ondelettes ainsi que de ses principales propriétés, dans le but de mieux en comprendre les bases théoriques. Pour aborder les concepts liés aux transformations par ondelettes, il est essentiel de rappeler au préalable la formulation de la transformée de Fourier classique, ainsi que celle de la transformée de Fourier à court terme (STFT).

La transformée de Fourier, ou plus généralement l'analyse fréquentielle ou spectrale, est un outil fondamental pour la compréhension et la mise en œuvre de nombreuses techniques numériques de traitement des signaux. Cet outil trouve de nombreuses applications dans différents secteurs tels que la reconnaissance vocale, l'amélioration de la qualité des images, la transmission numérique, le milieu biomédical et autres.

2.2 Transformée De Fourier (TF)

L'analyse de Fourier constitue un pilier fondamental en physique et en mathématiques, notamment dans le domaine de traitement du signal. Elle repose sur le concept universel de fréquence et présente une structure qui simplifie grandement certaines opérations courantes, comme le filtrage linéaire. Introduite en 1807, la transformée de Fourier permet de décomposer tout signal en une somme de signaux sinusoïdaux de différentes amplitudes et phases [15]. La transformée de Fourier d'une fonction continue et non périodique $x(t)$ est définie de façon générale par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \dots \dots \dots (2.1)$$

La Transformée de Fourier Discrète (TFD) s'applique à une suite finie de N échantillons $x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1)$, et se calcule à l'aide de la relation suivante :

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad k = 0, \dots, N-1 \dots \dots (2.2)$$

Dans ce cas, Le terme N représente le nombre de points utilisés pour calculer la TFD, Il influence la précision du tracé, tandis que le terme X se rapporte à la résolution en fréquence. [15]

2.3 Transformée de Fourier inverse

Cependant, le signal $x(t)$ peut être reconstruit à partir de sa représentation fréquentielle $X(f)$ à l'aide de la transformée de Fourier inverse définie par la formule [38] :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{-j2\pi ft} dt \dots \dots (2.3)$$

Et l'inverse de la Transformée de Fourier Discrète (TFD) [17] :

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k]e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \dots \dots (2.4)$$

2.4 La Transformée de Fourier Rapide (FFT)

L'algorithme de la Transformée de Fourier Rapide (FFT) constitue une avancée majeure en informatique moderne, car il permet un calcul efficace de la Transformée de Fourier Discrète (DFT) [16]. Développée et popularisée par Cooley et Tukey en 1965 [17], la FFT a considérablement réduit le coût de calcul de la DFT, rendant possibles de nombreuses applications auparavant impraticables.

2.4.1 Définition

La FFT est un algorithme optimisé pour calculer la TFD d'une série de N points de données (possiblement complexes) en environ $N \log_2 N$ opérations [17]. Elle est largement utilisée dans le traitement du signal pour l'analyse des systèmes linéaires [18], offrant une efficacité bien supérieure à celle obtenue par un calcul direct de la TFD [16].

L'histoire de la FFT remonte aux travaux de Danielson et Lanczos, mais sa notoriété actuelle est due aux travaux de Cooley et Tukey [17]. En 1965, ils ont démontré que le nombre d'opérations pouvait être réduit de N^2 à $N \log_2 N$ [17], ce qui représentait un gain computationnel considérable. L'intérêt de Cooley pour cet algorithme est né lorsque Dick Garwin lui a présenté les travaux de John Tukey [20].

La FFT calcule donc la TFD, qui décompose un signal $x[n]$, défini sur $\mathbb{Z}_N = \{0, 1, \dots, N - 1\}$, en une combinaison linéaire de signaux de base orthogonaux [17] :

$$e_k[n] = \frac{1}{N} e^{j2\pi kn/N} \text{ avec } k \in \mathbb{Z}_N, n \in \mathbb{Z}_N \dots (2.5)$$

N : représente le nombre total de points dans le signal discret, n : est l'indice temporel, k : est l'indice fréquentiel.

On peut souligner que la transformée de Fourier peut être utilisée pour décomposer des signaux aperiodiques en un nombre infini de composantes fréquentielles continues, à l'aide d'une intégrale [39].

2.4.2 Applications de la Transformée de Fourier Rapide (FFT)

La FFT est utilisée de manière étendue dans divers domaines, le tableau suivant présente un aperçu de ses applications :

Applications	
Traitement Numérique du Signal	-La FFT est un outil efficace dans le domaine du traitement du signal pour l'analyse des systèmes linéaires. [18]
Analyse Spectrale	-Les techniques FFT sont employées dans les analyseurs de spectre. [19] -Les méthodes du périodogramme (basées sur la FFT) et du corrélogramme sont toutes deux utilisées dans l'analyse spectrale numérique non paramétrique. [19]
Communication Sans Fil	-La FFT est largement utilisée dans les systèmes OFDM (Multiplexage par Répartition Orthogonale de la Fréquence) et

	les systèmes de communication sans fil. [18] -La FFT est appliquée efficacement dans les modems Wi-Fi. [16]
Imagerie	La FFT est utilisée dans les systèmes d'imagerie. [16]
Applications Biomédicales	La FFT est utilisée dans les applications biomédicales (scanners, imagerie par résonance magnétique nucléaire). [16]
Astronomie	-La FFT est utilisée en astronomie (imagerie par synthèse d'ouverture). [16]
Modélisation de la Propagation des Ondes	-La FFT est utilisée dans la modélisation de la propagation des ondes. [16]
Analyse de la Structure Moléculaire	La FFT est utilisée en spectroscopie pour l'analyse de la structure moléculaire. [16]
Cristallographie	La FFT est utilisée en cristallographie. [16]
Surveillance des Machines Électriques Tournantes	La FFT est utilisée dans la surveillance des machines électriques tournantes pour évaluer la compatibilité et la fiabilité du système. [21] Plus précisément, la FFT est employée dans l'analyse de la signature du courant du moteur (MCSA) pour analyser le contenu spectral du courant statorique dans les machines à induction présentant des défauts de barres rotoriques cassées. [21]

Tableau 2.1 Les applications de la FFT

2.4.3 Les avantages et les inconvénients

Les avantages et les inconvénients de la FFT sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Avantages	Inconvénients
- La FFT est un outil puissant pour comprendre les caractéristiques des signaux réels et identifier les erreurs ou anomalies dans les signaux. [22]	- La FFT suppose que le signal est périodique, ce qui peut introduire des erreurs (effet de repliement ou "aliasing") si ce n'est pas le cas.
- Elle permet d'analyser efficacement les différentes fréquences présentes dans un signal d'origine. [22]	- Elle offre une résolution fréquentielle limitée par la durée d'observation du signal (problème de compromis temps-fréquence).
- La FFT réduit considérablement le temps de calcul par rapport au calcul direct de la Transformée de Fourier Discrète (DFT).	- Les signaux non stationnaires sont mal représentés : la FFT classique ne montre pas comment les fréquences évoluent dans le temps.
- C'est une méthode stable, fiable et largement disponible dans la plupart des logiciels et équipements d'analyse.	- Sensibilité aux effets de fenêtrage : si la fenêtre d'observation est mal choisie, elle peut fausser les résultats.

Tableau 2.2 Les avantages et les inconvénients de transformée de Fourier rapide

2.4.4 Exemples

La figure II.1 présente un exemple de deux signaux stationnaires accompagnés de leurs spectres en fréquence. Le premier signal est constitué d'une combinaison de deux sinusoides présentant des fréquences de 50 et 150 Hertz, toutes deux ayant la même amplitude. Le second comprend aussi deux sinusoides, mais avec des amplitudes différentes. L'analyse de Fourier révèle que les deux signaux présentent des raies spectrales identiques, bien que les amplitudes de la FFT soient distinctes.

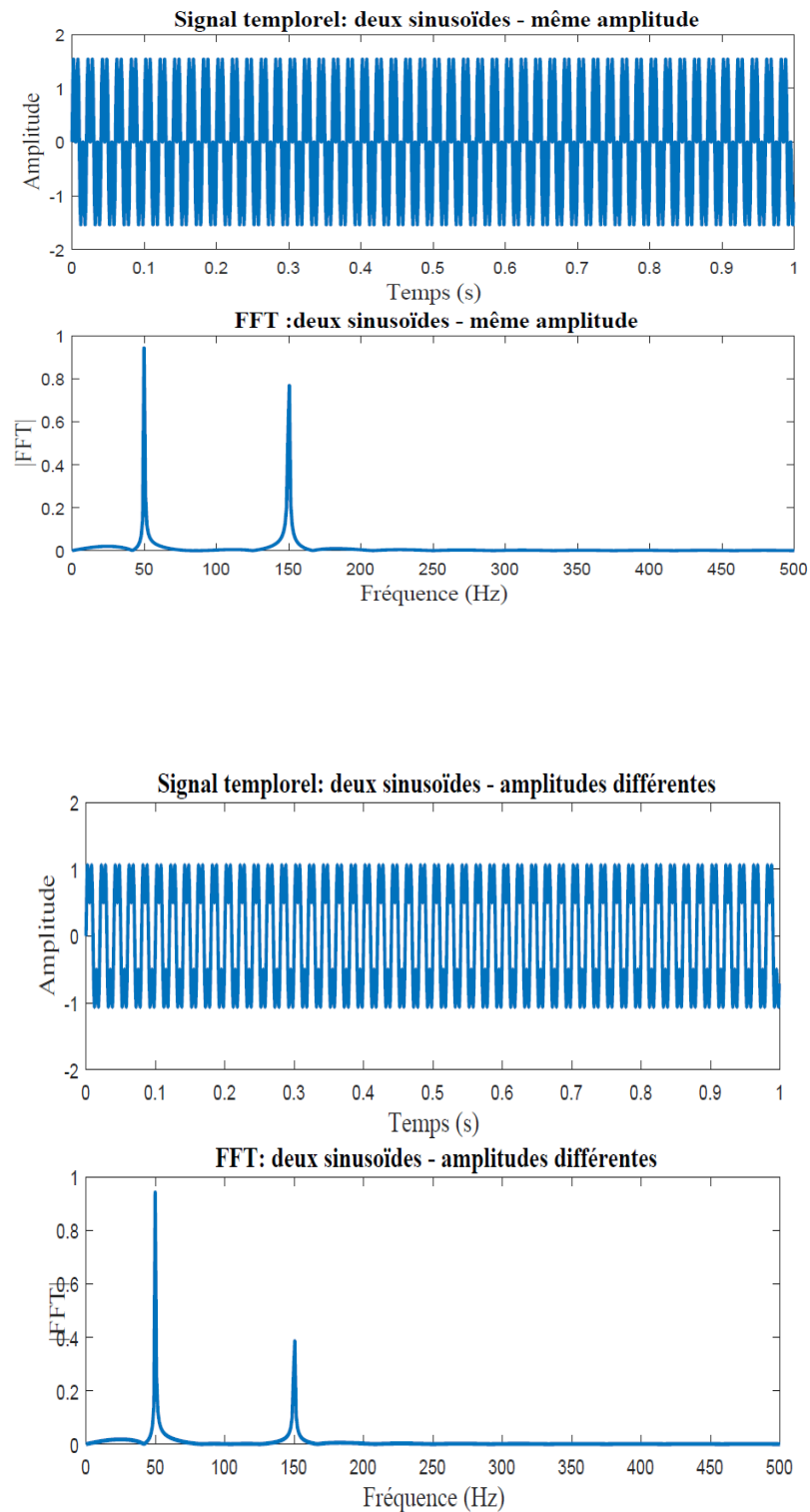


Figure 2.1 Représentation temporelle et fréquentielle de deux signaux stationnaires.

Un second exemple montre un signal dont le contenu fréquentiel change au fil du temps, passant d'une sinusoïde de 30 Hz à une fréquence de 60 Hz, tout en gardant la même

amplitude. Il est évident que l'analyse fréquentielle traditionnelle ne parvient pas à déterminer le moment exact où se produit ce changement de régime dans le signal (figure 2.2).

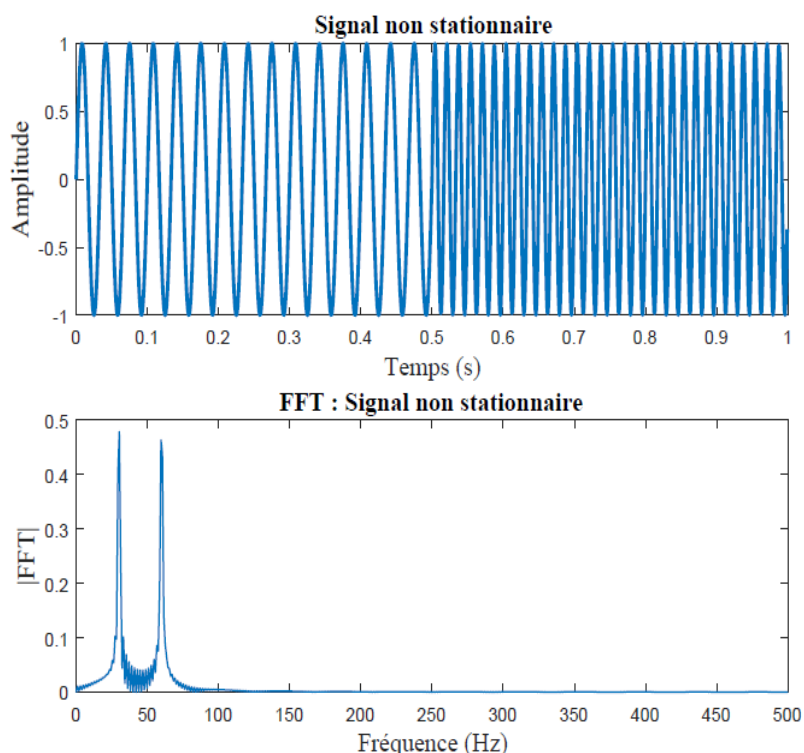


Figure 2.2 Représentation temporelle et fréquentielle d'un signal non stationnaire

La Transformée de Fourier Rapide (FFT) permet d'identifier les fréquences contenues dans un signal, mais elle ne fournit aucune information sur l'évolution temporelle de ces fréquences. Cependant, la FFT ne permet pas de détecter les changements de régime dans le temps. Pour surmonter cette limitation, la Transformée de Fourier à court terme (STFT) est utilisée : elle réalise une analyse locale du signal en appliquant la FFT sur des fenêtres temporelles successives, offrant ainsi une représentation temps-fréquence adaptée aux signaux dont les caractéristiques évoluent au cours du temps.

