

Techniques avancées de traitement de signaux d'émissions acoustiques pour améliorer la détection de défauts dans des vaisseaux sous pression

par

Konstantin POLYAKOV

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAITRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 24 JANVIER 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Konstantin Polyakov, 2022



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DE JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Martin Viens, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Xavier Maldague, codirecteur
Département de génie électrique et de génie informatique à l'Université Laval

Christian Belleau, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Pierre Bélanger, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 16 DECEMBRE 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, M. Martin Viens, pour ses conseils qu'il m'a donnés et son soutien qu'il m'a apporté durant la période de mes études.

Je remercie également M. Fernando Lopez, le directeur R&D, et M. Luc Mauzeroll, le président directeur général de la compagnie Torngats Services techniques pour leur soutien inconditionnel depuis mon arrivée au Canada.

Le présent projet a été financé et soutenu par le programme Mitacs accélération en collaboration avec la compagnie Torngats Services techniques. Le financement obtenu a été facilité par l'initiative oN DuTy ! (<http://www.ondutycanada.ca/>) issue du programme FONCER du CRSNG. Je désire remercier M. Clemente Ibarra Castanedo, le coordinateur de cette initiative, pour sa disponibilité ainsi que le personnel de Département de génie mécanique de l'École de technologie supérieure.

Techniques avancées de traitement de signaux d'émissions acoustiques pour améliorer la détection de défauts dans des vaisseaux sous pression

Konstantin POLYAKOV

RÉSUMÉ

Le contrôle par émissions acoustiques est une méthode d'inspection bien connue et polyvalente pour la surveillance de l'état de la structure et l'évaluation non destructive de plusieurs types d'équipement de l'industrie pétrochimique, tels que les vaisseaux sous pression, les tuyaux et les réservoirs de stockage. La sensibilité et la fiabilité de la méthode sont affectées par des signaux parasites (bruits de fond) provenant du processus technologique ou de l'environnement.

Ce projet concerne l'étude de l'état de développement de la méthode et des avancements liés au traitement des signaux correspondants. L'objectif étant d'améliorer la qualité et la fiabilité de ces contrôles dans des conditions industrielles de même que l'évaluation et la comparaison de l'efficacité de quatre techniques de filtration.

Les travaux expérimentaux avaient pour but d'enregistrer des signaux d'émission acoustique en présence de bruit du fond naturel. Le banc d'essai est composé d'un système de tuyaux de diamètres allant jusqu'à 6 pouces avec un système qui contrôle la circulation d'un liquide. Le frottement, qui est un autre type de source de bruit, a été créé avec l'application de disque abrasif tournant. Durant les essais, dix signaux provenant d'une source Hsu-Neilsen ont été enregistrés au travers des deux types de bruit de fond mentionnés précédemment.

L'acquisition de signaux a été effectuée avec un capteur piézoélectrique, un préamplificateur et un oscilloscope connecté à un ordinateur. Grâce à une application logicielle maison, ces signaux sans seuillage ont ensuite été enregistrés dans des fichiers pour traitements numériques ultérieurs.

Le traitement des signaux a été effectué grâce à un logiciel comprenant différentes techniques de filtration : des filtres adaptatifs à réponse impulsionnelle finie (FIR) basés sur l'algorithme des moindres carrés récurrents (RLS) ou l'algorithme des moindres carrés moyens (LMS), un filtre variant dans le temps (TVF) basé sur la transformation de Gabor et un filtre par seuillage des ondelettes. L'efficacité de ces techniques de filtration a été évaluée en termes du temps de calcul, du taux de détection des impulsions générés et du rapport signal sur bruit du signal filtré.

VIII

Mots-clés : Contrôle non destructif, émission acoustique, traitement de signal, filtration de bruit.

Advanced signal processing techniques to improve detection of defects in pressure vessels by acoustic emission testing

Konstantin POLYAKOV

ABSTRACT

Acoustic emission testing is a well-known and versatile inspection method for structural health monitoring and non-destructive evaluation of several components found in the petrochemical industry, such as pressure vessels, pipelines, and storage tanks. The sensitivity and reliability of the method is affected by spurious signals (background noise) from technological processes or the environment.

The project objective concerned the study of the state of development of method and the advancements of signal processing aimed at improving the quality and reliability of control under industrial conditions, and also evaluation and comparison of the efficiency of four filtration techniques.

The experimental work aimed first at recording acoustic emission signals with the presence of natural background noise. The test bench was composed of a system of pipes of diameters up to 6 inches with the system of controlled circulation of liquid. The other type of noise source, friction, was created with the application of the rotating abrasive disc. During the tests 10 signals from Hsu-Neilsen source were recorded with two types of background noise and saved in two files.

Signal acquisition was performed with a piezoelectric sensor, a preamplifier and an oscilloscope connected to the computer. A recording application was developed in the LabVIEW graphical programming environment and contained basic acoustic emission system functions with continuous signal recording to a non-threshold file for further processing.

Signal processing was performed in the application also developed in LabVIEW and included finite impulse response (FIR) adaptive filter techniques with the recursive least squares (RLS) algorithm and least squares means (LMS) algorithms, the time-varying filter (TVF) based on the Gabor transform and the wavelet threshold filter. The effectiveness of these techniques was evaluated by filtration run time, number of signals detected and signal-to-noise ratio of output signal.

Keywords: Non-destructive testing, acoustic emission, signal processing, noise filtration.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CADRE THÉORIQUE ET REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
1.1 Mécanismes à l'origine d'ÉA	5
1.2 Propagations des ondes d'ÉA	8
1.3 Équipement de contrôle par ÉA	11
1.4 Analyse des signaux d'ÉA	14
1.5 Problème de présence de bruits.....	24
1.6 Techniques de traitement de bruits standards	26
1.7 Techniques avancées de filtrage.....	28
1.7.1 Seuillage adaptatif.....	28
1.7.2 Technique de seuillage des coefficients d'ondelettes (wavelet denoising) ..	31
1.7.3 Filtrage optimal de Wiener	33
1.7.4 Filtrage par l'analyse des séries chronologiques dans le domaine temporel.....	35
1.8 Conclusion	37
CHAPITRE 2 TRAVAUX EXPÉRIMENTAUX	39
2.1 Planification	39
2.2 Équipement d'enregistrement de signaux d'ÉA	39
2.3 Source d'ÉA	41
2.4 Banc d'essai	42
2.5 Logiciel d'acquisition de données.....	43
2.6 Plan d'essais.....	45
2.6.1 Essais préliminaires.....	45
2.6.2 Essais avec le bruit.....	48
2.7 Résultats des essais	49
CHAPITRE 3 TRAITEMENT DE SIGNAUX	51
3.1 Théorie sur les techniques de filtrage testées.....	51
3.1.1 Filtres adaptatifs avec la ligne à retard.....	51
3.1.2 Filtre variant dans le temps (TVF).....	54
3.1.3 Filtrage par seuillage des coefficients d'ondelettes	56
3.2 Logiciel de traitement de signaux	58
3.2.1 Implémentation des techniques de filtres adaptatifs	59
3.2.2 Implémentation d'une technique de filtre TVF.....	61
3.2.3 Implémentation d'une technique du seuillage des coefficients des ondelettes	62

3.3	Optimisation des paramètres de filtres et résultats du filtrage	63
3.3.1	Filtres adaptatifs avec la ligne à retard.....	63
3.3.2	Filtre variant dans le temps (TVF)	67
3.3.3	Filtrage par seuillage des coefficients d'ondelettes	69
3.4	Discussion	70
CONCLUSION.....		74
BIBLIOGRAPHIE		78

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Paramètres d'évaluation de sources.....	22
Tableau 1.2 Classification de source d'après le critère d'amplitude.....	22
Tableau 1.3 Classification de sources d'ÉA d'après le critère dynamique.....	23
Tableau 2.1 Caractéristiques techniques du capteur SNK-15.....	40
Tableau 2.2 Caractéristiques techniques du préamplificateur 1220B.....	40
Tableau 2.3 Caractéristiques techniques de l'oscilloscope Tektronix TDS2012C...	41
Tableau 3.1 Valeurs de niveaux de facteurs d'essais et les valeurs optimisées de filtre RLS.....	64
Tableau 3.2 Valeurs de niveaux de facteurs d'essais et les valeurs optimisées de l'algorithme LMS	65
Tableau 3.3 Valeurs de niveaux de facteurs d'essais de filtre TVF	67
Tableau 3.4 Paramètres de transformation de Gabor de filtre TVF.....	68
Tableau 3.5 Efficacité de filtration par quatre techniques.....	71

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Destruction de structure cristalline.....	7
Figure 1.2 ÉA produite lors de développement de la corrosion.....	8
Figure 1.3 Présentation schématique d'une onde de Rayleigh.....	9
Figure 1.4 Les modes antisymétrique et symétrique des ondes dans les plaques.....	10
Figure 1.5 Courbes de dispersions de vitesses des modes d'onde de Lamb dans une plaque d'acier d'épaisseur 16,5 mm dépendants de fréquence.....	11
Figure 1.6 Diagramme de capteur piézoélectrique d'ÉA.....	13
Figure 1.7 Salve d'ÉA avec les paramètres normalement utilisés.....	14
Figure 1.8 Localisation de source par zones pour le cas unidimensionnel et bidimensionnel.....	16
Figure 1.9 Localisation d'une source avec deux et trois capteurs.....	18
Figure 1.10 Formes d'onde composées de deux modes.....	19
Figure 1.11 Calcul d'éloignement de sources d'ÉA par la différence de temps d'arrivée de modes des ondes de Lamb.....	21
Figure 1.12 Filtrage de signaux par fréquences	27
Figure 1.13 Seuillage adaptatif d'un signal ayant un bruit variable	29
Figure 1.14 Principe d'intersection des intervalles de confiance	30
Figure 1.15 Filtrage par seuillage des coefficients d'ondelettes.....	32
Figure 1.16 Application de filtre optimal de Wiener.....	34
Figure 1.17 Résultat d'application de filtre de Wiener.....	34
Figure 1.18 Paramètre Δt de signal de bruit pur et de signal avec la composante d'ÉA, Paramètre Δt de signal avec la composante de l'ÉA.....	36
Figure 1.19 Résultat de détection de discordes.....	37

Figure 2.1	Capteur d'ÉA, support et préamplificateur installé sur le banc d'essai...	41
Figure 2.2	Source Hsu-Neilsen – le crayon mécanique avec le support.....	42
Figure 2.3	Banc d'essai expérimental.....	43
Figure 2.4	Interface du logiciel d'enregistrement.....	45
Figure 2.5	Exemple de signal enregistré avec le niveau du bruit de 0,03 V et le niveau du seuil de 0,2 V.....	46
Figure 2.6	Amplitudes moyennes de signaux en fonction de la distance.....	47
Figure 2.7	Oscillogramme du signal de bruit hydraulique.....	47
Figure 2.8	Oscillogramme du signal de bruit mécanique.....	48
Figure 2.9	Oscillogramme de 10 signaux d'ÉA avec le bruit de circulation de liquide.....	48
Figure 2.10	Oscillogramme de 10 signaux d'ÉA avec le bruit de frottement.....	49
Figure 3.1	Schéma de base de filtre adaptatif	52
Figure 3.2	Principe de filtrage basé sur la transformation discrète de Gabor.....	55
Figure 3.3	Interface du logiciel de traitement de données.....	59
Figure 3.4	Diagramme de blocs du filtre adaptatif avec une ligne à retard.....	61
Figure 3.5	Diagramme de blocs du filtre TVF et la fenêtre de dialogue.....	62
Figure 3.6	Diagramme de blocs du filtre du seuillage de coefficients d'ondelettes...	63
Figure 3.7	Résultats d'application des filtres adaptatifs.....	66
Figure 3.8	Résultats d'application de filtre TVF.....	68
Figure 3.9	Résultat d'élimination de bruit par seuillage des coefficients d'ondelettes.....	70

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGNES ET ACRONYMES

API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
COPV	Composite overwrapped pressure vessel
ÉA	Émission acoustique
END	Essais non destructifs
FIR	Finite impulse response
ISO	International Organization for Standardization
LMS	Least mean squares
LTA	Long-time average
MAD	Median absolute deviation
MARSE	Measured area of the rectified signal envelop
MONPAC	Nom commercial d'un système d'évaluation de vaisseaux sous pression par ÉA
MSE	Mean square error
NDIS	Standard of Japanese Society for Non-Destructive Inspection
PCA	Principal component analysis
PEM	Pre-event time
PET	Post-event time
PSNR	Peak signal-to-noise ratio
RIB	Risk based inspection
RLS	Recursive least square
RMS	Root mean square
SNR	Rapport signal sur bruit (Signal-to-noise ratio)
STA	Short time average
SURE	Stein's unbiased risk estimation
TDMS	Technical Data Management Streaming
TVF	Time variant filter
TSNR	Temporal signal-to-noise ratio

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

E	Module d'Young
ν	Coefficient de Poisson
ρ	Masse volumique
λ	Longueur d'onde
c	Vitesse d'une onde
σ	Contrainte mécanique
A	Amplitude du signal
V	Volt
Hz	Hertz
s	seconde
S	nombre d'échantillons
mm	millimètre
dB	décibel

INTRODUCTION

En service, les équipements pétrochimiques tels que les vaisseaux ou la tuyauterie sous pression sont exposés à plusieurs facteurs agressifs dont des contraintes et des températures élevées. Ces conditions d'utilisation peuvent causer la dégradation irrégulière de leurs propriétés mécaniques et endommager les équipements en permanence. La présence de défauts augmente le risque d'accidents tels qu'une fuite, un incendie ou une explosion.