2.5 Transformée de Fourier à court terme « TFCT ou STFT »

Dans les années 1940, le physicien Dennis Gabor a découvert la première forme de représentation temps- fréquence, il s'agit de la transformée de Fourier à fenêtre glissante TFG. Cette dernière permet de découper le signal à l'aide d'une fenêtre glissante et de

calculer la transformée de Fourier de chaque partie du signal. La Transformée de Fourier à Court Terme (STFT) est une technique utilisée pour analyser les signaux avec des composantes fréquentielles variant dans le temps, ce qui en fait un outil essentiel pour l'étude des signaux tels que la parole et la musique. Le développement de cette technique consiste à analyser de courts segments d'un signal long à l'aide de la transformée de Fourier, souvent réalisée en multipliant le signal par une fenêtre de courte durée. [24]

2.5.1 Définition

La transformée de Fourier à court terme (STFT) est une technique utilisée dans l'analyse des signaux pour examiner comment les composantes fréquentielles d'un signal varient au fil du temps. Elle consiste à diviser le signal en segments de courte durée et à calculer la transformée de Fourier de chacun de ces segments. Cette opération est généralement réalisée en multipliant le signal $x(t)$ par une fonction fenêtre $h(t)$ centrée autour d'un instant T , puis en effectuant la transformée de Fourier sur le produit ainsi obtenu.

Les fonctions fenêtres courantes incluent, par exemple, la fenêtre rectangulaire (qui extrait une portion du signal) et la fenêtre de Hamming (qui applique un lissage pour réduire les effets de bord) [24].

La STFT discrète peut être exprimée mathématiquement par :

$$X(n - w) = \sum_{-\infty}^{\infty} w[n - m]x[m]e^{-j\omega m} \dots (2.8)$$

Où :

$x[m]$ est le signal d'entrée, $w[n]$ est la fonction de fenêtre, n est l'indice temporel de la fenêtre, ω est la fréquence.

Dans le cas continu, la STFT est définie par :

$$F(f, T) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)h(t - T)e^{-j2\pi ft} dt \dots (2.9)$$

$x(t)$ est le signal temporel, $h(t - T)$ est la fenêtre centrée autour de T , f est la fréquence.

La STFT fournit une représentation conjointe temps-fréquence du signal, en deux dimensions (temps T et fréquence f). L'objectif de l'analyse temps-fréquence est de fournir une

description plus riche et plus informative du signal, en révélant la variation temporelle de son contenu fréquentiel.

La STFT a connu des applications dans différents domaines notamment dans le domaine de CND. Elle a permis de détecter et de classifier les défauts artificiels à l'aide d'ondes ultrasonores guidées [29]. En outre, elle a été employée pour évaluer l'épaisseur des revêtements et la qualité de l'adhésion, notamment pour les structures offshore [17].

2.5.2. Les Avantages et les inconvénients

Les avantages ainsi que les inconvénients de la STFT sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Avantages	<ul style="list-style-type: none"> -Le STFT est un outil puissant pour analyser les signaux non stationnaires, permettant de représenter les variations de fréquences au fil du temps, contrairement à la transformée de Fourier classique qui fournit des informations globales et fixes sur les fréquences [26]. - La méthode STFT se distingue par sa capacité à estimer le temps d'arrivée du signal (TOF) avec précision et rapidité, même lorsque le rapport signal sur bruit est faible [26]. - L'utilisation du STFT permet d'analyser les signaux dans le domaine temporel-fréquentiel, offrant des informations précises sur les temps d'arrivée et affichant clairement les modèles de dispersion, améliorant ainsi la détection [26].
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Il nécessite le choix d'une taille de fenêtre appropriée, ce qui rend la précision temporelle ou fréquentielle dépendante de ce choix [28].

	<p>- Le STFT a du mal à analyser les signaux à basse fréquence, ne pouvant pas estimer précisément la forme de l'onde si la fenêtre n'est pas assez longue pour couvrir la période complète [28].</p>
--	---

Tableau 2.3 Les Avantages et les inconvénients de STFT

La STFT utilise une fenêtre de taille fixe, ce qui impose un compromis entre la résolution temporelle et fréquentielle, tandis que la transformée en ondelettes TOC est mieux adaptée à l'analyse des signaux non stationnaires, elle permet une détection plus précise des transitions rapides du signal.

2.6 La transformée en ondelettes

L'analyse par ondelettes est un outil mathématique moderne conçu pour l'étude des signaux réels, complexes et variables dans le temps. Elle permet de décomposer un signal en éléments simples tout en conservant l'information temporelle et fréquentielle, une capacité qui la distingue nettement des méthodes traditionnelles comme la transformée de Fourier (FT) ou sa version à fenêtre courte (STFT) [30, 31].

Contrairement à la STFT qui utilise une fenêtre de taille fixe, la transformée en ondelettes repose sur l'emploi de fenêtres de taille variable, ce qui permet d'obtenir une meilleure résolution fréquentielle à basse fréquence et une meilleure résolution temporelle à haute fréquence. Cette flexibilité rend les ondelettes particulièrement adaptées à l'analyse de signaux transitoires, bruités, ou localement complexes, que l'on retrouve dans des domaines aussi variés que la médecine, la mécanique, l'astronomie ou encore la géophysique [31].

2.6.1 Origine et évolution de l'analyse en ondelettes

Le concept de l'ondelette remonte à 1910 avec Alfred Haar. Plus tard, des contributions majeures furent apportées par Morlet (1983), Meyer (1985), Daubechies (1988), et Mallat (1989), qui posèrent les bases modernes de l'analyse par ondelettes, avec des ondelettes à support compact, orthonormées et compatibles avec une approche multi-résolution.

La FastWaveletTransform (FWT), proposée par Mallat, et le développement des filtres quadrature miroir (QMF) ont permis l'implémentation efficace de la DWT (transformée en ondelettes discrète), essentielle pour le traitement numérique [30].

2.6.2 Fondements mathématiques de la transformée en ondelettes

Une ondelette est une fonction de moyenne nulle, définie par une dilatation contrôlée par un paramètre d'échelle a , et une translation temporelle déterminée par le paramètre b [31]. Ce dernier joue le rôle de paramètre de localisation dans le temps.

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \dots (2.10)$$

La fonction utilisée pour l'analyse est appelée ondelette mère. Elle génère, par dilatation et translation, une famille d'ondelettes appelées ondelettes filles (ou tout simplement *ondelettes*), constituant une base de fonctions. Chaque paire de paramètres (a, b) définit ce que l'on appelle un atome de la transformée en ondelettes.

La fonction ondelette mère $\psi(t)$, doit satisfaire deux propriétés fondamentales [32] :

Moyenne nulle :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad \dots (2.11)$$

Énergie finie :

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad \dots (2.12)$$

La transformée en ondelettes discrète (DWT) :

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad \dots (2.13)$$

$$DWT(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad \dots (2.14)$$

2.6.3 Propriétés des ondelettes

Régularité : On dit qu'une ondelette est régulière d'ordre 'n' si elle est dérivable continuellement jusqu'à 'n' fois. Cela signifie qu'elle est classée dans la catégorie 'c'. Plus une ondelette est régulière, plus la diminution de son spectre à l'infini est rapide. Dans le cas d'une ondelette peu régulière, la décroissance spectrale sera lente et introduira par conséquent des fréquences élevées dans le signal temporel, ce qui est en accord avec une certaine irrégularité. La régularité d'une ondelette est liée au nombre de ses moments nuls. [33, 34]

Compacité : La compacité de la fonction d'échelle améliore la régularité de l'ondelette obtenue. Toutefois, ces convolutions entraînent une augmentation linéaire de la taille du support d'ondelette. Par exemple, les ondelettes de Daubechies possèdent une orthogonalité et un support compact. Elles ont été conçues en assurant une certaine uniformité par la suppression d'un nombre précis « p » de ses instants. Ainsi, il n'est pas possible d'avoir des ondelettes qui sont à la fois compactes et de support compact. Il existe donc un équilibre entre les caractéristiques de régularité et de décroissance vers l'infini. De plus, la caractéristique de support compact assure une grande exactitude dans le calcul réel des coefficients, car elle prévient le problème de troncature lorsqu'il s'agit d'un support à durée infinie sur un support compact assez étroit pour être jugé bien localisé temporellement. [35]

Localisation : La précision de la localisation en termes de temps et de fréquence peut être évaluée par la limite d'incertitude selon le principe d'Heisenberg, qui suppose une localisation optimale. Quand cette incertitude est atteinte, une position incorrecte entraîne une dispersion de l'énergie autour d'un moment et d'une fréquence moyenne pour une échelle spécifique. [30]

2.7 Transformée en ondelettes continue (TOC)

La transformée en ondelettes continue (TOC) permet de décomposer un signal en ondelettes analysées de manière continue à travers différentes échelles et positions. Elle fournit une représentation temps-fréquence du signal avec une résolution variable, adaptée à l'analyse des signaux non stationnaires.

Mathématiquement, la TOC d'un signal $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ est définie par :

$$CWT_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \dots\dots (2.15)$$

Où :

$a \in \mathbb{R}^+$ est le paramètre d'échelle (il contrôle la dilatation ou compression de l'ondelette),

$b \in \mathbb{R}$ est le paramètre de translation (il contrôle le déplacement temporel),

$\psi(t)$ est l'ondelette mère,

$\psi^*(t)$ est le conjugué complexe de l'ondelette mère,

$f(t)$ est le signal analysé.

L'ondelette est mise à l'échelle (étirée ou comprimée) puis translatée pour fournir une analyse multi-résolution du signal. Le résultat est un ensemble de coefficients $CWT_f(a, b)$, représentant le comportement local du signal à différentes échelles et positions temporelles.

La TOC est particulièrement adaptée à l'analyse des signaux continus et permet une représentation conjointe en temps et en fréquence avec une résolution variable. [37]

Le théorème suivant montre que la TOC est inversible et conserve l'énergie du signal, à condition que l'ondelette utilisée vérifie la condition d'admissibilité suivante [40] :

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \dots (2.16)$$

Si cette condition est satisfaite, on dit que ψ est une ondelette admissible.

Alors, la formule de reconstruction inverse du signal est donnée par :

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty CWT_f(a, b) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{db da}{a^2} \dots (2.17)$$

La condition d'admissibilité implique nécessairement que :

$$\hat{\psi}(0) = 0 \dots (2.18)$$

Ce qui signifie que l'ondelette ψ est de **moyenne nulle** :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \dots (2.19)$$

2.7.1 Choix de l'ondelette mère (l'ondelette mère)

La transformée en ondelettes s'appuie sur un élément fondamental : l'ondelette mère. Il s'agit d'une fonction oscillante de courte durée, utilisée pour générer l'ensemble des ondelettes d'une même famille par des opérations de mise à l'échelle et de translation. Différentes ondelettes mères sont conçues afin de s'adapter à divers types de signaux et de contextes d'analyse.

Les propriétés essentielles d'une ondelette mère sont les suivantes :

- **Support compact** : L'ondelette est bien localisée à la fois dans le temps et dans la fréquence, ce qui en fait un outil efficace pour détecter des phénomènes transitoires.
- **Orthogonalité** : Certaines familles, telles que celles de Haar ou de Daubechies, sont orthogonales, permettant une reconstruction exacte du signal initial à partir de ses coefficients d'ondelettes.
- **Moments nuls** : Les ondelettes possédant un nombre élevé de moments nuls sont particulièrement adaptées à la représentation de signaux lisses ou comportant des composantes polynomiales.

Il existe une grande variété d'ondelettes mères utilisables dans le cadre de la transformée en ondelettes, chacune présentant des propriétés particulières telles que la localisation temporelle et fréquentielle, la régularité ou encore la symétrie. Le choix de l'ondelette mère dépend étroitement du type d'application visé.

Les ondelettes mères peuvent être regroupées en deux grandes catégories :

- **Les ondelettes adaptées à l'analyse multirésolution orthogonale**, utilisées dans la transformée en ondelette discrète (DWT), comme l'ondelette de Haar (la plus simple), celle de Daubechies, ou encore celle de Meyer.
- **Les ondelettes utilisées pour la transformée en ondelette continue (CWT)**, telles que l'ondelette gaussienne, le chapeau mexicain, l'ondelette de Morlet, ainsi que leurs variantes complexes : ondelette gaussienne complexe, ondelette de Shannon complexe, ondelette B-spline fréquentielle complexe et ondelette de Morlet complexe.

Ci-dessous sont données les familles des ondelettes sur le tableau (2.4) et les allures de quelques exemples de ces ondelettes sont montrées sur la figure (2.3), obtenues à partir de Matlab et qui restera une source très intéressante en ce qui concerne le type de forme d'ondelettes.

Ondelette	Symbole
Meyer	meyr
DMeyer	dmey
Gaussian	gaus
Mexican_hat	Mexh
Morlet	morl
Complex Gaussian	cgau
Complex Morlet	Cmor
Haar	haar
Daubechies	db
Symlets	sym
Coiflets	coif
BiorSplines	bior
ReverseBior	rbio
Shannon	shan
Frequency B-Spline	fbsp

Tableau 2.4 Famille des ondelettes [Matlab]

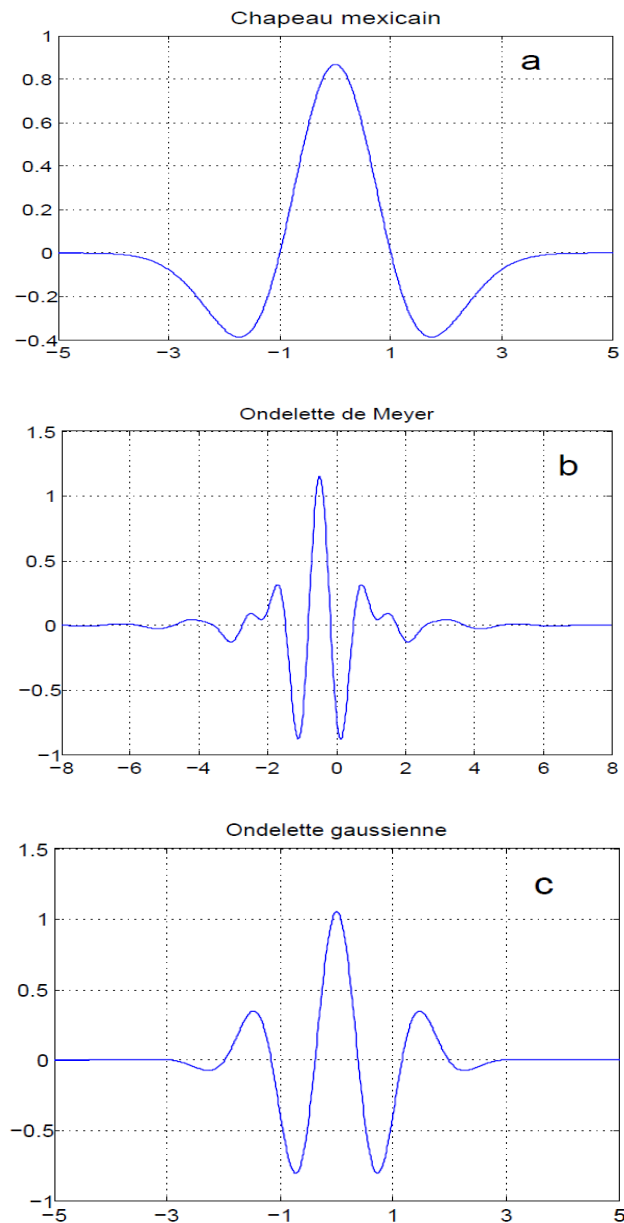


Figure 2.3 Exemples d'ondelettes mères : a) ondelette de chapeau mexicain, b) ondelette de Meyer, c) ondelette Gaussienne.