La possibilité d'un accident brusque et imprévisible causé par une rupture fragile est une considération importante pour l'évaluation de sécurité d'équipements sous pression. Une fracture fragile dépend de la combinaison de deux facteurs : la présence d'une fissure ou d'un défaut qui agit à titre de concentrateur de contraintes et la faible ténacité du matériau (Hertzberg, Vinci, & Hertzberg, 2013). Ainsi, l'inspection d'équipements sous pression est une partie importante de leur maintenance et est couverte par des normes et des procédés tels que l'API 510 (Pressure Vessel Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair, and Alteration) et l'ASME BPVC-V (Boiler and pressure vessel code, Section V-Nondestructive Examination). Ces documents exigent des inspections par certaines méthodes d'essais non destructifs (END) : inspection visuelle, radiographie, par ressuage, magnétoscopie, thermographie, par ultrasons, par courants de Foucault et par émissions acoustiques (ÉA). La plupart de ces méthodes ne fournissant de l'information que sur l'intégrité locale de l'équipement, chaque zone devant être utilisée dans des conditions défavorables devra être inspectée par END.

La méthode de contrôle par ÉA est une méthode passive suivant laquelle les capteurs détectent les ondes élastiques transitoires émises par une structure soumise à des contraintes opérationnelles permettant ainsi de localiser et d'évaluer les défauts actifs tels que les fissures, les fuites et les autres endommagements (Moore, Miller, & Hill, 2005) et ce, même si les défauts sont localisés à des endroits inaccessibles à la plupart des autres méthodes d'END (méthode d'inspection intégrale). Cette méthode permet donc le contrôle d'ensemble de parois malgré l'accès limité aux surfaces.

Afin de réduire l'impact des bruits de fond sur les résultats d'inspection, les techniques de contrôle par ÉA sont présentement basées sur l'analyse des signaux dont l'amplitude excède un seuil prédéfini. Or, si le rapport signal sur bruit (SNR) n'est pas suffisant, cette approche ne peut pas être utilisée afin d'inspecter un équipement en cours d'utilisation.

Un bon ajustement d'un filtre en fréquences peut améliorer la qualité du signal enregistré. Toutefois, si les signaux du défaut et les composantes du bruit de fond se chevauchent dans le domaine fréquentiel, ce type de stratégie est peu efficace. Or, le bruit industriel de haute amplitude peut avoir une large bande de fréquences. Il importe donc d'analyser correctement le contenu fréquentiel des signaux émis par une source d'ÉA afin de pouvoir les extraire efficacement du bruit.

Ainsi, en se limitant aux techniques de filtration régulières, l'arrêt complet des équipements et de tous les travaux périphériques devient nécessaire pour réduire les bruits de fond à des niveaux acceptables pour les techniques d'ÉA actuelles. Or, une méthode de traitement du signal qui supprimerait ou réduirait significativement le bruit de fond tout en conservant le signal en provenance du défaut permettrait d'exécuter un contrôle par ÉA sur des équipements en cours d'utilisation et d'identifier les zones à risque qui devront être inspectées par d'autres méthodes pendant le prochain arrêt de production. Par ailleurs, en permettant une évaluation fiable de signaux de plus faible amplitude, la distance entre les sondes d'ÉA pourrait être augmentée ; une structure pourrait donc être inspectée en utilisant un nombre réduit de canaux.

Les résultats favorables obtenus dans le domaine du traitement numérique des signaux afin d'augmenter la détectabilité de signaux d'ÉA ne sont pas encore utilisés dans les procédés standards ou dans les logiciels commerciaux d'ÉA.

Ce projet vise à étudier les derniers développements intervenus au sujet du contrôle par ÉA de même que les notions de base en traitement numérique de signaux contaminés par du bruit tel qu'utilisé dans différents domaines. Cette étude a pour but de démontrer et comparer les techniques du traitement de signaux, d'améliorer les principes de traitement de signaux et augmenter la probabilité de détection des défauts actifs pendant le contrôle d'équipement pétrochimique sous pression en service.

Le premier chapitre de ce mémoire aborde le contexte théorique et présente également une brève revue de la littérature concernant les bases de la méthode de contrôle par ÉA et son état de développement actuel. Le deuxième chapitre, qui présente l'étape expérimentale du projet, décrit le banc d'essai et le logiciel d'enregistrement des signaux avec certains résultats préliminaires. Le troisième chapitre présente le logiciel de traitement de signal, explique les techniques de filtration utilisées au cours de ce projet et compare l'efficacité de ces techniques de filtration. La conclusion tente de mettre en évidence les avantages que pourrait apporter l'application de ces techniques dans des travaux futurs.

CHAPITRE 1

CADRE THÉORIQUE ET REVUE DE LA LITTÉRATURE

Afin de développer une technique efficace de filtration de signaux d'ÉA pour l'inspection d'équipements sous pression en service, il est important de connaître les principales notions d'ÉA, le mécanisme de propagation des ondes d'ÉA, les systèmes et les procédés contemporains de contrôle par ÉA.

Le standard ASTM E1316 Standard Terminology for Nondestructive Examinations définit l'émission acoustique comme un groupe de phénomènes qui génèrent des ondes élastiques transitoires par la libération rapide d'énergie de sources localisées dans le matériel. Les ÉA désignent également les ondes elles-mêmes.

Ainsi, le contrôle par ÉA se fait par l'enregistrement et l'analyse de signaux conditionnés par la présence et le développement de défauts dans le matériel. Le but de ce contrôle est la détection, la localisation et l'analyse des sources d'ÉA liés à ces défauts.

1.1 Mécanismes à l'origine d'ÉA

Sous l'effet d'une contrainte mécanique, une déformation excessive peut survenir dans des zones élastiques ou plastiques d'un métal et provoquer l'apparition de fissures et la dégradation irréversible du matériau. La fissuration peut se produire lors de l'augmentation graduelle d'une contrainte (rupture fragile et ductile) ou pendant le chargement variable d'une pièce (fissuration de fatigue). L'apparition de fissures peut aussi être favorisée par l'exposition à un milieu corrosif (corrosion sous contrainte) (Hertzberg, Vinci, & Hertzberg, 2013). Au début des années 1960 il a été reconnu que le développement de défauts sous la contrainte mécanique peut générer les ondes acoustiques détectables. Depuis ce moment il existe deux types d'études de ce phénomène. On peut faire une étude macroscopique de l'ÉA, produit par le matériel pendant la dégradation, quand on considère qu'une partie de matériel relativement grande contribue à l'émission. Ce type d'étude analyse les relations entre les paramètres d'ÉA et la charge appliquée à la structure pendant l'essai. Ces relations fournissent une évaluation

quantitative des dommages dans la structure en ce qui concerne la présence, l'emplacement et la gravité des discontinuités. L'étude microscopique aborde les mécanismes d'origine de sources d'ÉA tel que les mouvements de dislocations, la propagation de fissure et autres processus de changement de microstructure (Moore, Miller, & Hill, 2005).

Au niveau microscopique, la déformation plastique sous contrainte est la source principale d'émission acoustique dans les métaux (Moore, Miller, & Hill, 2005). Lorsque les matériaux sont déformés par une contrainte appliquée, les dislocations mobiles s'accumulent au niveau des obstacles (concentrateurs de contrainte), ce qui entraîne l'apparition d'une contrainte de cisaillement supérieure à la source d'activation. Avec un grand nombre de dislocations, les contraintes au joint de grain peuvent dépasser les contraintes critiques nécessaires à ce que les dislocations traversent le joint et une microfissure s'amorce. L'amorçement d'une microfissure et la relaxation de ces contraintes s'accompagne d'émission d'impulsions acoustiques (ÉA). Chaque dislocation en traversant le joint émet une courte impulsion acoustique exponentielle et leur superposition donne une impulsion acoustique d'amplitude proportionnelle à la vitesse et à la densité de dislocations ainsi qu'à la vitesse de déformation (Nazarchuk, Skalskyi, & Serhiyenko, 2017; Builo, 2017.) En outre l'entassement des dislocations sur les discontinuités préexistantes, sur les croisements de plans de glissement ou sur les joints de grains peut causer des fissures de clivage. Une telle fissure apparue dans l'acier peut causer une onde acoustique avec une amplitude d'environ $2,5 \times 10^{-11}$ m et une durée de $1,0 \times 10^{-8}$ s. On peut détecter ces ondes dans des conditions de laboratoire en utilisant des capteurs à bande étroite (Moore, Miller, & Hill, 2005 ; Han, Luo, & Wang, 2011.)

Contrairement au métal de base, certaines inclusions peuvent être fragiles aux températures ambiantes et se fissurer sous faibles contraintes. Les signaux acoustiques émis dans un tel processus dépendent des propriétés de ces inclusions, de leur résistance et de leur dimension (Chen et al., 2019.)

En plus de modèles d'amorçement de fissures discutées ci-dessus, plusieurs modèles d'ÉA concernant la propagation de fissures ont été analysés dans différents matériaux tels les aciers, les alliages d'aluminium et les céramiques. La figure 1.1 montre un modèle de rupture d'une structure cristalline bidimensionnelle en mode I (ouverture) suite à une force appliquée F . Les

lignes droites montrent les liaisons entre les atomes et les lignes en zigzag présentent les liaisons déformées par l'énergie accumulée. Quand l'énergie atteint le niveau critique, les liaisons se rompent et émettent une énergie sous la forme d'ondes élastiques longitudinales L , transversales S et de Rayleigh R . La superposition de ces ondes forme le signal d'ÉA. (Ivanov & Barat, 2017; Chernov, 2018.)

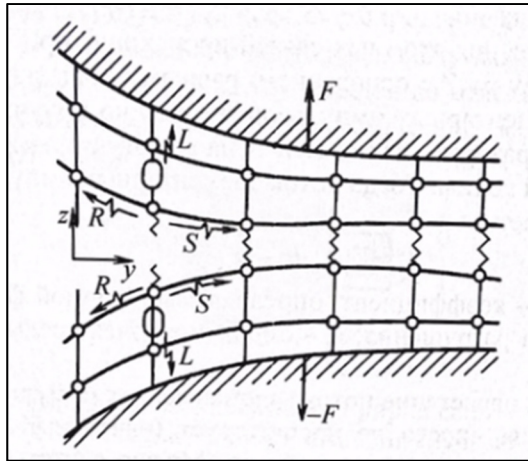


Figure 1.1 Rupture d'une structure cristalline
Tirée de Ivanov, Bigus, & Vlasov (2015, p.23)

La corrosion est aussi un mécanisme important de détérioration de matériaux. La corrosion des métaux est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique du métal avec son environnement agressif. Pendant le processus de corrosion, des ÉA se produisent par le décollement et la fissuration d'une pellicule d'oxyde (ou un autre produit de corrosion) suite à des contraintes mécaniques (Figure 1.2). Ces contraintes mécaniques sont causées par les différences de propriétés physico-mécaniques qui existent entre la base métallique et les produits de corrosion, et apparaissent lors du développement de la corrosion (Ivanov, Bigus, & Vlasov, 2015 ; Yuyama, 1986).

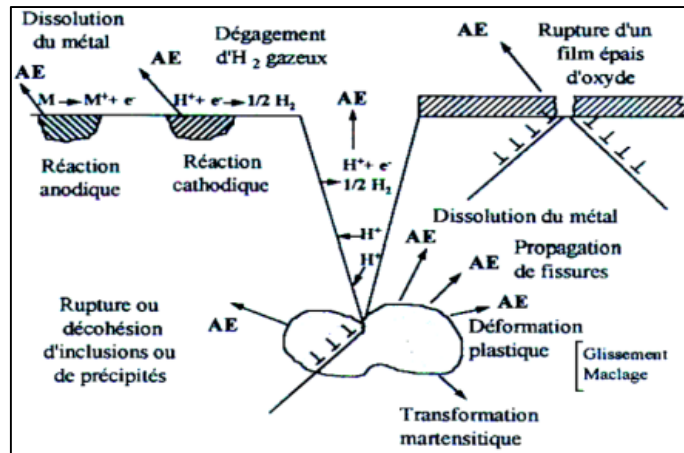


Figure 1.2 ÉA produite lors du développement de la corrosion et autres processus de dégradation du métal
Tirée de Yuyama (1986, p.45)

Les mécanismes mentionnés ci-dessus représentent les sources transitoires ou discrètes d'ÉA. Certains types de défauts des équipements industriels peuvent aussi produire des signaux de type continu ou cyclique. Les écoulements de liquides et de gaz dans les équipements sous pression peuvent se produire sous forme de flux turbulents ou laminaires. Les tourbillons de fluide qui s'écoule des équipements causent des pulsations de pression qui génèrent des ondes acoustiques. En augmentant la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur d'une paroi, le liquide commence à se détacher des murs du canal d'écoulement et provoque la formation de bulles de cavitation. La formation et l'implosion des bulles sont suivies par une ÉA intensive. Dans le cas de fuites de liquides et de vapeurs surchauffées, la génération d'ÉA peut être liée au processus de bouillonnement, de cavitation et de condensation de liquide (Ivanov & Barat, 2017).

1.2 Propagations des ondes d'ÉA

Pendant le contrôle par ÉA, les signaux se transmettent sous forme d'ondes élastiques dans la paroi de l'équipement ainsi que dans le liquide à l'intérieur de cet équipement. Ainsi, pour analyser des signaux d'ÉA, il est important de connaître les modes suivant lesquels les ondes se propagent et se transforment.

Le milieu de propagation peut être considéré comme infini si ses dimensions sont largement supérieures aux longueurs des ondes. Dans un tel milieu, des ondes longitudinales et transversales se propagent en formant des sphères concentriques autour de la source d'ÉA. Les ondes longitudinales ont une vitesse de propagation c_L :

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1.1)$$

Les ondes transversales ont une vitesse de propagation c_T :

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (1.2)$$

où E est module d'Young, ν est le coefficient de Poisson et ρ est la masse volumique (Moore, Miller, & Hill, 2005). La vitesse de propagation des ondes transversales dans l'acier est d'environ 3250 mètres par seconde et 5900 mètres par seconde pour les ondes longitudinales.

Dans un milieu semi-infini, borné par une surface libre, l'interaction des ondes avec cette surface doit être prise en considération. En effet, en atteignant cette surface, les ondes sont réfléchies sous forme d'ondes longitudinales, transversales et de Rayleigh. La vitesse de propagation et la longueur de ces ondes sont similaires à celles des ondes transversales.

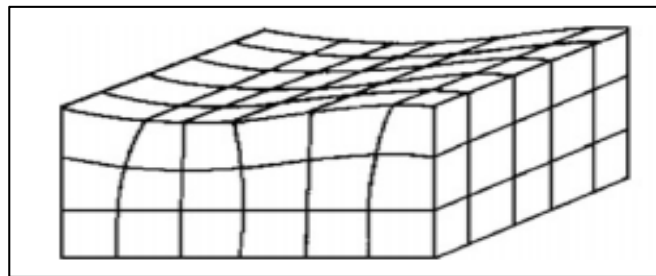


Figure 1.3 Présentation schématique
d'une onde de Rayleigh

Tirée de Nazarchuk, Skalskyi, & Serhiyenko (2017, p.39)

Une onde de Rayleigh est une onde de surface avec des composantes longitudinales et transversales déphasées de $\pi/2$. Les oscillations de ce type d'onde atteignent une profondeur

de l'ordre de la longueur d'onde. La vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh est approximativement de :

$$c_R \approx \frac{c_T(0,87 + 1,12\nu)}{(1 + \nu)} \quad (1.3)$$

L'épaisseur des parois des équipements sous pression utilisés dans l'industrie pétrochimique, tels les vaisseaux ou les tuyaux peuvent varier de 4 à quelques dizaines de millimètres. Cette épaisseur est comparable avec les longueurs d'ondes dans le matériel. Les ondes qui se propagent dans les plaques (parois minces) ont une propagation différente de celle des ondes se propageant dans les milieux infinis ou semi-infinis. Ce type d'ondes, appelé ondes de Lamb, se propagent à travers les plaques et sont le résultat de la réflexion, de la réfraction et de la conversion de modes des ondes provenant des surfaces opposées. Les ondes de Lamb se propagent sous forme de plusieurs modes symétriques $S_0, S_1, \dots, S_n$, et antisymétriques $A_0, A_1, \dots, A_n$ (Figure 1.4).

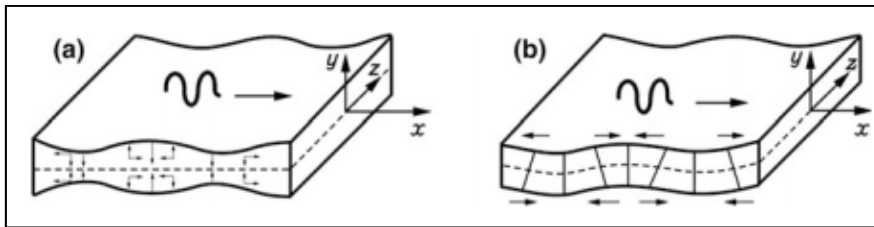


Figure 1.4 Les modes symétrique (a) et antisymétrique (b) des ondes dans les plaques

Tirée de Nazarchuk, Skalskyi, & Serhiyenko (2017, p.46)

Ce type d'onde est guidé par les surfaces de la plaque et la dispersion des vitesses de propagation est l'une de ses caractéristiques, qui dépend du mode de l'onde, de sa fréquence et de l'épaisseur de plaque (Figure 1.5). Le signal provenant de source d'ÉA se décompose à la suite de sa propagation et peut être enregistré comme un groupe d'oscillations provenant de modes d'onde différents.

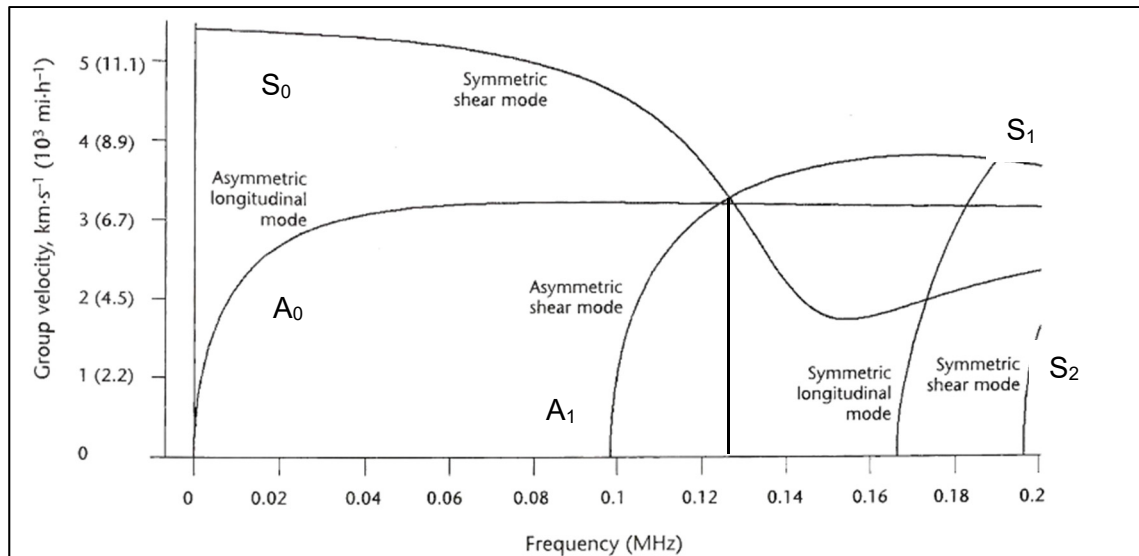


Figure 1.5 Courbes de dispersion des vitesses des ondes de Lamb dans une plaque d'acier de 16,5 mm d'épaisseur
Adapté de Moore, Miller, & Hill (2005, p.137)

Ainsi pendant le contrôle des équipements sous pression par ÉA, on interprète normalement la propagation des ondes dans la paroi des équipements en termes d'ondes de Lamb (Pollock, 2018 ; Kaphle, Tan, Thambiratnam, & Chan, 2012).

1.3 Équipement de contrôle par ÉA

Les systèmes multivoies sont utilisés pour le contrôle des équipements industriels par ÉA afin de pouvoir enregistrer et analyser les signaux provenant simultanément d'un réseau de capteurs, localiser les sources d'ÉA et les évaluer.

L'architecture de ce type de systèmes doit inclure les composants principaux suivants :

- Les capteurs pour transformer les ondes élastiques en signaux électriques ;
- Les préamplificateurs de signaux des capteurs ;
- Le système d'acquisition et de traitement des signaux ;
- Les câbles entre les préamplificateurs et le système d'acquisition et traitement des signaux ;
- L'ordinateur avec un logiciel de traitement, d'analyse, d'affichage et de stockage de données.

La fonction de base de ces capteurs est de détecter les déplacements de surface et de générer un signal électrique correspondant. Ils peuvent être basés sur des mécanismes différents. Les capteurs capacitifs et les interféromètres laser peuvent être utilisés dans des conditions de laboratoire, mais on ne peut pas les utiliser pour le contrôle des équipements industriels à cause de leur sensibilité et de la réponse en fréquences limitée de capteurs capacitifs (Moore, Miller, & Hill, 2005).

Le capteur le plus courant d'ÉA est cependant basé sur la piézoélectricité. Dans un boîtier métallique (Figure 1.6), un élément actif est fait d'une céramique piézoélectrique à base de titanate-zirconate de plomb (PZT), bornée par des électrodes permettant la collection des charges de polarisation. Une plaque de protection vise à éviter l'usure de l'élément actif. Le reste du boîtier est normalement rempli d'un matériau amortissant permettant d'absorber et de diffuser les ondes acoustiques transmis dans le fond du boîtier. Le matériau amortissant rend aussi le capteur moins résonant avec une réponse uniforme sur une large bande de fréquences. Ce type de capteur est appelé capteur à réponse plate. Néanmoins, les capteurs résonants sont plus utilisés pour le contrôle des équipements industriels par ÉA en raison de leur plus grande sensibilité relativement aux capteurs à réponse plate. L'épaisseur de l'élément piézoélectrique et la vitesse des ondes acoustiques dans cet élément déterminent les fréquences de résonance du capteur. Les capteurs différentiels peuvent être construits avec deux éléments ou plus et un fil de signal positif, un fil de signal négatif et un fil de terre. Les éléments actifs sont connectés en parallèle afin que le transducteur soit moins sensible aux interférences électromagnétiques. D'après les normes et pratiques de contrôle des équipements industriels tels que les vaisseaux, la tuyauterie et les réservoirs, les capteurs doivent être fonctionnels dans la bande de fréquences de 100 à 600 kHz (ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V, 2019).