2.7.2 Ondelette de Morlet complexe

Pour notre étude, nous avons opté pour les ondelettes de Morlet complexes. Elles offrent un excellent compromis entre résolution temporelle et fréquentielle, ce qui les rend particulièrement efficaces pour l'analyse des signaux. Couramment utilisées dans le traitement des signaux ultrasonores, ces ondelettes s'adaptent bien à la morphologie des

signaux analysés et présentent l'avantage d'une mise en œuvre relativement simple sur le plan computationnel.

L'expression mathématique de l'ondelette mère de Morlet complexe est la suivante :

$$\psi_{M,Z_0}(t) = \left(e^{2i\pi t} - e^{\frac{z_0^2}{2}} \right) e^{2\pi^2 \left(\frac{t^2}{z_0^2} \right)} \dots (2.13)$$

L'ondelette de Morlet complexe présente une décroissance exponentielle dans le temps et dans la fréquence, assurant ainsi une localisation optimale selon le principe d'incertitude d'Heisenberg. De plus, elle se distingue par sa régularité et sa symétrie (Figure 2.14).

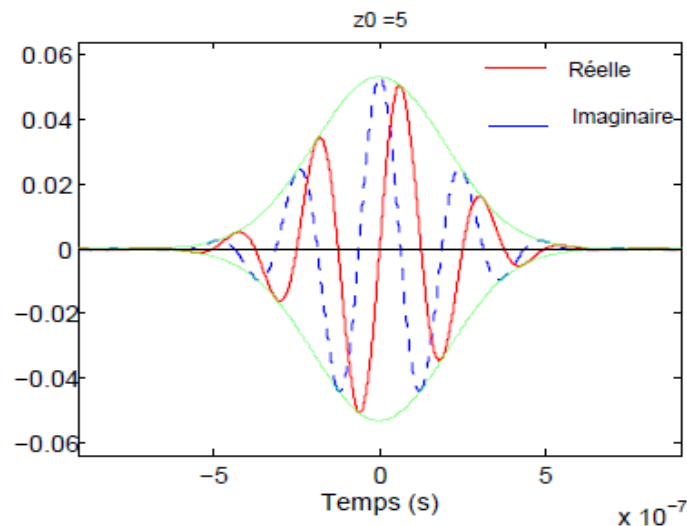


Figure 2.4 Ondelette mère de Morlet complexe pour une valeur de $z_0 = 5$

Le facteur de correction $e^{\frac{-z_0^2}{2}}$ rend l'ondelette de Morlet admissible en assurant que sa transformée de Fourier soit nulle à l'origine. Il a été démontré que la condition d'admissibilité est satisfaite lorsque le second terme de l'expression de l'ondelette peut être négligé, ce qui est généralement le cas pour des valeurs de $Z_0 \geq 5$.

Il est possible de choisir différentes familles d'ondelettes de Morlet pour analyser les données d'EA) en faisant varier le facteur d'enveloppe Z_0 qui détermine le nombre d'oscillations contenues dans le paquet d'ondelettes. D'après l'équation (II.13), l'ondelette de Morlet peut être interprétée comme la différence entre une gaussienne modulée et une fonction gaussienne. Si le second terme est négligeable, l'ondelette se réduit alors à une gaussienne

modulée, dont la transformée de Fourier prend la forme d'une gaussienne centrée sur la fréquence porteuse. Ainsi, Z_0 apparaît comme un paramètre clé qui régule la propagation des ondelettes dans le domaine fréquentiel, influençant leur bande passante.

2.7.3 Exemples

Dans cet exemple, nous avons réalisé une analyse temps-fréquence sur deux signaux extraits d'une base de données expérimentale. L'objectif est de visualiser la variation fréquentielle dans le temps de ces signaux à l'aide de la Transformée en Ondelettes Continues (TOC) ou CWT). Les figures I.5 et I.6 illustre que les ondelettes de Morlet offrent un compromis satisfaisant entre la résolution temporelle et fréquentielle pour l'analyse du signal.

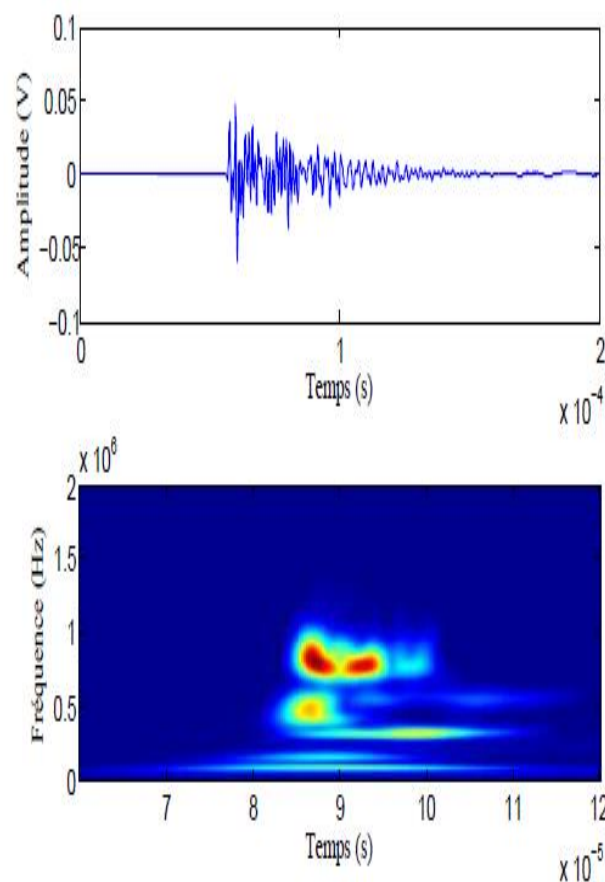


Figure 2.5 Analyse par TOC du premier signal d'EA

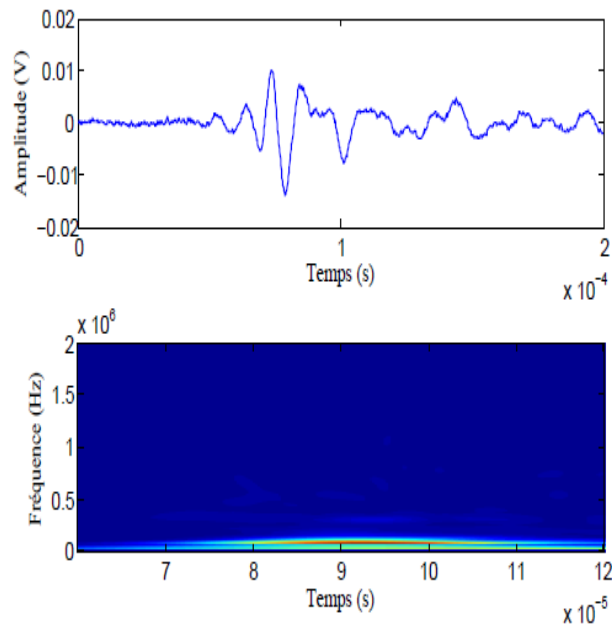


Figure 2.6 Analyse par TOC du deuxième signal d'EA

2.8 Conclusion

La transformée en ondelettes continue (TOC) permet d'analyser les signaux non stationnaires, c'est-à-dire dont le contenu fréquentiel varie au cours du temps. Contrairement à la FFT qui fournit une analyse globale, la TOC donne une carte deux dimensions temps-fréquence, permettant d'identifier précisément quand se produisent les changements de fréquence.

Chapitre III

Débruitage des signaux d'émission acoustique

3.1 Introduction

L'un des principaux obstacles rencontrés lors de l'analyse des signaux d'émission acoustique (EA) est la présence de bruit, souvent inhérent aux sources d'EA, ce qui compromet l'efficacité des méthodes d'identification. Ce bruit provient à la fois de la chaîne d'acquisition et des perturbations mécaniques induites par les conditions de l'essai. L'un des objectifs majeurs de notre étude consiste donc à optimiser l'analyse des signaux d'EA en mettant en œuvre une méthode efficace de débruitage.

Cela permettra d'éliminer une partie du bruit présent dans le signal à analyser, contribuant ainsi à améliorer le rapport signal sur bruit (RSB). Ce bruit peut être atténué en utilisant un filtre passe-bande, en sélectionnant une gamme de fréquences spécifique lors du processus de reconstruction du signal.

Dans la littérature, plusieurs techniques de filtrage ont été développées dans le but d'améliorer le rapport signal sur bruit [41, 42]. Toutefois, leur efficacité demeure limitée, notamment lorsque les composantes du bruit et les signaux utiles présentent des caractéristiques fréquentielles similaires, rendant leur séparation difficile. Ces dernières années, de nombreuses recherches ont proposé de nouvelles approches pour optimiser ce rapport dans divers domaines, tels que le traitement de la parole ou d'images. De manière générale, le bruit présent dans les signaux est souvent modélisé comme un bruit blanc gaussien.

Dans cette étude, nous proposons une méthode de débruitage des signaux d'émission acoustique, fondée sur l'exploitation du bruit réel mesuré dans des conditions expérimentales précises. Le principe central de cette approche consiste, d'une part, à extraire les caractéristiques du bruit à partir des signaux enregistrés sur le matériau avant l'application de la charge, et d'autre part, à soustraire ces caractéristiques de celles du signal à analyser. La mise en œuvre de cette méthode nécessite l'adoption d'une procédure d'analyse-synthèse des signaux.

En raison du caractère non stationnaire et transitoire des signaux d'émission acoustique, une base de décomposition issue d'une famille d'ondelettes est utilisée. Parmi les approches de débruitage, celle reposant sur le principe du seuillage appliqué à la transformée en ondelettes apparaît comme la plus adaptée.

Dans le cadre de ce travail, nous proposons une méthode d'analyse capable de prendre en compte les signaux d'émission acoustique enregistrés dans une gamme d'amplitudes plus

faible que celle généralement exploitée, comprise entre 25 et 30 dB. Le débruitage est effectué à l'aide de la transformée en ondelettes continue. L'amélioration du rapport signal sur bruit obtenue grâce à cette approche permet d'accroître la sensibilité du dispositif d'EA, ouvrant ainsi la voie à la détection des signaux précurseurs auparavant inaccessibles.

3.2 Etat de l'art des techniques de débruitage des signaux

Il existe une variété de techniques de débruitage des signaux. Dans la section suivante on rappelle brièvement les méthodes les plus utilisées.

3.2.1 Techniques dans le domaine temporel

Il existe trois méthodes principales, le filtrage linéaire [43], le filtrage adaptatif et les techniques basées sur la modélisation. La première consiste à remplacer chaque point par la moyenne ou par la médiane des points voisins dans une fenêtre temporelle. Pour le filtrage adaptatif, on distingue le filtre de Wiener qui est basé sur les statistiques local et le filtre de Kalman utilisé dans les systèmes dynamiques pour estimer l'état d'un système à partir de mesures bruitées.

3.2.2 Techniques dans le domaine fréquentiel

3.2.2.1 Filtrage passe-bas/passe-bande

Ces techniques requièrent comme première étape la transformée du signal dans le domaine fréquentiel et elles sont basées sur la suppression des fréquences hors de la bande utile [43].

3.2.2.2 Soustraction spectrale

Basée sur la transformée de Fourier, cette méthode suppose que le bruit peut être estimé et soustrait dans le domaine fréquentiel [45]. Lorsqu'un signal $x(t)$ est mixé par un bruit additif $n(t)$, le signal bruité s'écrit :

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad \dots (3.1)$$

Dans le domaine fréquentiel la FFT du signal bruité est donnée par :

$$Y(f) = X(f) + N(f) \quad \dots (3.2)$$

$X(f)$ et $N(f)$ sont respectivement les transformées de Fourier du signal et du bruit. Il est nécessaire d'effectuer un estimé de l'amplitude fréquentielle du bruit. Une fois cet estimé connu, il ne reste qu'à soustraire la valeur obtenue du signal :

$$X(f) = Y(f) - N(f) \dots (3.3)$$

3.2.2.3 Filtrage de Wiener

Le filtrage de Wiener dans le domaine fréquentiel est une technique de débruitage qui vise à restaurer un signal dégradé par un bruit en minimisant l'erreur quadratique moyenne entre le signal estimé et le signal original. Cette méthode repose sur l'estimation des spectres de puissance du signal et du bruit, permettant de construire un filtre qui atténue les fréquences dominées par le bruit tout en conservant celles contenant des informations utiles du signal.

En transformant le signal bruité dans le domaine fréquentiel (généralement par transformée de Fourier), le filtre de Wiener est appliqué à chaque composante fréquentielle selon la formule :

$$H(f) = \frac{S(f)}{S(f)+N(f)} \dots (3.4)$$

Où, $S(f)$ et $N(f)$ sont les densités spectrales de puissance du signal et du bruit respectivement.

Ce type de filtrage est particulièrement efficace dans des situations où le bruit est additif et stationnaire, et lorsque aucune information précise sur le bruit n'est accessible (filtrage « aveugle »). [46]

3.2.3 Méthodes statistiques et adaptatives

3.2.3.1 Débruitage bayésien

Le débruitage basé sur l'approche bayésienne est une méthode statistique visant à réduire le bruit dans les images ou les signaux à l'aide de modèles bayésiens. Cette technique considère le signal comme une variable aléatoire, contrairement aux approches traditionnelles qui le traitent comme une quantité fixe et inconnue. Les données observées sont combinées avec des connaissances préalables sur les propriétés statistiques du signal via une distribution a priori. La distribution a posteriori ainsi obtenue est ensuite utilisée pour estimer l'image ou le signal original en appliquant des règles d'inférence bayésienne, telles que l'estimation du maximum a posteriori (MAP). [47]

3.2.3.2 Seuillage adaptatif

La seuillage adaptatif est une technique essentielle en traitement d'images, utilisée principalement pour la segmentation, afin de distinguer les éléments du premier plan de ceux de l'arrière-plan. Contrairement aux méthodes traditionnelles de seuillage global, qui appliquent une valeur fixe à l'ensemble de l'image, le seuillage adaptatif se distingue par sa capacité à ajuster dynamiquement la valeur du seuil en fonction des variations locales de l'image. Cette adaptation dynamique est cruciale, car les images réelles sont souvent affectées par des problèmes tels qu'un éclairage inégal, des ombres ou des contrastes variables, rendant les méthodes globales inefficaces. Le seuillage adaptatif calcule une valeur spécifique pour chaque pixel ou région locale, généralement basée sur les caractéristiques des pixels environnants. Ce procédé permet une segmentation plus précise des images, même dans les cas où les conditions d'éclairage et de contraste varient spatialement. [48]

3.2.4 Techniques d'apprentissage automatique basées sur l'intelligence artificielle (IA)

Le débruitage de signaux à l'aide de l'intelligence artificielle (IA) constitue une application majeure dans les domaines du traitement du signal, de l'audio, de l'image et des données biomédicales. Son objectif principal est d'éliminer le bruit (interférences, parasites, erreurs) présent dans un signal mesuré, afin de reconstituer au mieux le signal d'origine. Parmi les approches basées sur l'IA, les réseaux de neurones convolutifs (CNN) sont les plus couramment utilisés, notamment pour le traitement des images et des signaux vocaux [49].

3.3 Débruitage par ondelettes

Depuis plusieurs décennies, les chercheurs s'efforcent de développer des techniques de débruitage toujours plus performantes, capables d'éliminer le bruit sans altérer l'intégrité du signal [50, 51]. Les premières méthodes classiques reposaient principalement sur la soustraction spectrale, une approche consistant à supprimer le bruit dans le domaine spectral via la transformée de Fourier [52]. Toutefois, ces techniques se sont révélées souvent lourdes à mettre en œuvre et peu efficaces dans certaines situations. En réponse à ces limitations, le débruitage par ondelettes s'est imposé comme une alternative prometteuse. Cette méthode repose sur des algorithmes à la fois simples et efficaces. En particulier, l'utilisation de la transformée en ondelettes combinée à des techniques de seuillage s'est révélée être un outil extrêmement puissant dans de nombreuses applications de traitement du signal [53].

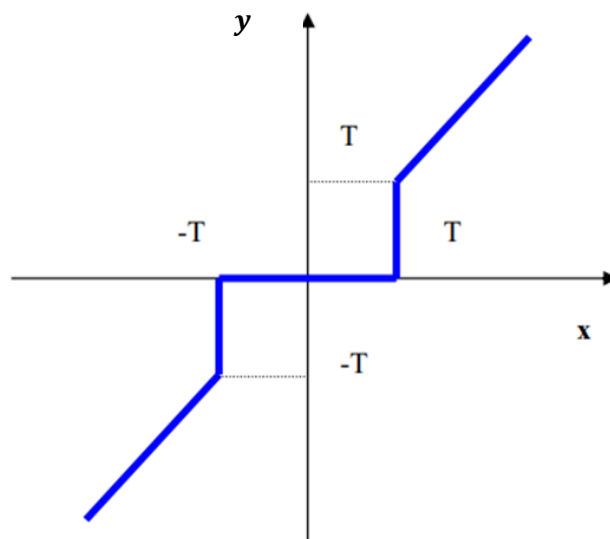


Figure 3.1 Courbe de seuillage dur.

Il est important de noter que les coefficients de faible amplitude (inférieurs au seuil T) sont considérés comme du bruit et donc annulés, tandis que les coefficients de plus grande amplitude sont conservés tels quels. Cette méthode présente l'avantage de préserver intégralement l'amplitude des coefficients significatifs, mais elle peut engendrer des discontinuités dans le signal reconstruit.

2. Le seuillage doux

Le seuillage doux réduit l'amplitude de chaque coefficient d'une valeur égale au seuil T , tout en supprimant les petits coefficients afin de réduire le nombre de discontinuités dans le signal débruité (Figure III.2).

La fonction de seuillage doux est donnée par :

$$y = \begin{cases} \text{sign}(x)(|x| - T), & \text{si } |x| > T \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \dots \dots \dots (3.6)$$

Où $\text{sign}(x)$ désigne la fonction signe.

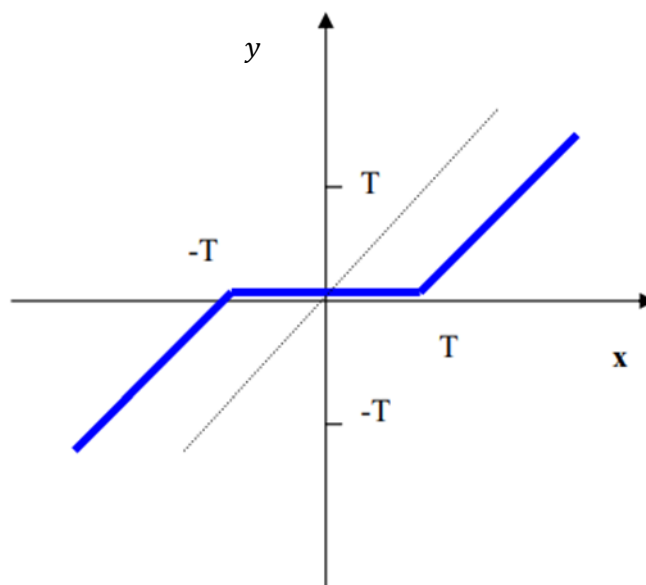


Figure 3.2 Courbe du seuillage doux

Les petits coefficients sont annulés, et les grands coefficients sont réduits de T , ce qui lisse davantage le résultat. Cette méthode présente l'avantage de produire une reconstruction plus régulière (moins d'artefacts). Cependant, elle réduit l'amplitude même des coefficients significatifs.

L'efficacité du débruitage par seuillage dépend principalement du choix du seuil et de l'adéquation entre la famille d'ondelettes utilisée et les caractéristiques des signaux à traiter. La majorité des travaux existants en débruitage par ondelettes reposent sur l'utilisation de la transformée en ondelettes discrète non redondante [57]. Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi d'utiliser la transformée en ondelettes continue à coefficients complexes. Pour ce qui est du seuil, notre approche consiste à exploiter les propriétés du bruit réel mesuré expérimentalement, afin d'estimer les seuils optimaux à utiliser lors de l'opération de seuillage.

3.4 Description de l'algorithme de débruitage

La stratégie de débruitage adoptée repose sur l'application d'un seuillage doux combiné à l'utilisation de la transformée en ondelettes continue. En particulier, l'ondelette de

Morlet complexe a été retenue pour l'analyse. Dans le cadre de cette étude, les seuils appliqués aux coefficients présentent une dépendance conjointe à l'échelle et au temps. Il convient également de souligner que ces seuils sont estimés de manière empirique, à partir de plusieurs réalisations expérimentales issues de la chaîne d'acquisition du dispositif d'EA.

La figure (3.3) illustre les différentes étapes de l'algorithme de débruitage proposé.

✓ *Etape 1 : Estimation des seuils*

La première étape consiste à estimer le seuil pour les coefficients d'ondelette. Pour le faire, un ensemble de signaux de bruit réel ont été exploités. Ensuite, chacun de ces signaux est décomposé à l'aide de la transformée en ondelettes continue (TOC). Par conséquent, la matrice des coefficients d'ondelettes associée à chaque signal de bruit $n(t)$ est calculée. Dans l'étape qui suit, on calcule la matrice des coefficients $T(a, b)$ dont les éléments sont les estimateurs des différents modules des coefficients d'ondelettes pris des signaux de bruit rassemblés.

$T(a, b)$ correspond à la valeur du seuil, associée au coefficient d'ondelette localisé par le paramètre d'échelle a et le paramètre de temps b dans le plan temps-fréquence. Les seuils $T(a, b)$ ont été estimés à l'aide des données extraites de TOC appliqués à plusieurs images du bruit $n(t)$ prélevés juste avant l'application de l'essai de traction. Si on désigne par $M_n(a, b)$ les modules de la TOC des images du bruit $n(t)$, le seuil $T(a, b)$ est donné par :

$$T(a, b) = F(M_n(a, b)) \dots (3.7)$$

La fonction F est un estimateur de la variable aléatoire $M_n(a, b)$, obtenue à partir d'un ensemble d'images représentant le bruit. Dans ce travail, cette fonction est définie comme la moyenne des $M_n(a, b)$.

✓ *Etape 2 : Application de l'algorithme de seuillage doux*

L'élimination du bruit s'effectue au moyen de la technique de seuillage doux sur la base des coefficients d'ondelettes calculés pour le signal d'E.A. considéré.

Soit $CWT_f(a, b)$ les coefficients d'ondelettes associés au signal d'EA analysé $x(t)$.

La procédure de seuillage doux appliquée aux $CWT_f(a, b)$ est :

$if\{|CWT_f(a, b)| > T(a, b)\}, then$
 $MCWT_x(a, b) = (|CWT_x(a, b)| - T(u, s))e^{i \arg(CWT_f(a, b))},$
 $else,$
 $MCWT_x(a, b) = 0;$
 end

($MCWT_f(a, b)$) représentent les coefficients d'ondelettes associés au signal $x(t)$, modifiés à l'aide de la technique de seuillage doux.

✓ **Étape 3. Reconstruction du signal d'EA.**

Une fois les composantes de bruit supprimées, le signal débruité $y(t)$ est reconstruit à l'aide de la transformée en ondelettes continue inverse (TOCI) :

$$y(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty MCWT_f(a, b) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{db da}{a^2}$$

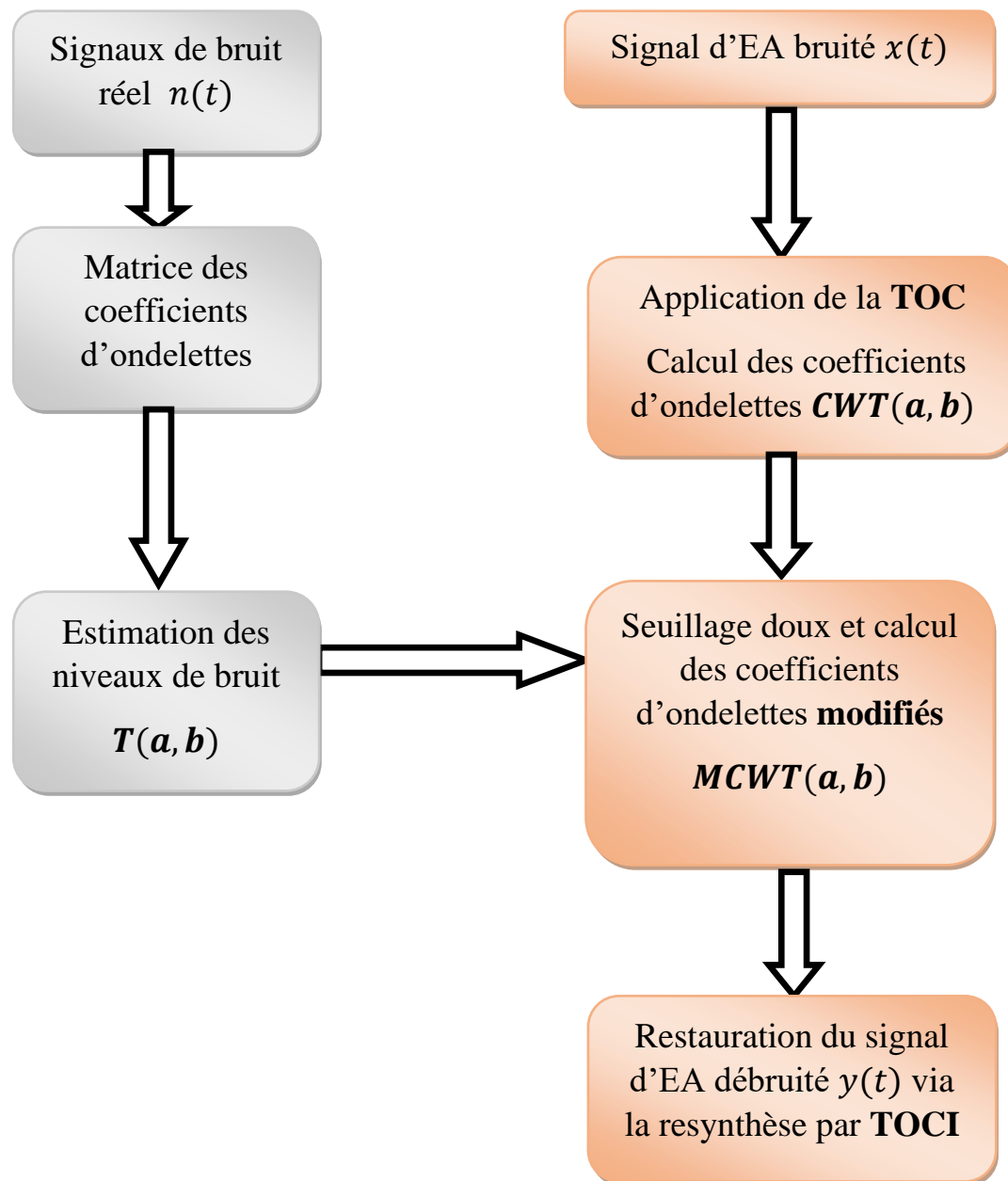


Figure 3.3 Algorithme de débruitage des signaux d'EA

Chapitre IV

Résultats et discussion

4.1 Introduction

Au cours de ce travail de mémoire un ensemble des signaux d'émission acoustique a été utilisé afin d'appliquer la procédure proposée. Ces derniers ont été collectés auparavant lors des travaux de recherche de A.Satour réalisés au Laboratoire d' Acoustique de l'Université du Maine (LAUM).