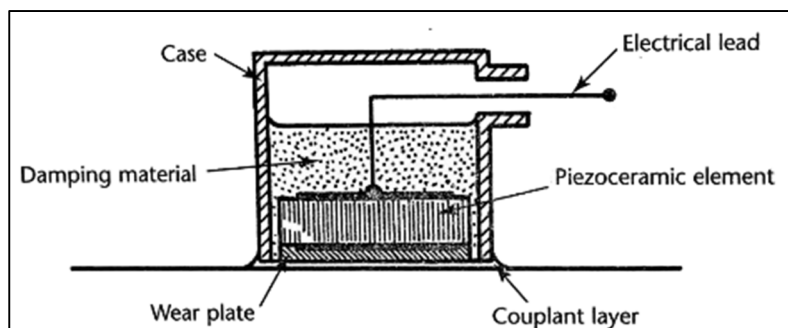


Figure 1.6 Diagramme d'un capteur piézoélectrique pour ÉA
Tirée de Moore, Miller, & Hill (2005, p.52)

Le couplant fournit un bon contact acoustique entre le capteur et la paroi des équipements contrôlés. Le couplant est normalement un liquide de haute viscosité tel une graisse ou une huile. Par contre, la plupart des liquides ne transfèrent pas d'ondes de cisaillement et seulement certaines résines époxy peuvent être utilisées pour saisir la composante tangentielle de l'onde de l'ÉA. Ainsi, pour le contrôle des équipements industriels on suppose que le capteur est sensible aux déplacements normaux uniquement (Moore, Miller, & Hill, 2005.)

Le préamplificateur sert à recevoir les signaux du capteur et à les préparer pour la transmission vers le bloc d'acquisition. Le capteur et le préamplificateur sont électriquement adaptés et sont connectés ensemble par un câble coaxial. Afin de diminuer la sensibilité aux interférences électromagnétiques de ce circuit électrique, le préamplificateur peut être installé directement dans le boîtier de capteur (The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 2016). Pour les cas d'inspection d'équipements de grandes dimensions, la distance entre les préamplificateurs et le bloc d'acquisition peut atteindre des dizaines ou des centaines de mètres. Ainsi, on doit avoir l'adaptation d'impédance entre le capteur et le préamplificateur et le préamplificateur doit avoir un gain assez élevé pour pouvoir transmettre le signal avec la qualité appropriée. Le développement de traitements numériques de signaux a permis de construire des systèmes incorporant, directement après le capteur, un module de pré-traitement analogique du signal suivi de sa conversion en signal numérique. Cette architecture permet d'augmenter l'immunité contre les bruits électriques et la flexibilité des systèmes d'ÉA (Ivanov, Bigus, & Vlasov, 2015). Ce type de systèmes augmente considérablement la distance

entre le bloc d'acquisition et les capteurs et peuvent être utilisés pour contrôler des objets unidimensionnelles et bidimensionnelles de grandes dimensions.

Les blocs d'acquisition et les logiciels de traitement de données doivent avoir la capacité d'échantillonner simultanément les signaux de tous les canaux avec une fréquence d'échantillonnage d'au moins 1 MHz et une plage dynamique d'au moins 100 dB. Ces exigences sont basées sur la nécessité de détecter et d'analyser simultanément différents types de signaux. Par exemple un changement microstructural produit des impulsions isolées de basse amplitude et le développement intense de fissures produit un flux d'une centaine d'impulsions de haute amplitude par seconde.

1.4 Analyse des signaux d'ÉA

Le chemin du signal à travers la paroi des équipements, le capteur et le préamplificateur causent les différences entre les formes d'une impulsion acoustique émise par une source d'ÉA et d'une impulsion électrique (salve) enregistrée par le bloc d'acquisition. En raison de la propagation multimode, la réflexion, la transformation des modes d'ondes, l'atténuation des ondes et l'utilisation de capteurs résonants, les signaux enregistrés ont la forme d'une impulsion radiofréquence, montrée à la Figure 1.7.

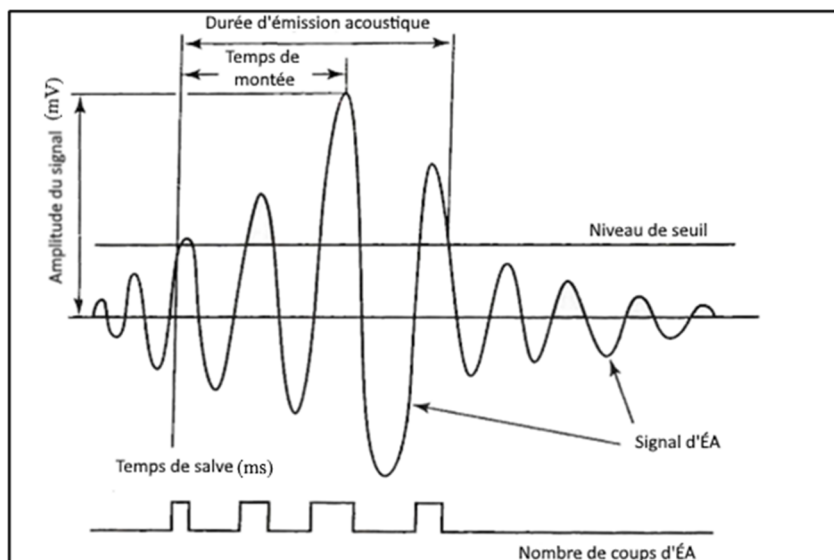


Figure 1.7 Salve d'ÉA avec les paramètres normalement utilisés
Adaptée de Moore, Miller, & Hill, (2005, p.152)

Actuellement, les systèmes d'ÉA commerciaux peuvent analyser environ 16 paramètres du domaine temporel et 6 paramètres du domaine fréquentiel. Les paramètres de base qui définissent la forme de l'onde de salve (Hit) sont utilisés depuis les années 1980 : nombre de coups (Counts), amplitude, durée, temps de montée (Rise Time), puissance du signal ou MARSE (surface sous l'enveloppe du signal redressée). Grâce à la transformée de Fourier, il est possible d'analyser les paramètres du domaine fréquentiel : fréquence de crête, centroïde des fréquences et spectre en puissance. L'analyse empirique de la forme des ondes recueillies à partir d'essais sur des échantillons identiques peuvent servir de base pour l'identification de mécanismes d'endommagement. L'analyse et la reconnaissance automatisée de formes peuvent être utilisées pour augmenter la qualité du contrôle par ÉA (Pollock, 2008 ; Sause, Gribov, Unwin, & Horn, 2012).

L'observation des paramètres de salves (Hits) en fonction du temps est un élément important et obligatoire pour l'évaluation de sources d'ÉA. Les sources d'ÉA ont normalement une nature d'émissions stochastiques avec des signaux d'amplitude aléatoire qui apparaissent à des moments aléatoires. Pendant le contrôle par ÉA, on observe à la fois la valeur instantanée des paramètres du signal et leur changement dans le temps sous forme de graphiques chronologiques. Les paramètres suivants sont normalement utilisés : nombre de coups, taux de comptage (nombre de coups par seconde), activité du canal (nombre de salves par seconde) et amplitude maximale de la salve. De plus, plusieurs paramètres secondaires comme la distribution de l'amplitudes des signaux et la concentration des signaux dans le temps peuvent également être utilisés (Moore, Miller, & Hill, 2005 ; Ivanov, Bigus, & Vlasov, 2015.)

La détermination des coordonnées (localisation) de la source d'ÉA est l'une des fonctions les plus importantes des systèmes d'ÉA. L'utilisation de cette fonction est exigée par la majorité des normes et pratiques d'inspection des équipements industriels. La précision de localisation des sources ne doit pas dépasser 5 % de la distance entre les capteurs (ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V, 2019). Il existe plusieurs techniques de localisation des sources transitoires (discrètes) et continues d'ÉA pour les cas unidimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels.

Le contrôle des tuyaux avec une longueur largement supérieure à leur diamètre est considéré comme un cas unidimensionnel. Les vaisseaux, les réservoirs ou des sections de tuyaux de grands diamètres sont pratiquement considérés comme des parois minces bidimensionnelles et nécessitent un contrôle en conséquence.

La localisation par zones, une technique de base en localisation, peut être utilisée pour les cas unidimensionnels et bidimensionnels pour les sources discrètes et continues d'ÉA. Cette technique suppose que les capteurs aient une sensibilité égale, que les parois de l'équipement soient homogènes et que la valeur de l'atténuation des ondes soit suffisante pour être interprétée. Le capteur ayant le signal de plus grande amplitude sera le plus proche de la source, car le signal détecté par le capteur le plus proche est moins atténué. Ceci permettra de cartographier les sources localisées (Figure 1.8.)

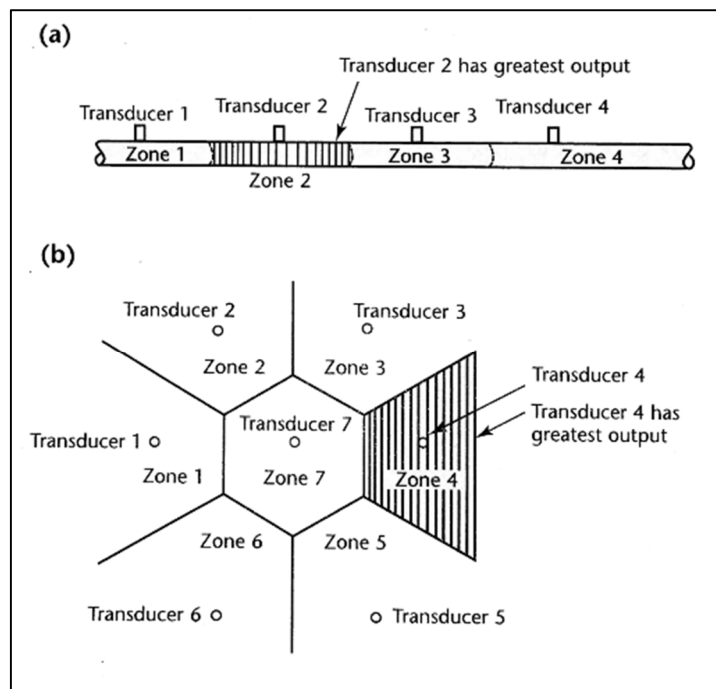


Figure 1.8 Localisation d'une source d'ÉA par zones pour les cas unidimensionnel (a) et bidimensionnel (b)
Tirée de Moore, Miller, & Hill (2005, p.122)

Les systèmes d'ÉA contemporains utilisent normalement la technique de la différence de temps d'arrivée de la salve sur les capteurs installés afin de localiser les sources discrètes. Pour

le cas unidimensionnel, on suppose que la source d'ÉA se trouve entre deux capteurs. La localisation de la source est alors estimée à une distance d du capteur ayant détecté la salve en premier :

$$d = \frac{1}{2}(D - \Delta t V) \quad (1.4)$$

où D est la distance entre les deux capteurs, Δt est la différence de temps d'arrivée de la salve, V est la vitesse des ondes d'ÉA dans la paroi (Moore, Miller, & Hill, 2005.)

Pour le cas bidimensionnel, la différence de temps d'arrivée d'une salve sur deux capteurs permet de localiser la source sur une hyperbole (Figure 1.9, a). Cette hyperbole est définie par l'équation suivante :

$$R = \frac{1}{2} \frac{D^2 - \Delta t^2 V^2}{\Delta t V + D \cos \theta} \quad (1.5)$$

où le rayon R de l'hyperbole varie en fonction de l'angle θ considéré.