4.2 Procédure expérimentale

Pour évaluer l'efficacité de la technique de débruitage proposée dans le but de réduire le seuil de détection de dispositif d'EA, un ensemble des signaux d'EA a été enregistré à l'aide d'une méthode expérimentale réalisée auparavant au laboratoire d'Acoustique de l'université du Maine LAUM. Des matériaux composites de type verre_epoxy ont été sollicités en appliquant des contraintes mécaniques. En particulier, des essais de traction statique suivis par émission acoustique ont été effectués sur des éprouvettes en composites stratifiés à plis croisés.

4.2.1 Description du matériau

Notre approche a été appliquée sur des signaux issus d'un échantillon de matériaux composites stratifié de type résine-époxy de plis croisés($45^\circ, -45^\circ$).Un stratifié est une structure souvent utilisée pour la fabrication des pièces composites, il est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun des orientations par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié, ces couches sont liées entre elles par l'intermédiaire de la matrice (Figure IV.1). Ces matériaux possèdent des caractéristiques mécaniques intéressantes avec un poids léger. Ils sont utilisés dans plusieurs domaines de l'industrie tels que les technologies modernes de l'espace, l'industrie biomécanique, automobile, ferroviaire, navale, etc. *Les dimensions des échantillons sont : 20 X 250 X 3 mm (Figure IV.1).*

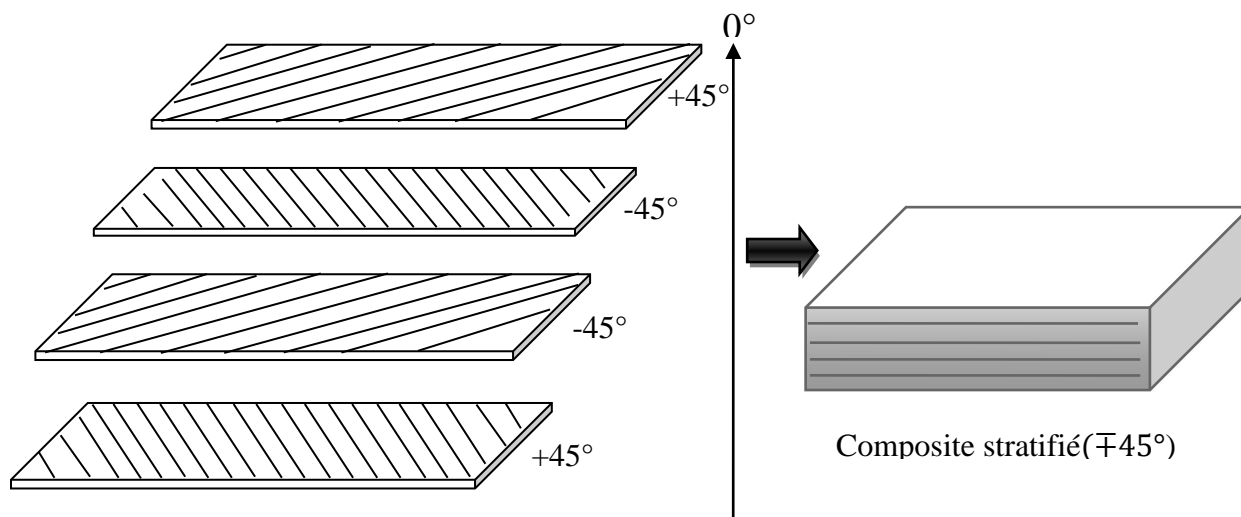


Figure 4.1 Géométrie d'un spécimen en composite $[\pm 45^\circ]$.

4.2.2 Essais mécaniques suivis par émission acoustique

Des essais de traction statique appliqués sur des éprouvettes en composite stratifié ont été réalisés à l'aide d'une machine hydraulique de traction de type « INSTRON » modèle 8516 (Figure 4.2-a), équipée d'une cellule de force de capacité 100 KN. Cette dernière est munie de mors auto-serrant interchangeables selon les dimensions des échantillons. Les essais sont réalisés à température ambiante.

Lors de ces expériences, un système d'acquisition des données d'E.A. (Figure 4.2-d) de la société Euro Physical Acoustics (E.P.A) a été utilisé avec deux voies d'acquisition. Les signaux d'E.A. sont détectés à l'aide des palpeurs piézoélectriques (Figure 4.2-b) et sont amplifiés en utilisant deux préamplificateurs de 40 dB de gain (Figure 4.2-c). Ils sont ensuite échantillonnés avec une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz en prenant 5021 points. Les signaux sont enregistrés par le système d'acquisition pour traitement ultérieur. Des tests préliminaires ont permis de déterminer les paramètres des fenêtres temporels optimales : PDT = 50 μ s, HDT = 100 μ s, HLT = 400 μ s.

Nous soulignons que tous les essais effectués ont été arrêtés avant la rupture finale des spécimens. Des tests préliminaires réalisés sous ces conditions expérimentales ont montré que le seuil d'acquisition exigé doit être fixé à 30 dB afin, d'empêcher la détection des signaux liés au bruit et dans le but d'acquérir des signaux d'E.A. avec un bon RSB. Cependant, nous

pouvons diminuer le seuil en tenant compte des signaux dont l'amplitude est en-dessous de 30 dB, par exemple entre 25 dB et 30 dB. Dans ce cas, les signaux d'origine du bruit doivent être considérés.

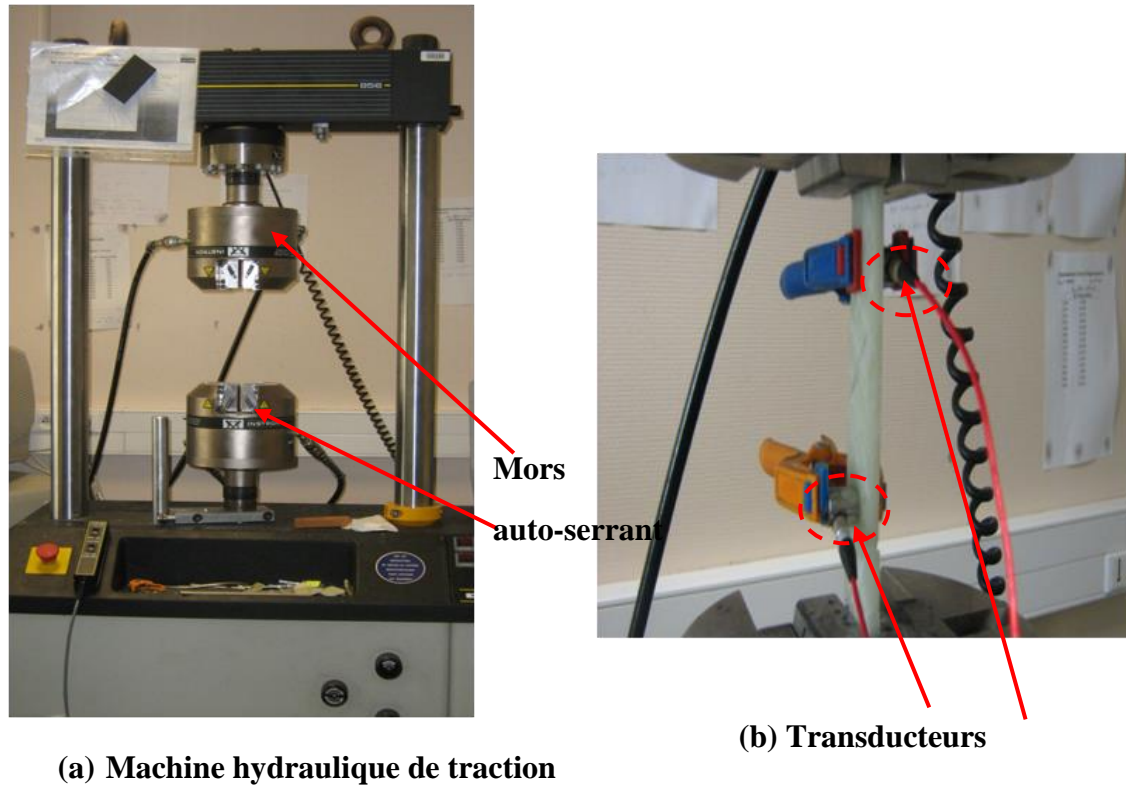
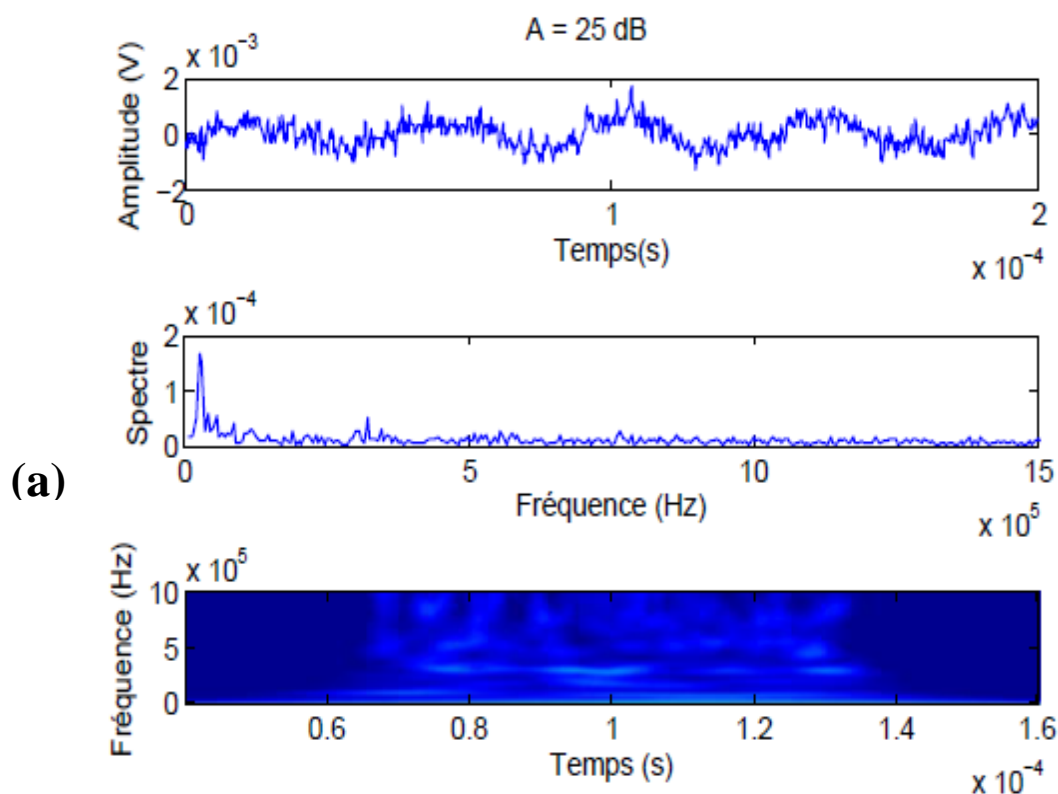


Figure 4.2 Dispositif expérimental, (a) machine de traction INSTRON, (b) Amarrage de l'éprouvette et disposition des capteurs de l'E.A, (c) Préamplificateurs, (d) Système d'acquisition d'E.A.

4.3 Résultats

4.3.1 Signaux détectés avant l'essai de traction

Notre approche proposée pour le débruitage des signaux d'EA consiste dans un premier temps à calculer le seuil pour les coefficients d'ondelettes en utilisant des signaux associés au bruit pur. Ces signaux ont été détectés à l'aide d'une expérience qui nous a conduits à enregistrer les signaux qui proviennent de l'échantillon, juste avant le lancement des essais quasi-statiques. Le système d'E.A. est disposé à enregistrer le bruit ambiant au moment où la machine de traction est mise en marche, le spécimen est bien fixé, tandis que la charge appliquée est encore fixée à 0. Ces conditions expérimentales vont permettre de prélever des signaux d'origine bruit avec une amplitude qui s'étend de 22 dB jusqu'au seuil réglé auparavant à 29 dB. Dans la figure (IV.3) deux formes de signaux typiques liés au bruit, dont l'amplitude est de l'ordre de 25 dB et 29 respectivement sont représentés. Cette figure montre la variation de l'amplitude en fonction du temps, le spectre fréquentiel ainsi que le scalogramme associé à chaque signal. En observant ces signaux, on peut facilement noter que les deux signaux sont de nature aléatoire. En plus, le contenu fréquentiel correspondant à chacun des deux signaux analysés présente une composante fréquentielle très importante dans la gamme de bases fréquences comprise entre 20 KHz et 60 KHz.



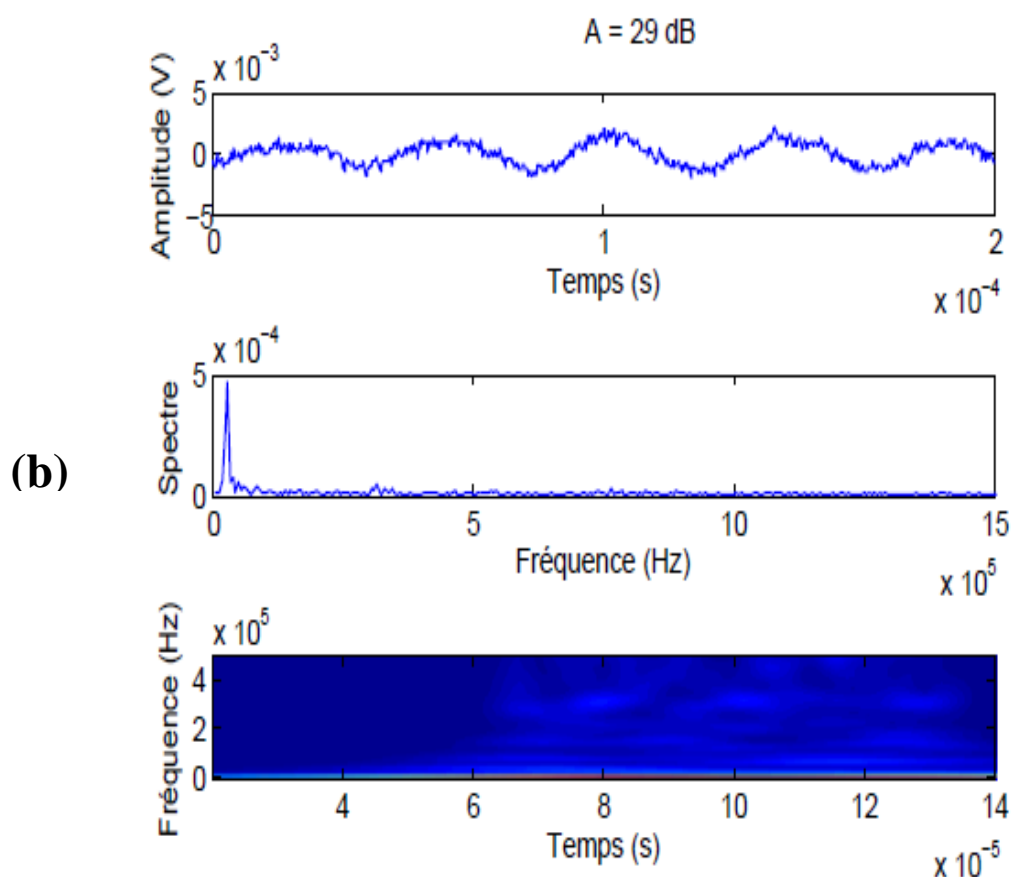


Figure 4.3 Caractéristiques des signaux de bruit prises à 25 dB (a) et à 29 dB (b).