L'ajout d'un troisième capteur, qui n'est pas colinéaire avec les deux premiers, permettra d'obtenir deux autres hyperboles passant toutes par la position de la source. Le point d'intersection entre deux de ces hyperboles suffit donc à localiser la source dans un plan (Figure 1.9, b).

Pour localiser les sources d'ÉA continue telles les fuites, on utilise normalement la technique de la différence d'amplitude plutôt que de la différence de temps d'arrivée des signaux. On détermine la différence d'amplitude des signaux sur deux capteurs et la compare avec l'atténuation des ondes dans la paroi. La différence de distances entre la source et les capteurs est définie par l'équation suivante :

$$\Delta d = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \quad (1.6)$$

où α est le coefficient d'atténuation, A_1 et A_2 sont les amplitudes de signaux enregistrés par les capteurs 1 et 2 respectivement.

L'hyperbole passant par le point de fuite est définie de manière similaire à l'équation 1.5 :

$$R = \frac{D^2 - \frac{1}{\alpha^2} \ln^2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)}{\frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) + 2D \cos \theta} \quad (1.7)$$

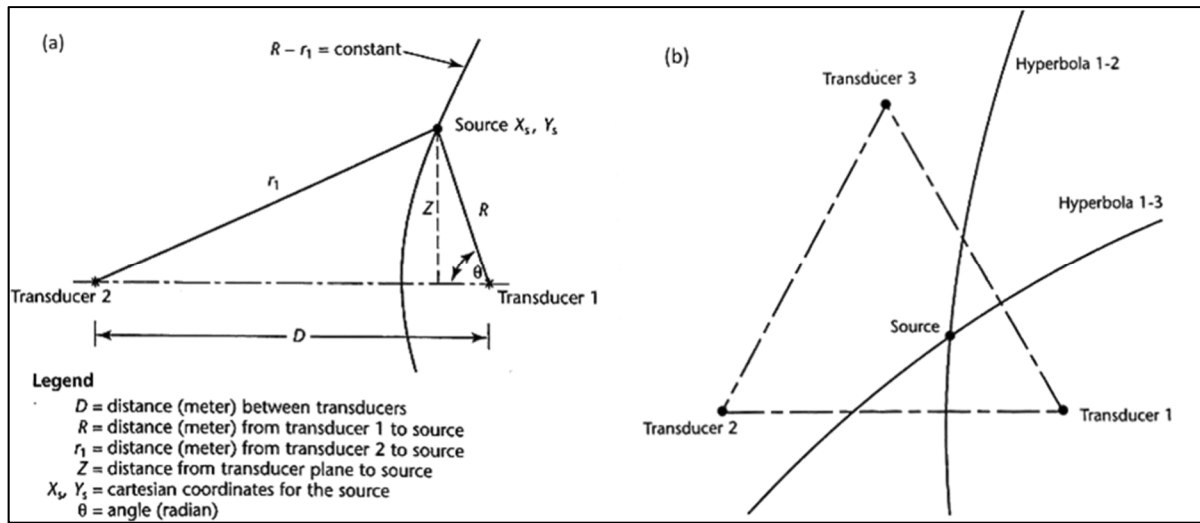


Figure 1.9 Tracé de l'hyperbole pour deux capteurs (a), localisation d'une source par trois capteurs (b)

Adapté de Moore, Miller, & Hill (2005, p.127-128)

Les produits s'écoulant dans les tuyaux ou dans les composants internes des vaisseaux, ainsi que la vibration des pompes ou des compresseurs se propageant dans les parois du système sont autant de sources de bruits de fond affectant la qualité des signaux traités. Ce type de sources d'ÉA ne peuvent pas être localisées correctement car elles ont un caractère continu et se situent en dehors du réseau de capteurs intégré au système. Par ailleurs, la superposition des bruits aux signaux émis par les défauts, déforme les ondes enregistrées, ce qui dégrade les capacités d'analyse y compris celle visant à localiser les sources d'ÉA par la différence de temps d'arrivée d'une salve.

Comme mentionné dans le paragraphe 1.2, il est d'usage de considérer que les signaux d'ÉA se propagent dans la paroi des vaisseaux sous pression et des tuyaux sous la forme d'ondes de Lamb. Les ondes de Lamb sont caractérisées par la dispersion des vitesses des modes qui

dépend de la fréquence des ondes et de l'épaisseur des parois (Figure 1.5). Par ailleurs, ces ondes se propagent entre la source d'ÉA et le capteur suivant plusieurs modes ayant des vitesses différentes. Ce faisant, lorsque le signal est enregistré sur une bande de fréquences suffisamment large, il peut se décomposer en plusieurs salves qui peuvent aussi s'étirer dans le temps (Figure 1.10). Ainsi, la distorsion du signal en raison de la dispersion d'un mode et la présence de salves supplémentaires en raison d'une propagation multimode sont autant de phénomènes qui peuvent introduire des erreurs dans la localisation d'une source d'ÉA.

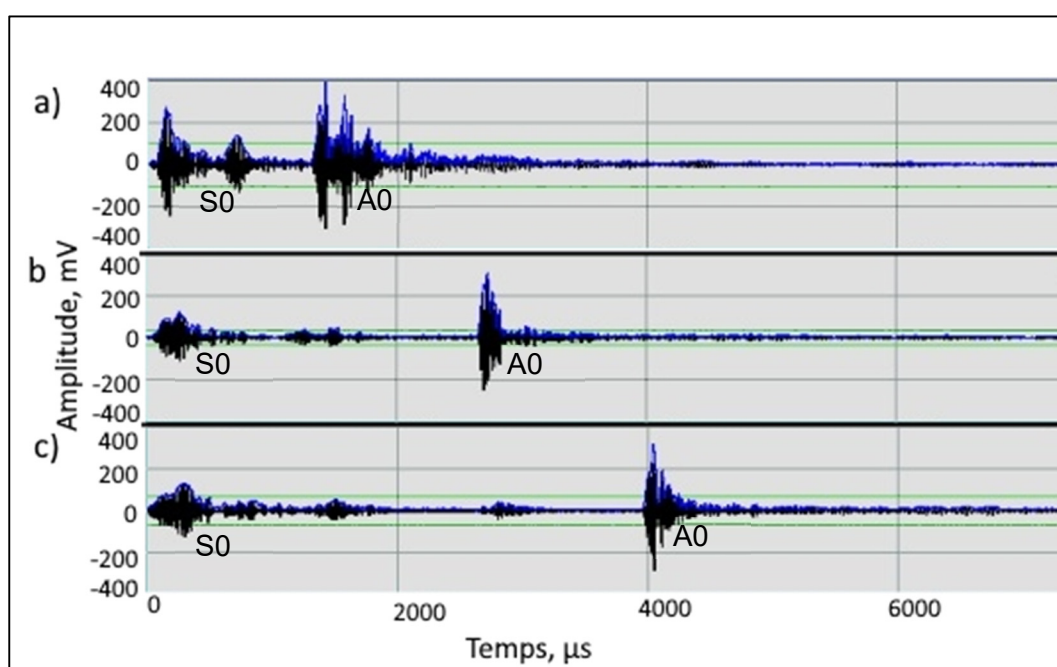


Figure 1.10 Formes d'onde composées de deux modes : les mêmes signaux enregistrés aux distances 11 m (a), 23 m (b) et 33,5 m (c) de la source

Les systèmes d'ÉA contemporains permettent d'augmenter la précision de la localisation d'une source en utilisant une technique de post-filtrage sélectif en fréquence pour les équipements d'épaisseur de paroi connue. Il existe deux techniques principales : la technique du triple point et la technique de premier mode.

Sur l'exemple du graphique de dispersion de la Figure 1.5, on constate que, entre 20 et 25 kHz, la vitesse du premier mode symétrique (S_0) est peu dispersive et presque deux fois plus élevée que la vitesse du premier mode antisymétrique (A_0). En utilisant un filtrage sélectif en

fréquence, il est donc possible de localiser une source d'ÉA en identifiant le temps d'arrivée du mode S_0 .

La technique du triple point est basée sur une fréquence pour laquelle la vitesse de groupe des trois premiers modes de Lamb est approximativement égale (autour de 125 kHz dans l'exemple de la Figure 1.5). En effet, en filtrant le signal autour de cette fréquence, la salve émise par une source d'ÉA ne devrait pas se décomposer en plus d'une impulsion dans le signal observé. Un tel cas réduit donc l'ambiguïté qui pourrait subsister dans l'identification d'un mode de propagation et de la vitesse qui lui est associée. (Zhukov, 2015 ; Moore, Miller, & Hill, 2005).

La technique proposée par Weaver (2001) et Zhukov (2015) utilise la sélection des modes des ondes de Lamb et l'estimation de la distance entre le capteur et la source en calculant la différence de temps d'arrivée de ces modes. La différence de temps d'arrivée de paire de modes est calculée par la superposition des courbes de dispersion des vitesses sur le spectrogramme de signal (Figure 1.11). Les lignes noirs superposées sont les courbes théoriques de la dispersion de vitesses des modes des ondes de Lamb pour l'épaisseur de milieu de propagation. Les points blancs connectés par les lignes montrent les paires de modes qui sont utilisés pour calculer l'éloignement de source d'ÉA de capteur. Avec la connaissance de la vitesse théorique de propagation de chaque mode dans les paires qu'on utilise et la différence de temps d'arrivée de ces modes, on peut estimer la distance parcourue par le signal entre la source d'ÉA et le capteur :

$$d = \frac{v_1 t_1 + v_2 t_2}{2} \quad (1.8)$$

où v_1 et v_2 sont les vitesses de deux modes, t_1 et t_2 sont les temps d'arrivée de ces modes.

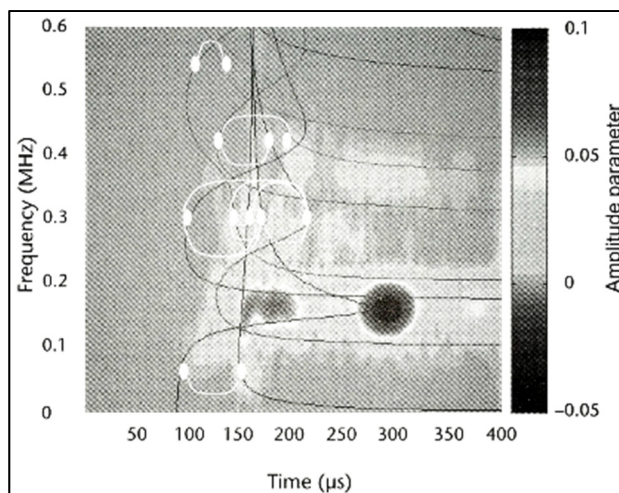


Figure 1.11 Calcul l'éloignement de sources d'ÉA
par la différence de temps d'arrivée de modes
des ondes de Lamb
Tirée de Moore, Miller, & Hill (2005, p.142)

L'évaluation et la classification des sources d'ÉA sont normalement basées sur les paramètres de chargement et leur corrélation avec les paramètres de signaux suivants : amplitude (évolution dans le temps), énergie, nombre de salves, nombre de coups, taux de comptage, et concentration locale des sources. Le choix de technique de classification des sources dépend du type d'équipement utilisé, de son matériel et de la nature de la charge appliquée. Les techniques peuvent être établies par les organisations de standardisation telles ASTM, ASME, ISO, NDIS, etc. Les techniques d'évaluation et de la classification peuvent aussi être développées par les producteurs de systèmes d'ÉA.

Suivant la plupart des procédés et normes utilisés en Amérique du Nord, le résultat d'un contrôle par ÉA peut être soit l'acceptation soit le rejet de l'équipement en fonction de critères établis. Par exemple, d'après l'article 12 du code ASME V (2019), le rejet d'un vaisseau en service doit se faire selon les critères donnés dans le Tableau 1. Les paramètres E_h , T_h , N_t , et E_t doivent être déterminés par le constructeur pour chaque type de vaisseau d'après les normes de conception.