4.3.2 Signaux détectés après l'essai de traction

Durant un essai de traction quasi-statique, on applique une déformation (ou un déplacement) très lentement, et on observe comment la contrainte évolue dans le temps.

Afin d'avoir accès aux signaux ayant des amplitudes inférieures au seuil d'acquisition déterminé à une valeur de 30 dB par le système d'EA, nous avons proposé de réduire le seuil d'acquisition pour ce test jusqu'à 25 dB. Le test a été arrêté avant la rupture finale de l'échantillon. Au cours de cet essai appliqué sur un spécimen de composite à plis croisés l'évolution de l'amplitude des salves d'E.A. ainsi que la charge appliquée en fonction du temps de test ont été relevés. Le résultat est représenté sur la figure (4.4).

Il est important de noter que l'activité d'émission acoustique (E.A) évolue au cours du temps. Au début de l'essai (entre 0s et 200s) seulement quelques événements d'E.A sont enregistrés. Puis, entre 200 et 380 secondes l'activité acoustique augmente progressivement, marquant l'approche d'une phase d'accélération. Enfin, dans la phase finale de l'endommagement, un grand nombre d'événements d'E.A apparaissent, indiquant une augmentation importante des mécanismes d'endommagement.

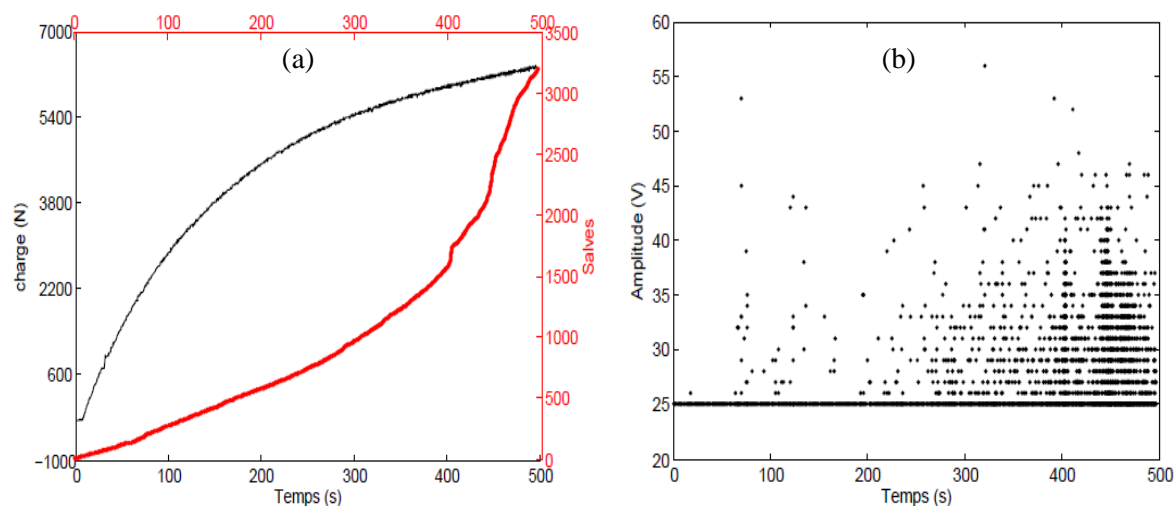


Figure 4. 4 Evolution de l'activité acoustique au cours du temps d'une éprouvette de composite, (a) La charge et le nombre de salves, (b) Amplitude des salves.

En général, lors d'un essai d'émission acoustique (E.A.), on s'attend à obtenir un nombre limité d'événement susceptibles d'être analysés et identifiés à l'aide d'une méthode de classification appropriée. Par exemple, selon la figure IV.4, environ 3200 événements d'E.A ont été détectés, avec une amplitude majoritairement comprise entre 25 et 55 dB. Si l'on adopte un seuil d'acquisition de 30 dB, le nombre d'événements pris en compte serait réduit à environ 900. Cela implique qu'environ 70 % des signaux d'émission acoustique (E.A.) détectés présentent une amplitude comprise entre 25 et 30 dB, une plage généralement associée au bruit de fond. Nous proposons de prendre en compte également les signaux de faible amplitude, en particulier ceux apparaissant aux premiers stades du processus d'endommagement.

Cette démarche devrait être conduite en deux étapes :

1. Identifier, de manière globale, les signaux potentiellement informatifs en les comparant à ceux enregistrés avec un seuil d'acquisition fixé à 30 dB.
2. Étant donné que les signaux de faible amplitude présentent un rapport signal/bruit (RSB) réduit, il devient essentiel de développer une méthode de discrimination efficace permettant de distinguer les événements d'E.A. significatifs du bruit ambiant.

Pour pouvoir capter les signaux de faible amplitude, il est nécessaire de réduire le seuil d'acquisition. Toutefois, cette réduction entraîne la détection d'un grand nombre de signaux indésirables, principalement dus au bruit, qui ne présentent aucun intérêt pour la caractérisation de l'endommagement. Afin de distinguer les signaux d'E de ceux générés par le bruit, nous avons appliqué le critère SFM.

4.3.3 Mesure de la Platitude du Spectre (Spectral Flatness Measure SFM)

La Mesure de la Platitude du Spectre (SFM) est un indicateur qui permet d'évaluer la répartition de l'énergie d'un signal dans le domaine fréquentiel. Elle est particulièrement utile pour distinguer les signaux structurés du bruit aléatoire (comme le bruit blanc).

Le concept de planéité spectrale traditionnelle a été introduit pour la première fois dans le cadre d'une étude portant sur l'analyse de la prédiction linéaire des signaux vocaux. Cet indicateur permet d'évaluer le degré de "blancheur" du spectre d'un signal, en se basant sur l'observation que les signaux blancs à distribution gaussienne aléatoire présentent un spectre uniforme et équilibré [56]. Dans le traitement audio, le SFM aide à réduire le bruit de fond des signaux vocaux lors de l'enregistrement, du stockage et de la transmission [57]. Il est aussi utilisé pour la détection d'activité vocale, améliorant la robustesse en environnements bruyants [58]

Sur le plan mathématique, la SFM est définie comme le rapport entre la moyenne géométrique et la moyenne arithmétique des puissances spectrales d'un signal, selon la formule suivante :

$$G_x = \sqrt[1/N]{\prod_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2} \dots (4.1)$$

$$A_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 \dots (4.2)$$

$$SFM = \frac{G_X}{A_x} \dots (4.3)$$

Dans l'équation ci-dessus, $X(k)$ représente l'amplitude du spectre à la fréquence k , N étant le nombre de coefficients dans la représentation fréquentielle, ce paramètre permet de mesurer le degré de platitude du spectre du signal. Une valeur de SFM élevée indique que le spectre a la même quantité d'énergie dans toutes les bandes de fréquence, par contre une valeur de SFM faible indique que l'énergie du signal est concentrée dans un nombre relativement restreint de bandes, ce serait typiquement à spectre impulsionnel.

Le SFM a été calculé pour tous les signaux d'EA enregistrés durant le chargement de l'échantillon et pour l'ensemble des signaux de bruit purs. La figure (4.5) représente les valeurs du SFM calculée avant et après le débruitage des signaux. En comparant les deux figures (a) et (b), on note bien qu'avant le débruitage des signaux, il s'avère difficile voire impossible de séparer les deux classes des signaux. En revanche, les signaux liés au bruit pur (avec une amplitude inférieure ou égale à 25 dB) sont bien séparés avec les signaux d'EA ayant une amplitude supérieure à 30 dB et cela après l'application du processus de débruitage. La figure (b) montre que dans le cas d'un bruit pur, le SFM est supérieure à 0,001, alors que 99 % des signaux d'EA avec une amplitude $A \geq 30$ dB ont une valeur de SFM inférieure à 0.001.

Ces résultats montrent que le SFM constitue un paramètre extrêmement pertinent pour distinguer les signaux associés aux phénomènes d'endommagement de ceux générés par le bruit. Par conséquent, dans la gamme d'amplitude inférieure au seuil d'acquisition (25 dB-30 dB), nous retenons seulement les signaux ayant un SFM (après débruitage) inférieure à 0.001.

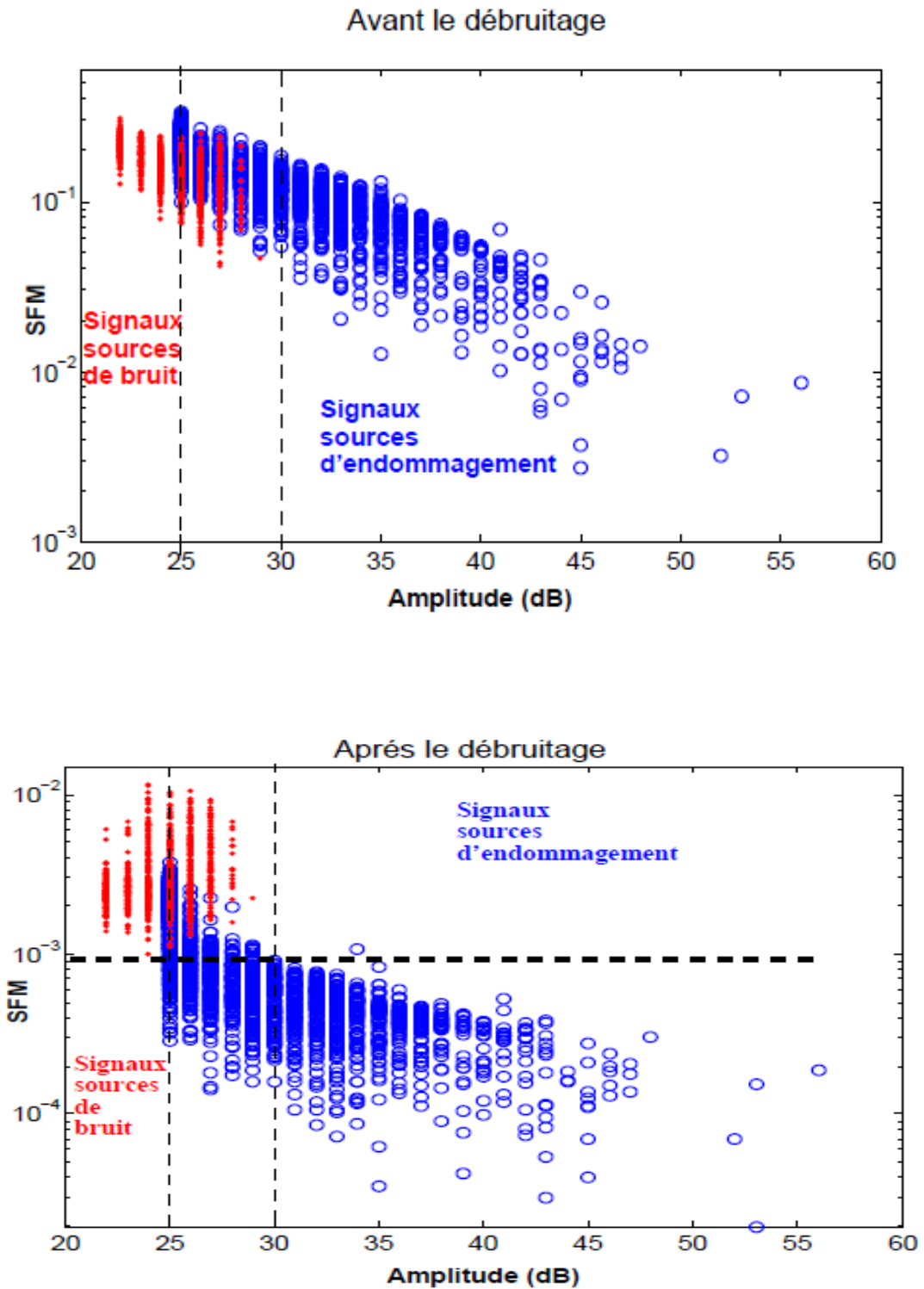


Figure 4.5 SFM calculé avant et après débruitage des signaux d'origine bruit (.) (Juste avant le chargement lorsque l'échantillon est prêt à être testé), et (o) tous les signaux enregistrés pendant le chargement.

Les figures (4.6.a) et (4.6.b) représentent les résultats de débruitage appliqué sur deux modèles de signaux d'amplitudes 25 dB, le premier correspond à un bruit pur et le deuxième est éventuellement lié à un mode d'endommagement.

Pour le premier signal, on constate qu'après le débruitage, la majorité de l'énergie du signal a été supprimée. En outre, le SFM calculé pour ce signal est de l'ordre de 0.05, donc il est contenu dans la gamme de SFM supérieur à 0.001. Cependant, pour une même amplitude (25 dB), la figure (4.6.b) illustre un exemple où le processus de débruitage a abouti à un signal qui semble pertinent pour la caractérisation. Cette procédure a permis de montrer qu'une partie significative de l'énergie liée au bruit est supprimée du signal initial. Plus précisément, la valeur du SFM obtenue est inférieure à 0,001. (SFM \approx 0.0004).