Tableau 1.1 Paramètres d'évaluation de sources d'après le tableau T-1281 de l'article 12 du code ASME V

Paramètre	Valeur
Émission pendant un chargement fixe	Plus de E_h coups au-delà de la période de maintien T_h
Taux de comptage pendant un chargement croissant	Plus que N_t par capteur
Nombre de coups	Plus de E_t coups au-dessus d'un niveau déterminé
Énergie (MARSE)	L'énergie ou l'amplitude des coups augmente avec le chargement
Activité	L'activité augmente avec le chargement

Cependant, certaines normes exigent un résultat sous la forme d'une liste de sources classifiées d'après leur risque potentiel pour l'intégrité structurale de l'équipement. La classification des sources suivant l'amplitude des ÉA qu'elles émettent est un exemple de classification d'après des critères statiques. Cette classification utilise la valeur d'amplitude A_i de trois signaux de source localisée, leur amplitude moyenne A_m et la valeur maximale acceptable d'amplitude A_{max} . 3 à 5 classes peuvent ainsi être établis (Tableau 1.2).

Tableau 1.2 Classification de source d'après le critère d'amplitude

Classe de source	Critère de classification
Classe I –source passive	Moins de trois signaux enregistrés
Classe II –source active	$A_m < A_{max}$
Classe III –source active critique	$A_m > A_{max}$
Classe IV –source catastrophique	$\forall i \in \{1, 2, 3\} A_i > A_{max}$

Les techniques de classification des sources d'ÉA suivant des paramètres dynamiques sont basées sur la dépendance entre le nombre de coups et le facteur d'intensité de contrainte d'une

structure fissurée. Cette dépendance a été étudiée par Dunegan & Harris (1969), et montre que la somme de coups N est liée au facteur d'intensité de contrainte P par la relation 1.6:

$$N = aP^m \quad (1.6)$$

où a et m sont des constantes empiriques.

Dans les circonstances, le calcul du critère dynamique m_i se fait par la relation 1.7 :

$$m_i = \frac{\Delta N_i P_i}{\Delta P_i N_i} \quad (1.7)$$

où $\Delta N_i = N_{i+1} - N_i$, $\Delta P_i = P_{i+1} - P_i$, N_i est l'accumulation de coups jusqu'au temps i , et P_i est le facteur d'intensité de contraintes au temps i .

Ensuite, la classification de sources se fait d'après le Tableau 1.3 :

Tableau 1.3 Classification de sources d'ÉA d'après le critère dynamique

Classe de source	Critère de classification
Classe I –source passive	$m_i < 1$
Classe II –source active	$m_i = 1$
Classe III –source active critique	$1 < m_i \leq 6$
Classe IV –source catastrophique	$m_i > 6$

Une autre technique peut être utilisée pour les essais et l'évaluation d'équipements construits avec des matériaux composites tels les vaisseaux COPV (composite overwrapped pressure vessel). Cette technique d'évaluation se base sur la présence de deux effets complémentaires un à l'autre.. L'effet Kaiser consiste en l'absence d'émission acoustique détectable à un niveau de sensibilité fixe, jusqu'à ce que les niveaux de contrainte précédemment appliqués soient dépassés. Cependant, les matériaux composites ne montrent généralement pas d'effet Kaiser puisque, lorsqu' endommagés, les signaux d'ÉA peuvent apparaître à la suite d'une contrainte moins élevée que celle précédemment appliquée. Ce phénomène connu sous le nom d'effet

Felicity est utilisé pour évaluer l'état de vaisseaux en composite en déterminant le ratio Felicity (FR). Ce ratio représente la fraction du chargement antérieur pour laquelle une source d'ÉA redevient active :

$$FR = \frac{\text{Chargement pour EA significative}}{\text{Chargement précédent}} \quad (1.8)$$

Ainsi, l'effet Kaiser peut être déterminé comme un cas spécial de l'effet Felicity quand le ratio de Felicity est égal 1. Des critères d'acceptation ou de rejet de structures basés sur le FR peuvent être établis par le fabricant de vaisseaux COPV ou par les normes de contrôle. (Weathers, Nichols, Waller, & Regor L Saulsberry, 2010).

1.5 Problème de présence de bruits

La présence des bruits d'origines différentes est un facteur important qui limite l'efficacité du contrôle d'équipement industriel par ÉA. Les capteurs des systèmes d'ÉA ont la capacité de détecter la moindre vibration. Les vibrations se transforment en signaux électriques avec une amplitude de quelques dizaines de microvolts qui sont par la suite amplifiés grâce à des amplificateurs à gain élevé. Ainsi, cette sensibilité peut rendre les systèmes d'ÉA vulnérables aux perturbations autres que celles provenant de sources d'ÉA dans l'équipement inspecté (The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 2016). Les bruits peuvent se superposer aux signaux utiles, altérer l'information qu'ils contiennent ou créer de faux signaux sur le plan de la localisation de sources d'ÉA. Dans ce cas pour s'affranchir du bruit, on doit rejeter des signaux dont l'amplitude est inférieure à un seuil donné, ce qui peut diminuer la sensibilité et la précision du contrôle..

Les formes de signaux provenant de sources de bruit peuvent largement varier : signaux stochastiques et déterministes, signaux stationnaires et non stationnaires, signaux de bande de fréquences large ou étroite. Les bruits peuvent être d'abord classifiés par leur origine : les bruits électriques et les bruits mécaniques (acoustiques). On peut aussi les classifier par le type de signal : transitoire ou continu (Barat, Grishin, & Rostovtsev, 2011).

Les bruits électriques sont souvent produits par les lignes électriques à haute tension, par les émetteurs radio ou par les instruments électriques puissants à cause du couplage électromagnétique entre une alimentation électrique et le système d'acquisition du signal. L'interférence électromagnétique dans le cas de mise à la terre ou de blindage inefficace peut aussi causer des bruits. Le blindage électromagnétique est la pratique consistant à réduire le champ électromagnétique dans un espace en bloquant le champ avec des barrières faites de matériaux conducteurs ou magnétiques. Le blindage est généralement appliqué aux boîtiers pour isoler les dispositifs électriques de leur environnement, et aux câbles pour isoler les fils de l'environnement dans lequel ils passent.

Le contact entre les différentes parties du système et la structure inspectée peut créer des potentiels de masse différents ou de boucles de masse. Une boucle de terre se produit lorsque le boîtier métallique d'un capteur à sortie unique est en contact électrique avec un objet de test métallique. Ce contact crée la possibilité que le courant circule en boucle de la structure d'essai au boîtier du capteur, à un écran de câble coaxial, à la terre de l'instrument, à la terre elle-même et ainsi de suite jusqu'à la structure. La boucle conductrice agit comme une antenne géante. Le rayonnement électromagnétique externe induit un courant dans cette antenne. Le courant produit un potentiel électrique entre les deux extrémités de l'écran du câble dans lequel il flotte. Ce potentiel se manifeste sous forme de bruit.

Les bruits électriques peuvent générer des signaux avec les amplitudes et les fréquences les plus hautes parmi tous les signaux enregistrés. Les systèmes d'ÉA commerciaux sont normalement protégés contre les bruits électriques provenant de la ligne d'alimentation et de l'interférence électromagnétique. Dans un environnement hostile, l'utilisation de capteurs différentiels ou le blindage des capteurs et des préamplificateurs peut s'avérer nécessaire. (Moore, Miller, & Hill, 2005, Ivanov, Bigus, & Vlasov, 2015).

Les bruits mécaniques peuvent être causés par la circulation de liquide dans les pompes, dans les vannes ou à l'intérieur des équipements, par mouvement des pièces mécaniques en contact avec la structure inspectée, ou par les impacts extérieurs tels que le frottement des supports, les précipitations atmosphériques et le vent (Ivanov, Bigus, & Vlasov, 2015.)

Le niveau de bruit interne minimal détermine la sensibilité de système d'ÉA. Ce niveau dépend du bruit de l'agitation thermique des capteurs et de facteur de bruit de l'étage d'entrée des préamplificateurs et des amplificateurs. Généralement, le bruit thermique de l'élément piézoélectrique ne dépasse pas le niveau de 5 μV . Les facteurs de bruit des amplificateurs ne doivent pas dépasser 6 dB. Ainsi, les bruits électroniques au système d'ÉA ne doivent pas dépasser le niveau de 10 μV à la sortie de l'amplificateur (Ivanov & Barat, 2017).

1.6 Techniques de traitement de bruits standards

La présence de bruits de fond est un facteur inévitable à considérer pendant le contrôle des équipements industriels par ÉA. L'élaboration de techniques de contrôle visant à diminuer l'influence du bruit sur la qualité des résultats est un aspect incontournable du développement de méthodes de contrôle par ÉA (Pollock, 2018.) Les normes, les procédés de contrôle et les recommandations du fabricant de l'équipement de contrôle prévoient l'application de deux techniques de base : le seuillage du signal et les filtres en fréquence.

Le seuillage concerne la détection de signaux d'ÉA dont l'amplitude est supérieure à la valeur du seuil prédéfinie et en fonction du niveau de bruit du signal et la sensibilité désirée. Seuls les signaux avec une amplitude dépassant ce seuil seront utilisés pour le traitement et l'analyse des signaux. Le seuil et l'amplitude des signaux sont évalués en décibels :

$$T(\text{dB}) < 20 \log \frac{V_T}{V_{ref}} \quad (1.9)$$

où T est le seuil de détection, V_T est la tension des signaux à analyser et V_{ref} est la tension de référence (The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 2016).

Les normes et les procédés de contrôle exigent que les sources de bruits soient identifiées et évaluées avant le contrôle et qu'elles restent en-dessous du seuil pendant le contrôle par ÉA. Le niveau du seuil peut être entre 6 et 8 dB au-dessus de l'amplitude du bruit de fond. Mais, certaines normes imposent des seuils plus précis. Par exemple, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V (2019) exige d'appliquer un seuil de 40 dB pendant le contrôle d'un vaisseau sous pression métallique et de 48 dB au-dessus de l'amplitude du bruit propre du système pour un vaisseau en matériau composite. Cependant, la discrimination de signaux par

leur amplitude rend impossible la détection de signaux de faible amplitude, diminue la sensibilité du contrôle ou requiert la diminution de la distance entre les capteurs.

La filtration standard en fréquences est basée sur la différence entre le spectre des signaux d'ÉA et ceux du bruit. L'utilisation de filtres passe-haut, passe-bas ou passe-bande permet de choisir la bande de fréquences qui ne correspond qu'aux signaux d'ÉA et rejette le bruit. La Figure 1.12 montre les signaux correspondants à une source d'ÉA et au bruit électrique qui lui est superposé. L'énergie de ces deux signaux se situant dans des gammes de fréquences différentes, il est suffisant d'utiliser un filtre passe-haut de 20 à 30 kHz de fréquence de coupure pour éliminer le bruit du signal d'ÉA.

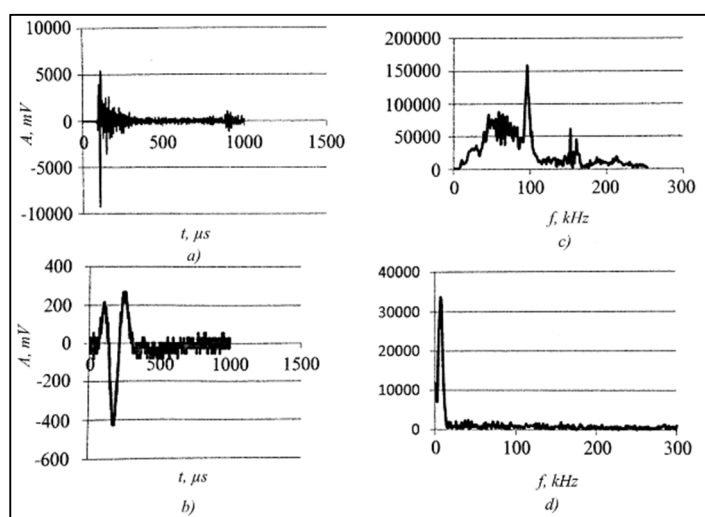


Figure 1.12 Filtrage de signaux par fréquences :
a) Salve d'ÉA ; b) Spectre de salve d'ÉA ;
c) Signal de bruit électrique, d) Spectre de bruit électrique
Tirée de Ivanov & Barat (2017, p.309)

Généralement, le spectre en fréquences des ondes d'ÉA provenant de défauts se situe entre plusieurs dizaines de kilohertz et quelques mégahertz. D'autre part, la fréquence des signaux transitoires des bruits mécaniques ne dépasse habituellement pas 200 kHz ou 1 MHz pour le bruit continu d'un frottement (Izmaylova, 2013 ; Moore, Miller, & Hill, 2005). Ainsi, il serait préférable de choisir une bande de fréquence de contrôle supérieure à 1 MHz. Pourtant, à de telles fréquences, l'atténuation des ondes élastiques dans les métaux est trop élevée et limite la distance de propagation de signaux détectables à quelques dizaines de centimètres. Ainsi, dans

la majorité des cas, on utilise une bande de fréquences de 100 à 600 kHz pour le contrôle de vaisseaux sous pression ou de tuyaux courts et de 30 à 100 kHz pour les tuyaux longs avec un revêtement en polymère (ASME Pressure vessel code, 2019 ; Standard practice 2-2.3-173 Gazprom JSC, 2007). Toutefois, il est très probable que, pendant le contrôle d'un équipement en service, on observe la présence de bruits avec des fréquences qui chevauchent les fréquences des signaux utiles ou avec des amplitudes supérieures à l'amplitude des signaux utiles. Quand il n'est plus possible d'éliminer les bruits par seuillage ou par un filtre fréquentiel, il est indispensable d'appliquer des techniques avancées de filtrage.

1.7 Techniques avancées de filtrage

Généralement, les techniques avancées de filtrage ne sont pas standardisées ou exigées par les normes et procédés pendant le contrôle par ÉA. Ces techniques peuvent être développées par les fabricants des équipements d'ÉA, par les compagnies de services ou par les groupes de recherche. Dans le cadre de ce mémoire, on se limitera donc qu'aux techniques approuvées ou adaptées aux conditions de contrôle des équipements industriels.

1.7.1 Seuillage adaptatif

Le seuillage adaptatif (aussi appelé seuillage flottant ou automatique) est déjà intégré dans certains systèmes d'ÉA à haute vitesse des fabricants Physical Acoustics, Vallen Systeme et Interunis-IT. Suivant la technique de seuillage adaptatif, le niveau du seuil est déterminé par un algorithme de traitement statistique du signal enregistré (Figure 1.13.)

Les premières techniques de seuillage adaptatif utilisaient le traitement analogique des données et le niveau du seuil était déterminé par la valeur efficace (RMS) de la tension d'entrée. Les techniques actuelles sont basées sur deux principes : estimation de la valeur du *Seuil* et sélection de la taille de l'intervalle (fenêtre) n utilisée pour l'estimation du *Seuil*. L'approche de base de la détermination du *Seuil* par la valeur moyenne et l'écart-type n'est pas fiable car les impulsions individuelles influencent directement la valeur moyenne et l'écart-type et les déplacent vers des valeurs plus élevées. Pour surmonter cet effet indésirable, on utilise l'approche médiane de la détermination du *Seuil*.

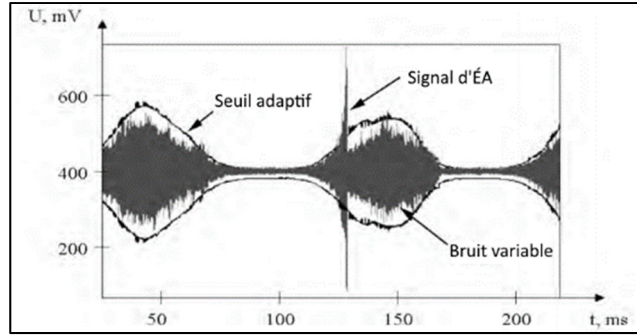


Figure 1.13 Seuillage adaptatif d'un signal ayant un bruit variable

Adaptée de Barat, Grishin, & Rostovtsev (2011, p.3)

La valeur de *Seuil* est déterminée par les équations suivantes où γ est un coefficient déterminé empiriquement :

$$Seuil = median|y(n)| \pm \gamma \sigma_y(y(n)) \quad (1.10)$$

où

$$\sigma_y = \frac{MAD(y(n))}{0,6745 \cdot \sqrt{2}} \quad (1.11)$$

où MAD (déviati n absolue de la médiane) :

$$MAD = median|y(n) - median|y(n)|| \quad (1.12)$$

Afin de détecter les signaux discrets avec la précision appropriée, la taille de la fenêtre doit être variable. La taille optimale de la fenêtre peut être déterminée par le principe d'intersection des intervalles de confiance (ICI). Pour chaque taille prédéterminée $\{N_i\}$ de fenêtre, l'intervalle de confiance est calculé avec l'équation suivante :

$$D(N) = median|y(N_i)| \pm \sqrt{\frac{\pi}{2N_i}} \gamma \cdot \sigma_y(N_i) \quad (1.13)$$

Parmi les tailles choisies, N_i est optimale lorsque l'ensemble des intersections de l'intervalle $D(N)$ avec les intervalles correspondant aux plus petites fenêtres n'est pas vide. (Stachel,

Schegner, & Zivanovic, Ratko, 2008, Barat, Grishin, & Rostovtsev, 2011). Une illustration simple du principe est présentée à la figure 1.14. Nous pouvons voir que lorsque la taille de la fenêtre augmente de N_1 à N_2 , les intervalles de confiance se rétrécissent et s'éloignent en raison de la diminution de la variance et de l'augmentation du biais, ce qui entraîne le rétrécissement des intersections entre les intervalles de confiance. Selon le principe, N_3 est la taille de fenêtre optimale qui permet d'obtenir un équilibre favorable entre la variance et le biais.

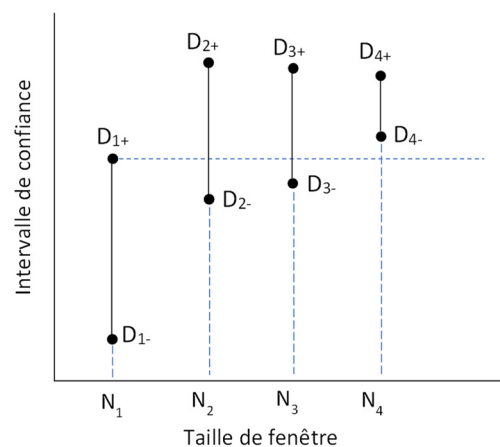


Figure 1.14 Principe d'intersection
des intervalles de confiance

Adaptée de Katkovnik, Egiazarian, & Astola (2002, p.228)

Le seuillage adaptatif a été utilisé avec succès pour la détection des signaux d'ÉA en présence de bruit de fond statique ou le bruit ayant des paramètres variant à des fréquences relativement plus basses que les fréquences des signaux d'ÉA tels que les bruits de frottement et fonctionnement de pompes. Cependant, le seuillage adaptatif n'est pas toujours recommandé quand on utilise des systèmes multivoies. En effet, il peut être compliqué de traiter et comparer avec précision des valeurs des paramètres temporels des signaux enregistrés par les capteurs différents. Ces signaux vont déclencher sur les différents points des formes d'onde de même signal acoustique enregistrés par les capteurs différents à cause des seuils qui varient d'une manière différente (Xiang, 2017 ; Beattie, 2013). Ainsi, l'utilisation de technique de seuillage adaptatif pour les systèmes multivoies en présence de bruit variable ou de bruit avec une amplitude élevée peut diminuer la précision de localisation et parfois causer la perte des signaux utiles, provoquer de fausses alertes.

1.7.2 Technique de seuillage des coefficients d'ondelettes (wavelet denoising)

Le filtrage par le seuillage des coefficients d'ondelettes est une autre technique de filtrage de bruit blanc additif qui est utilisée dans le contrôle des équipements industriels par ÉA (Grosse et al., 2002 ; Elizarov, Barat, & Shimansky, 2014). Les ondelettes sont des fonctions mathématiques qui permettent de découper des données en différentes composantes de fréquence, puis d'étudier chaque composante avec une résolution adaptée à son échelle. Ces fonctions de base sont des ondes de durée limitée, dont la valeur moyenne est égale à zéro, et qui sont mises à l'échelle en fonction de la fréquence.

Les techniques de transformation peuvent être continues ou discrètes. La transformation en ondelettes continue est obtenue en convoluant un signal avec un nombre infini de fonctions, générées par la translation et la mise à l'échelle d'une certaine fonction d'ondelette. La transformation résultante est bidimensionnelle et les paramètres varient continuellement. La transformation inverse nécessite un nombre infini de coefficients. Ainsi, pour reconstruire le signal d'origine, on aurait besoin d'utiliser les outils d'ondelettes discrètes. La transformée en ondelettes discrète utilise un ensemble discret de fonctionnes (Rao & Subramanyam, 2008). Le calcul des coefficients pour la transformation discrète est plus rapide et donne l'information sur le signal avec une quantité limitée de données.

La forme du signal d'ÉA est la superposition $s(n)$ de modes différents et peut être représenté comme une décomposition en ondelettes (Barat, Borodin, & Kuzmin, 2010) :

$$s(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{m',k} \varphi_{m',k}(n) + \sum_{m=m'}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} D_{m,k} \psi_{m,k}(n) \quad (1.14)$$

où $D_{m,k}$ et $A_{m,k}$ sont l'ensemble de coefficients de l'ondelette et de l'échelle qui correspondent aux différentes valeurs de l'échelle, $\varphi(n)$ est la fonction de l'échelle et $\psi(n)$ est la fonction de l'ondelette.

La technique de filtrage comprend trois étapes : décomposition du signal initial en ondelettes, suppression des coefficients inférieurs à une valeur seuil, transformation inverse des ondelettes. Le seuillage se fait normalement par deux méthodes : la méthode du seuil dur et la

méthode de seuil souple. L'opération de seuillage souple met à zéro les coefficients plus petits que le seuil et réduit les autres vers zéro. L'opération de seuillage dur met à zéro les coefficients plus petits que le seuil et conserve les valeurs des autres coefficients (Rao & Subramanyam, 2008).

Le succès du filtrage dépend du choix de critères appropriés aux conditions de contrôle : le choix de la fonction de base et du seuil des coefficients. Ainsi, Barat, Borodin, & Kuzmin (2010) ont trouvé le critère SURE (Stein's unbiased risk estimation) optimal pour le filtrage des signaux d'ÉA enregistrés pendant le contrôle d'équipements industriels. Wijaya et Kencanawati (2014) ont utilisé la fonction de base Coiflet pour l'élimination des bruits de fond pendant l'enregistrement de formes d'ondes de longue durée et la détection de signaux de microfissuration (Figure 1.14). Izmaylova (2013) a comparé l'efficacité de 40 fonctions de base par la méthode PSNR (Peak signal-to-noise ratio) et a trouvé que les fonctions de base Mexican Hat, Haar et Morlet sont optimales pour le filtrage de signaux d'ÉA atténués.