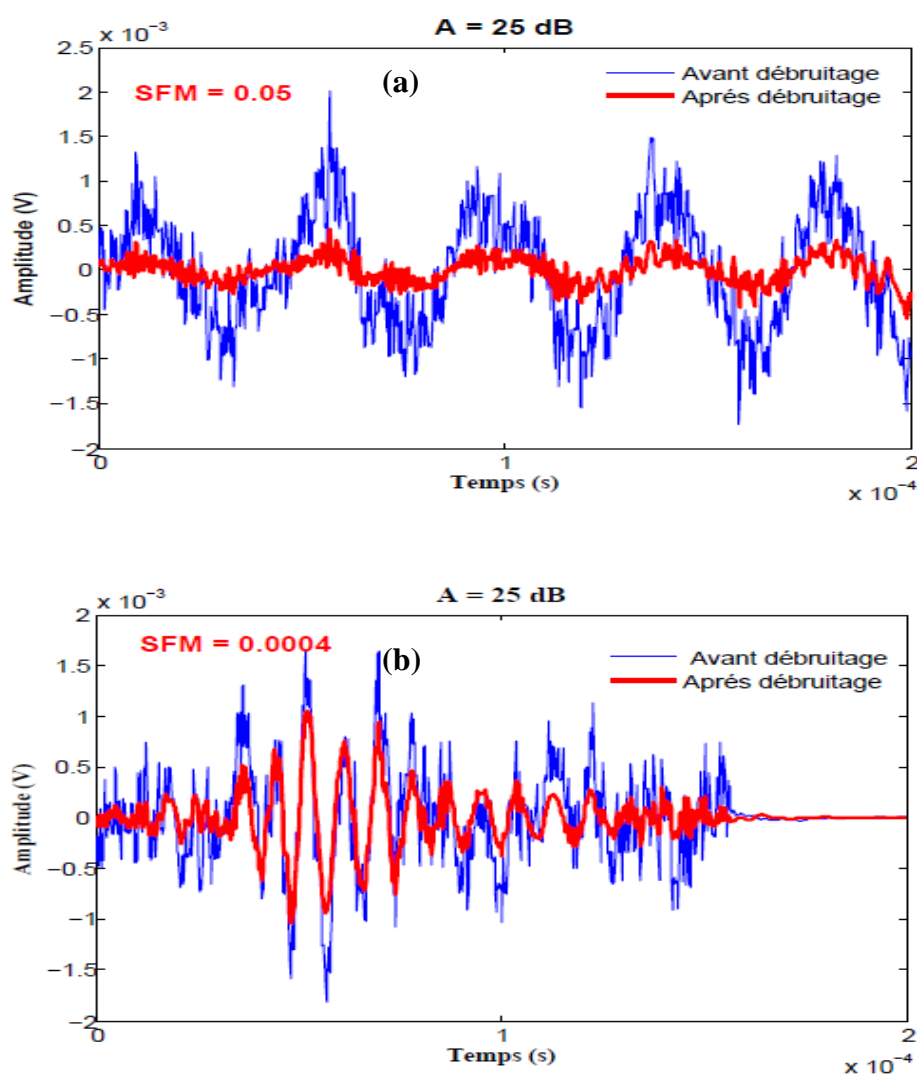


Figure 4.6 Procédure de débruitage appliquée à deux signaux d'amplitude 25 dB : (a) premier signal avant et après débruitage ; le débruitage du signal indique une corrélation

avec le bruit ($SFM > 0,01$) ; (b) second signal avant et après débruitage ; le débruitage du signal montre qu'il n'est pas corrélé au bruit ($SFM < 0,01$).

Par ailleurs, ces derniers signaux ont été comparés par leurs représentation temps-fréquence et cela après le débruitage. La figure (4.7) montre les scalogrammes des deux signaux débruités. Il est clair que pour le premier signal l'énergie est répartie sur tout le domaine temporel ainsi que le domaine et fréquentiel, il s'agit donc d'un signal aléatoire lié au bruit. Quant au deuxième signal on note bien une localisation concentrée de l'énergie, donc par conséquent ce signal ne correspond plus au bruit.

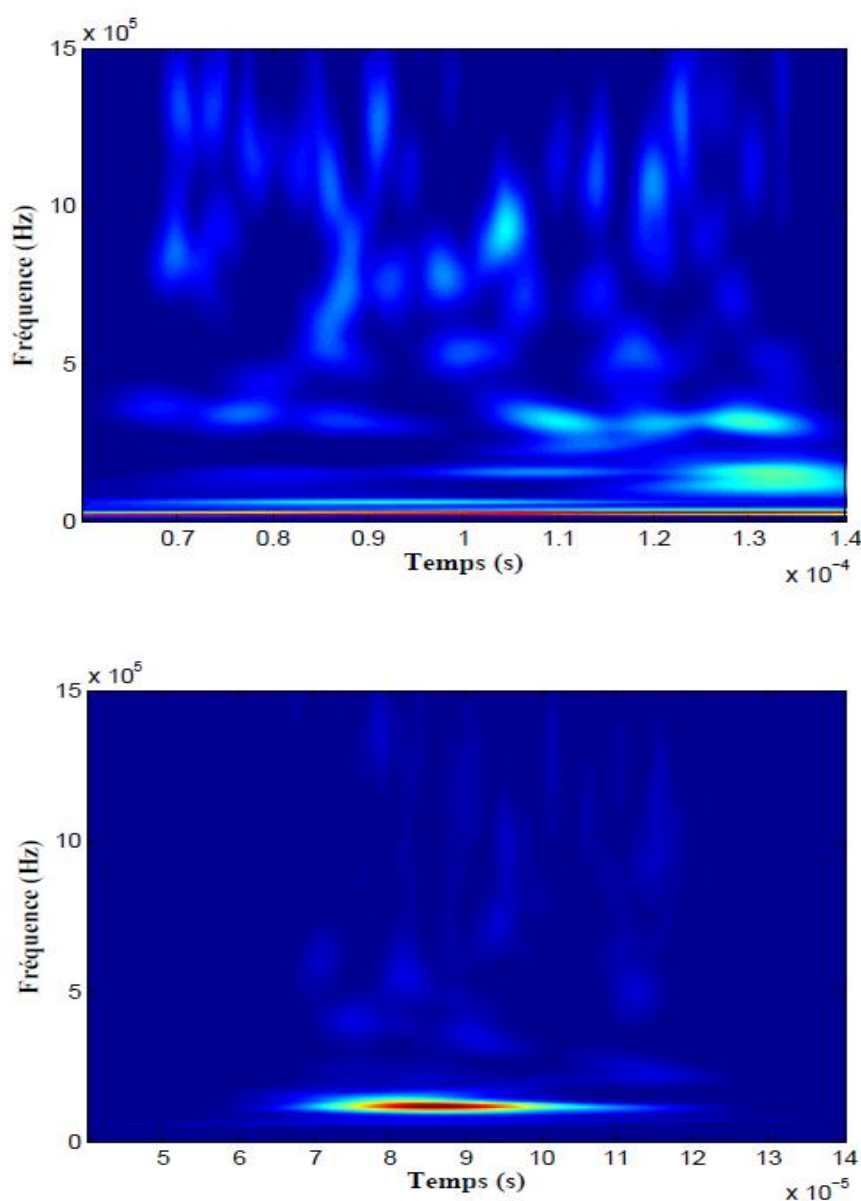


Figure 4.7 Scalogramme des deux signaux débruités d'amplitude 25 dB.

Afin de confirmer que le deuxième signal est certainement lié à l'endommagement, une comparaison a été effectuée avec un autre signal d'EA ayant une amplitude égale à 31 dB qui dépasse le seuil d'acquisition. Les résultats, présentés dans la figure (4.8), montrent une forte corrélation entre les deux signaux, notamment en termes de temps de montée et de durée de la salve. De plus, la composante fréquentielle principale du signal de référence (31 dB) correspond étroitement à celle du signal débruité d'amplitude 25 dB, confirmant ainsi leur similitude.

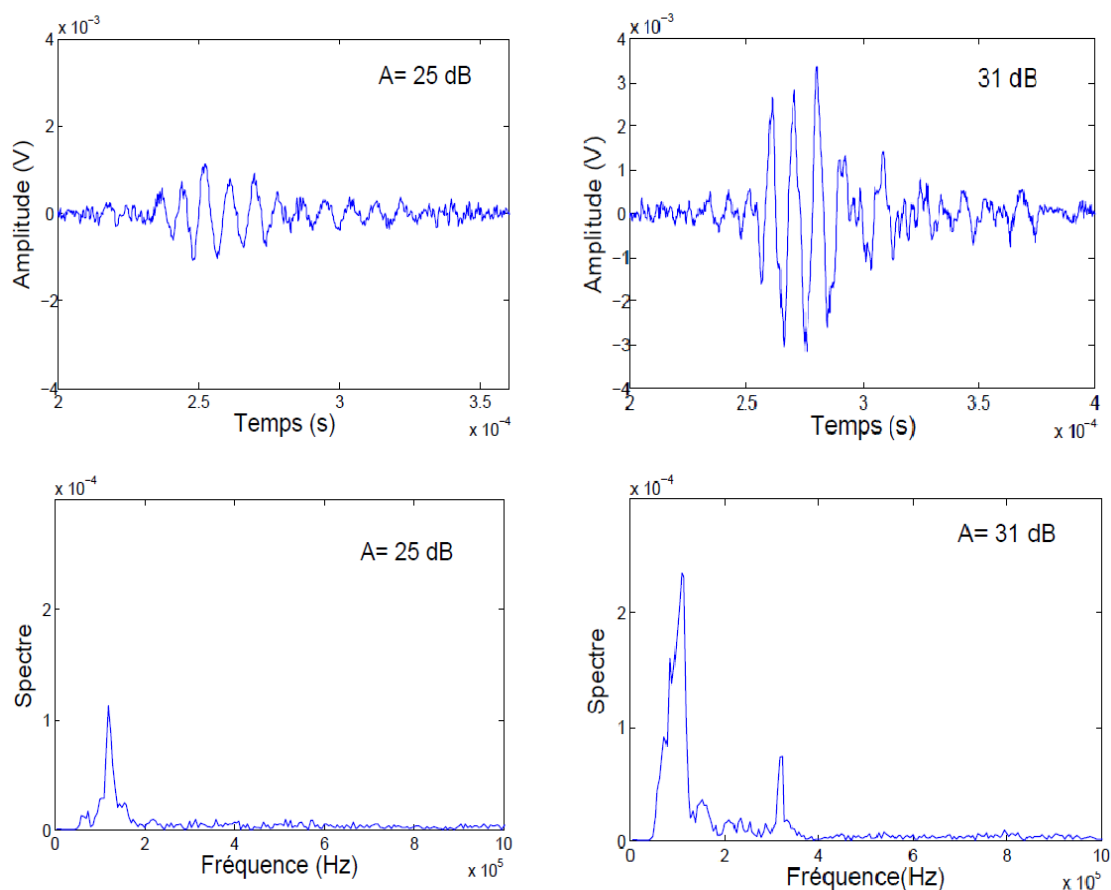


Figure 4.8 Comparaison entre un signal ayant une amplitude supérieur au seuil (31 dB) et un autre signal d'E.A. obtenu après débruitage (25 dB).

Sur la base de ces observations, il s'avère qu'une partie des signaux d'E.A. obtenus après le débruitage peuvent être exploitée pour la caractérisation de l'endommagement, au même titre que ceux dont l'amplitude est supérieure au seuil de 30 dB. Une fois les signaux d'E.A. compris dans la plage d'amplitude de 25 à 30 dB sont correctement distingués des signaux de bruit en utilisant le critère SFM, leur contenu fréquentiel a été comparé à celui des signaux de forte amplitude. Après l'application du débruitage sur l'ensemble des signaux sélectionnés, la

fréquence correspondant au maximum d'amplitude de la transformée de Fourier rapide (FFT) a été calculée pour chacun d'eux (voir Figure 4.9).

Les résultats indiquent que, les signaux débruités en très grand nombre présentent une cohérence remarquable avec les signaux de forte amplitude, notamment dans leur répartition fréquentielle. Ce constat est encourageant et suggère que le processus de débruitage a permis d'obtenir des signaux d'E.A. réalistes et exploitables pour l'analyse de l'endommagement.

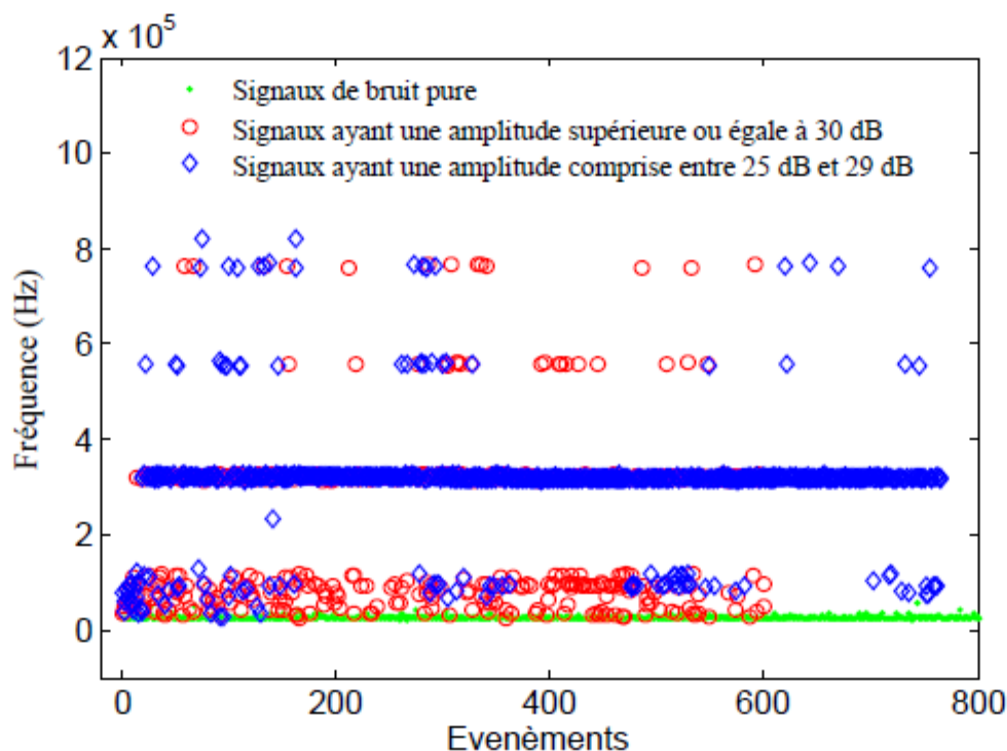


Figure 4.9 Fréquence associé au maximum d'amplitude de la FFT des événements d'E.A

4.4 Conclusion

La procédure que nous avons mis en place a été testée sur des signaux d'EA générés par un matériau composite stratifié de type verre-époxy. Les résultats obtenus sont très importants et ont permis de sélectionner environ 900 signaux d'EA associés aux phénomènes d'endommagement d'un ensemble de 2200 signaux qui sont auparavant ignorés par le système d'EA.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de mémoire s'inscrit dans le cadre du contrôle non destructif (CND) des matériaux composites, en utilisant la technique d'émission acoustique (EA). L'objectif principal était de réduire le seuil d'acquisition du système d'EA, afin de permettre la détection des signaux de faibles amplitudes, mais potentiellement liés à un endommagement naissant, souvent ignorés par les systèmes conventionnels.

Les signaux d'EA représentent un phénomène physique réel, mais leurs amplitudes peuvent être très faibles et inférieures à celle du bruit. Dans notre cas, l'amplitude maximale des signaux de bruit a été mesurée à 29 dB. Afin d'éviter leur détection, un seuil de 30 dB a initialement été fixé par le système d'EA. Cependant, ce seuil conduit à l'exclusion de signaux éventuellement porteurs de l'information par rapport aux sources d'endommagement.

Ainsi, nous avons proposé d'abaisser ce seuil à 25 dB afin d'accéder à une gamme plus large de signaux. Toutefois, cette réduction entraîne automatiquement la détection d'un plus grand nombre de signaux de bruit, ce qui réduit le rapport signal sur bruit (RSB). La difficulté réside donc dans la distinction entre les signaux utiles (liés à l'endommagement) et ceux présentant du bruit.

Pour relever ce défi, nous avons mis en place une méthodologie en procédant deux étapes principales. La première consiste à supprimer les composantes de bruit des signaux à l'aide de la transformée en ondelettes continue. Quant à la deuxième étape, une sélection automatique par le paramètre SFM a été effectuée. Les résultats ont montré que les signaux de bruit présentent un SFM élevé (spectre plat), alors que les signaux sources d'endommagement ont des composantes spectrales pointées, donc un SFM plus faible. Ce processus a permis de sélectionner efficacement les signaux dont l'amplitude est comprise entre 25 dB et 30 dB, en ne retenant que ceux dont la forme spectrale indique un lien probable avec un phénomène d'endommagement.

Les signaux sélectionnés ont ensuite été comparés avec des signaux réels d'émission acoustique détectés au-delà du seuil d'acquisition, et ont montré une forte similarité dans les représentations temporelles, fréquentielles (FFT) et temps-fréquence (CWT). Cela confirme que notre méthode est capable d'identifier avec fiabilité des signaux d'endommagement, même de faible amplitude.

En résumé, ce travail valide une approche complète, efficace et automatisée pour améliorer la sensibilité de détection dans les systèmes d'émission acoustique. En abaissant le seuil tout en maintenant une bonne qualité du signal, nous rendons en conséquence la possibilité de la détection précoce des endommagements.

Bibliographie

- [1] P. Durochoux, La recherche en contrôles non destructifs, Traitement du Signal, 1985. [Article scientifique]
- [2] B. Ben Fraj, Contrôles non destructifs, Disponible sur : <https://www.technologuepro.com/cours-controles-non-destructifs-bbf/chapitre-1-introduction-generale-controle-non-destructif.pdf> (consulté le 13 juin 2025). [Cours en ligne]
- [3] E.E. Gdoutos, "Nondestructive Testing (NDT)", Experimental Mechanics, 2022, pp. 285–295. https://www.researchgate.net/publication/356265325_Nondestructive_Testing_NDT (consulté le 13 juin 2025). [Article scientifique en ligne]
- [4] Université d'Orléans – CETIM, Choix des méthodes de contrôle non destructif applicables aux assemblages soudés, dans Technologie du soudage, 2019. [Chapitre d'ouvrage universitaire]
- [5] H. Hartmann, "Acoustic Emission Monitoring of Wood Based Composites", Journal of Acoustic Emission, vol. 1, no. 1, 1977. [Article scientifique]
- [6] J. Kaiser, the Kaiser Effect in Acoustic Emission, NDT.net, 1950. [Article scientifique]
- [7] C.U. Grosse, M. Ohtsu (éds.), Acoustic Emission Testing, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008. [Livre]
- [8] R. Unnþórsson, "Hit Detection and Determination in AE Bursts", Proc. 24th European Conf. on Acoustic Emission Testing, 2002 [Actes de conférence]
- [9] B. A. Boumediene, M.N. Sayah, Classification des signaux d'émission acoustique dans le cadre du suivi d'endommagement des matériaux composites, Mémoire de Master, Univ. de Blida, 2019. <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/12444/1/M%C3%A9moire-2019.pdf>. (consulté le 13 juin 2025). [Mémoire universitaire]
- [10] D. Scida, M. Assarar, A. Rezak, C. Poilâne, "Effet de l'humidité sur le comportement mécanique des composites à fibres de lin", 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Poitiers-Futuroscope, France, 2011. https://www.researchgate.net/publication/281991424_Effet_de_l'humidite_sur_le_comportement_mecanique_des_composites_a_fibres_de_lin (consulté le 13 juin 2025). [Communication scientifique en ligne]
- [11] Royer, D. Dieulesaint, E, Ondes élastique dans les solides, Tome1, "propagation libre et guidée". Paris: Masson, 1996, p.308. [Livre]
- [12] D.Hopkins, G.Neau, L.Le Ber, "Advanced phased array technologies for ultrasonic inspection of complex composite parts". Smart materials, structures & NDT in aerospace, conference NDT in 2-4 Novembre, Canada 2011. [Communication scientifique]
- [13] Hossein Taheri, Fereidoon Delfanian, Jikai Du, "Ultrasonic phased array techniques for composite material evaluation". Journal of the Acoustical Society of J. Acoust. Soc. Am. vol.134, 2013. [Article scientifique]
- [14] http://www.simula.it/simula_en/prodotti/phased-array_prod.htm. (consulté le 13 juin 2025). [Site web professionnel]

- [15] S. Bazi, Contribution à la détection et au diagnostic des défauts dans un système machine à induction-convertisseur, Doctorat, Univ. HadjLakhdarBatna, 2016. [Thèse de doctorat]
- [16] K.M. Chugg, A Brief Introduction to the FFT, 2021. [Document technique]
- [17] J.W. Cooley, P.A.W. Lewis, P.D. Welch, "Historical Notes on the FFT", Proc. IEEE, vol. 55, no. 10, 1967, pp. 1675–1677. [Article scientifique]
- [18] K.M. Pavan, P. Jain, R.K. S., R. N., R. K., "FFT Algorithms: A Survey", Bahubali College of Engineering, Inde. [Rapport pédagogique]
- [19] A. Benveniste, Les analyseurs de spectre à FFT et à corrélation, IRISA/INSA, Rennes, 1981. [Rapport technique]
- [20] J.W. Cooley, "How the FFT Gained Acceptance", IEEE Signal Processing Magazine, 1994, pp. 26–27. [Article scientifique]
- [21] N. Bessous, M.M. Rezaoui, I. Merzouk, A. Borni, L. Zarour, "Analyse spectrale dans le courant statorique des machines asynchrones sous défaut", MCSA-FFT. [Communication scientifique]
- [22] National Instruments, Understanding FFTs and Windowing, Disponible sur : <https://www.ni.com/en-us/innovations/understanding-ffts-and-windowing.html> (consulté le 13 juin 2025). [Site web technique]
- [23] E. Baida, Diagnostic d'un bras manipulateur par analyse fréquentielle, Mémoire de Master, Univ. de Biskra, 2018. [Mémoire universitaire]
- [24] Carnegie Mellon University, Short-Time Fourier Transforms, Disponible sur : <https://www.cmu.edu/> (consulté le 13 juin 2025). [Site web universitaire]
- [25] S. Abdullah, C.K.E. Nizwan, M.Z. Nuawi, "Fatigue Data Editing Using STFT", UniversitiKebangsaan Malaysia. [Rapport de recherche]
- [26] A.K. Malikov et al., "Ultrasonic Assessment using STFT and CNN", Academic Editor: R.B. Heimann. [Article scientifique]
- [27] M.J. Pereyra, Wavelets, Their Friends, and What They Can Do for You, European Mathematical Society, 2006. [Livre]
- [28] Y. Nivergelt, Wavelets Made Easy, Birkhäuser, 2001. [Livre]
- [29] Y.I. Hwang et al., "Detection of Artificial Defects Using STFT", Applied Sciences, 2020. [Article scientifique]
- [30] D.F. Walnut, An Introduction to Wavelet Analysis, Birkhäuser, 2002. [Livre]
- [31] P.S. Addison, The Illustrated Wavelet Transform Handbook, 2002. [Livre]
- [32] A.R. Oskouei et al., "Wavelet-Based AE Characterization in Composites", eXPRESS Polymer Letters, vol. 3, no. 12, 2009. [Article scientifique]
- [33] B. Vidakovic, Basics of Wavelets, ISYE8843A, Handout 20. [Support de cours]

- [34] I. Daubechies, Ten Lectures on Wavelets, SIAM, 1992. [Livre]
- [35] S. Mallat, A Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, 1999. [Livre]
- [36] G. Strang, T. Nguyen, Wavelets and Filter Banks, Wellesley-Cambridge Press, 1996. [Livre]
- [37] N. Van Otten, Wavelet Transform Made Simple, 2024. <https://nerivanotten.com/wavelet-transform-made-simple> (consulté le 13 juin 2025). [Site web pédagogique]
- [38] Université d'Ottawa, Cours ELG_3575, Semaine 3b. https://www.site.uottawa.ca/~damours/courses/ELG_3575/Semaine3b.pdf (consulté le 13 juin 2025). [Support de cours en ligne]
- [39] B. Boulet, Fundamentals of Signals and Systems, Da Vinci Engineering Press, 2005. [Livre]
- [40] J. Bigot, Analyse par ondelettes, Notes de cours, Master 2 IMAT, Univ. Toulouse III, 2009. [Support de cours universitaire]
- [41] C.U. Grosse et al., "Signal Conditioning in AE Using Wavelets", NDT.net, vol. 7, no. 9, 2002. [Article scientifique en ligne]
- [42] J.H. Kurz, "Signal Conditioning – Mind the Traps", Otto-Graf-Journal, vol. 15, 2004. [Article scientifique]
- [43] A. Ukil, "Denoising of MEG Signals", IEEE Sensors Journal, Mar. 2012, pp. 447–455. [Article scientifique]
- [44] G. Luo, D. Zhang, "Wavelet Denoising", in: D. Baleanu (ed.), Advances in Wavelet Theory, InTech, 2012. <http://www.intechopen.com/books/advances-in-wavelet-theory-and-their-applications-in-engineering-physics-and-technology/wavelet-denoising> (consulté le 13 juin 2025). [Chapitre d'ouvrage en ligne]
- [45] J.P. Dron et al., "Détection de défauts de roulements", Mécanique & Industries, vol. 4, no. 3, 2003, pp. 213–219. [Article scientifique]
- [46] M.A. Suhaila, T. Shimamura, "Wiener Filter Approach to Image Denoising", IEEE Conf. Systems, Man, and Cybernetics, 2012. [Communication scientifique]
- [47] L. Boubchir, J.M. Fadili, "Bayesian Denoising in the Wavelet Domain", IEEE Trans. Image Process., 2005. [Article scientifique]
- [48] N. Dey et al., "Adaptive Thresholding: A Comparative Study", Procedia Computer Science, vol. 46, 2014, pp. 594–601. [Article scientifique]
- [49] F. Mahmoudi, C. Zerroual, Débruitage de la parole par CNN, Master, Univ. de Blida 1, 2024. [Mémoire universitaire]
- [50] Z.K. Peng, F.L. Chu, "Wavelet Transform in Condition Monitoring", Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 18, 2004, pp. 199–221. [Article scientifique]
- [51] H. Qiu et al., "Weak Signature Detection with Wavelets", Journal of Sound and Vibration, vol. 289, 2006, pp. 1066–1090. [Article scientifique]

- [52] S.F. Boll, "Suppression of Acoustic Noise", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process, vol. 27, 1979, pp. 113–120. [Article scientifique]
- [53] M.A. Rakotomalala, S. Rakotomiraho, "Débruitage par seuillage", Afrique Science, vol. 6, no. 3, 2010, pp. 103–120. [Article scientifique]
- [54] L. Cheng et al., "eLoran Weak Signal Extraction", Remote Sensing, 2023. <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/16/3012> (consulté le 13 juin 2025). [Article scientifique en ligne]
- [55] M.A. Rakotomalala, S. Rakotomiraho, "Débruitage par seuillage des ondelettes", Afrique Science, 2010. <http://www.afriquescience.info>. (consulté le 13 juin 2025). [Article scientifique en ligne]
- [56] N. Madhu, Note on Measures for Spectral Flatness, 2009. <https://www.researchgate.net/publication/228485162> (consulté le 13 juin 2025). [Document technique en ligne]
- [57] S.P. Sarvade, S.K. Dr., "Speech Enhancement using SFM", 2017. <https://www.ijarcce.com/upload/2017/march-17/IJARCCE%2037.pdf> (consulté le 13 juin 2025). [Article scientifique en ligne]
- [58] Y. Ma, A. Nishihara, "VAD Algorithm using Long-Term SFM", 2013. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6576740> (consulté le 13 juin 2025). [Article scientifique en ligne]
- [59] A.H. Gray, J.D. Markel, "SFM and Autocorrelation Method", IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Process, vol. 22, no. 3, 1974. [Article scientifique]
- [60] O. Izmirli, "Using SFM for Audio Segmentation", 2000. <https://www.researchgate.net/publication/228662441> (consulté le 13 juin 2025). [Communication de conférence en ligne]
- [61] P. Stoica, R. Moses, Spectral Analysis of Signals, 2005. [Livre]
- [62] A.H. Gray, J.D. Markel, Spectral-Flatness Measure for Linear Prediction, vol. 22, no. 3, 1974. [Article scientifique]
- [63] S. Gurugopinath et al., "Robust Spectrum Sensing using SFM", vol. 6, no. 6, juin 2017. [Article scientifique]
- [64] S. Dubnov, "Non-Gaussian Generalizations of SFM", 2003. <https://www.researchgate.net/publication/221229009> (consulté le 13 juin 2025). [Article scientifique en ligne]