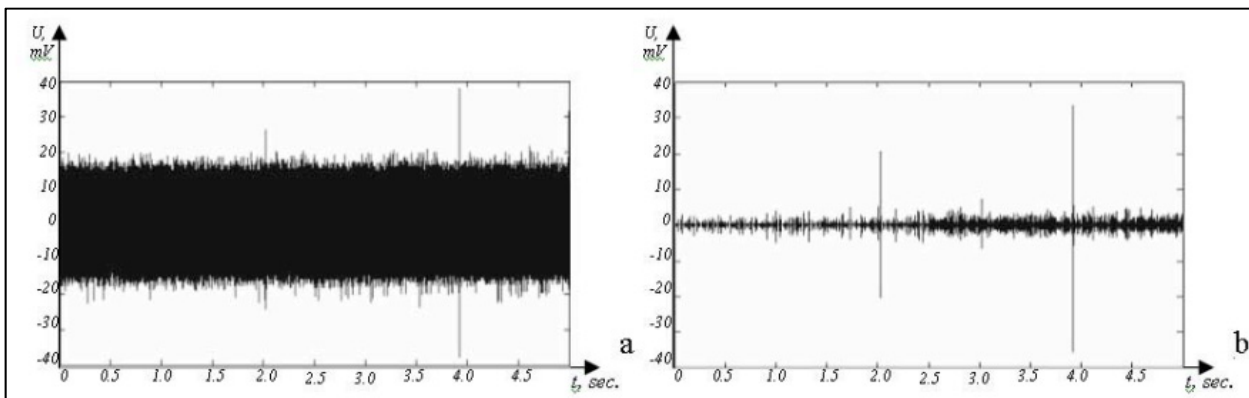


Figure 1.15 Filtrage par seuillage des coefficients d'ondelettes ; a) le signal initial, b) le résultat du filtrage

Tirée de Elizarov, Barat, & Shimansky (2014, p.3)

Ainsi, le filtrage de signaux d'ÉA par seuillage des coefficients d'ondelettes est largement étudié dans le domaine du contrôle des équipements industriels dans des conditions de laboratoire et dans des conditions réelles. Cependant, cette technique n'est pas encore standardisée et incluse dans les logiciels pour le filtrage automatisé de données.

1.7.3 Filtrage optimal de Wiener

Les techniques de filtrage mentionnées ci-dessus sont normalement appliquées en cas de présence de bruit stationnaire. Les bruits provenant des sources telles que les frottements et le fonctionnement de pompes instable peuvent avoir les caractéristiques spectrales compliquées. Le filtrage optimal de Wiener est une autre méthode de filtrage utilisée pour la réduction de ce type de bruit dans des conditions industrielles (Prajna & Mukhopadhyay, 2019 ; Barat, Chernov, & Elizarov, 2016). Cette technique comprend un filtre adaptatif de domaine fréquentiel basé sur la transformation de Fourier avec l'utilisation d'erreur type (MSE) de signal à la sortie de filtre par rapport au signal spécifié comme le critère d'optimisation (Diniz, 2008).

Ce type de filtre suppose que les caractéristiques spectrales du signal d'ÉA désiré soient connues a priori (Figure 1.15). Le bruit est considéré comme un additif dans le signal enregistré :

$$p(t) = q(t) + r(t) \quad (1.15)$$

où $q(t)$ est le signal original pur, $r(t)$ est le bruit additif et $p(t)$ est le signal enregistré. Ensuite, les coefficients de filtrage (gains spectraux) w sont calculés avec le critère d'optimisation (minimalisation d'erreur type) par l'équation suivante :

$$w = (R_{qq} + R_{rr})^{-1} r_{qr} \quad (1.16)$$

où R_{qq} et R_{rr} sont les matrices d'autocorrélation. Les caractéristiques de fréquence de filtre sont déterminées par l'équation (1.17), où P_{qq} et P_{rr} sont les spectres de puissance de $r(t)$ et $q(t)$:

$$W(f) = \frac{P_{qq}(f)}{P_{qq}(f) + P_{rr}(f)} \quad (1.17)$$

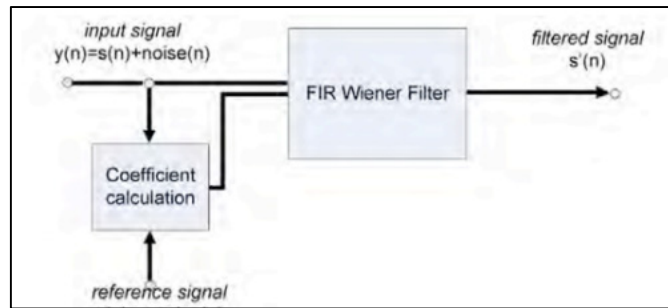


Figure 1.16 Application de filtre optimal de Wiener
Tirée de Barat, Grishin & Rostovtsev (2011, p.5)

Barat, Borodin, & Kuzmin (2010) ont utilisé ce type de filtre pour éliminer le bruit de frottement simulé du signal avec le rapport signal-bruit $SNR < 0.5$. L'application de filtrage optimal de Wiener a donné le résultat de $SNR > 5$ pour le signal de sortie, ce qui garantit la détection de signal d'ÉA (Figure 1.16).

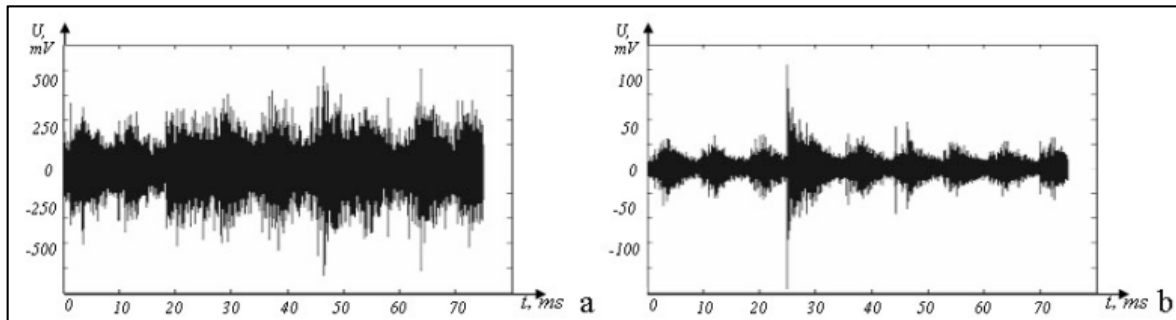


Figure 1.17 Résultat d'application de filtre de Wiener : a) signal avec le bruit de frottement, b) le résultat de filtrage

Tirée de Barat, Borodin & Kuzmin (2010, p.7)

Pour cette technique Prajna & Mukhopadhyay (2019) ont développé avec succès un système de filtrage de signaux de l'ÉA en deux étapes. La première étape consiste à calculer le gain spectral selon un algorithme DD (décision directe) pour la première fenêtre. Ensuite, on estime la valeur préalable de rapport SNR (rapport de composants du spectre de puissance de signal pure sur le bruit) pour la fenêtre suivante afin de calculer le gain spectral de filtre.

Ainsi, le filtrage de Wiener conventionnel et le filtrage de Wiener en deux étapes ont amélioré significativement la détectabilité de signaux d'ÉA en cas de présence de bruits non stationnaires.

1.7.4 Filtrage par l'analyse des séries chronologiques dans le domaine temporel

Comme mentionné ci-dessus, les signaux provenant des défauts de métal se propagent sous forme d'ondes transitoires. Généralement, dans les conditions industrielles le bruit de fond a le caractère continu statique ou continu périodique. Ainsi, il est possible de calculer les caractéristiques statistiques de signal d'ÉA enregistré dans ces conditions. L'apparition de l'ÉA discrète provenant des défauts change les caractéristiques du signal continu et introduit une discordance à court terme dans les séries chronologiques du signal continu. Ainsi, il est possible de développer une technique de détection de signaux d'ÉA dans le bruit par la détection de ces discordances.

Les techniques de domaine fréquentiel basées sur les principes de STA/LTA (Short time average/Long time average) sont largement utilisées dans la sismologie depuis plusieurs années et sont récemment utilisées pour le contrôle par l'ÉA (Agletdinov, Merson, & Vinogradov, 2019 ; Pinal Moctezuma, Delgado Prieto, & Romeral Martinez, 2019). Cette technique compare l'énergie moyenne de signal dans la fenêtre courte (STA) avec l'énergie moyenne de signal dans la fenêtre longue (LTA) :

$$\frac{STA}{LTA} = \frac{\sum_i^{i+N_s} F(i)}{\sum_i^{i+N_l} F(i)} \quad (1.18)$$

où N_s et N_l sont les longueurs de fenêtre courte et longue respectivement, $F(i)$ est une fonction de caractérisation de l'énergie de signal telle que MARSE.

Si l'énergie moyenne dans la fenêtre de STA est plus grande que celle dans la fenêtre de LTA le rapport STA/LTA sera plus grand que 1. Ensuite, le niveau de détection de déclencheur de signal d'ÉA peut être déterminé par la valeur de ce rapport.

L'efficacité de cette technique de détection dépend du choix des valeurs des paramètres afin de fournir une bonne sensibilité de détection et éviter en même temps les fausses détections. Les deux paramètres suivants doivent être déterminés : la durée de fenêtres, le seuil de déclenchement. Normalement, la durée de fenêtre de STA doit avoir une valeur 2 ou 3 fois plus élevée que la valeur de la durée du signal d'ÉA. Cette durée de fenêtre dépend aussi du

changement de forme d'onde de signal à la suite de sa propagation sous forme de plusieurs modes. La durée de la fenêtre de LTA doit être plus longue que la période possible de fluctuation de bruit. Parmi les autres paramètres de temps, on peut utiliser le PEM (temps de pré-événement) et le PET (temps après l'événement), et le temps d'attente de déclenchement.

Les autres techniques de domaine temporel qui ont été utilisés pour la détection de signaux d'ÉA dans le signal continu sont basées sur l'analyse de composantes principales (PCA) (Barat, Chernov, & Elizarov, 2016 ; Emamian et al., 2003.) La technique de l'analyse de Caterpillar SSA est une modification linéaire de PCA qui permet de décomposer des séries chronologiques en composantes additives qui correspondent aux différents processus physiques. L'analyse se déroule en deux étapes de décomposition : l'incorporation et la décomposition en valeurs singulières, et deux étapes de reconstruction : le regroupement et le calcul de moyenne de diagonale (Oropeza, 2010).

La technique de Caterpillar SSA peut être utilisée afin d'analyser les données de monitoring de l'équipement bruyant par l'ÉA, par deux méthodes. Une discordance de l'intervalle de temps Δt entre deux impulsions proches aide à la détection de signal de l'ÉA dans le signal continu. En cas d'absence d'un composant produit par la source d'ÉA dans le signal continu, la valeur de Δt reste permanente et périodique (Figure 1.17a). Au moment de détection de signal d'ÉA, la valeur de Δt devient plus petite, ce qui élimine le caractère périodique du signal à cause de la discordance en court terme (Figure 1.17b).

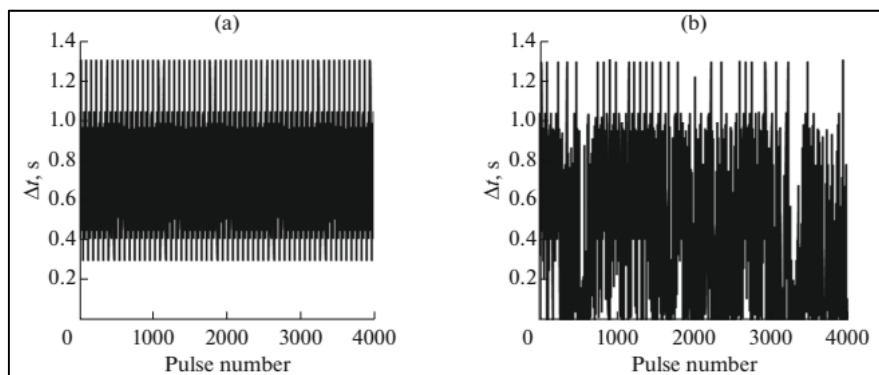


Figure 1.18 a) Paramètre Δt de signal de bruit pur b)
Paramètre Δt de signal avec la composante de l'ÉA
Tirée de Barat, Chernov & Elizarov (2016, p.5)

De plus, les discordes peuvent être détectées par l'analyse des hodographes des composantes du signal. Par exemple, en décomposant le signal harmonique on obtient deux composantes corrélées ayant la même fréquence. L'hodographe de ce signal est tracé sur la surface avec les axes de deux composantes et il aura la forme ronde. Les changements locaux dans le signal continu vont incorporer une autre composante, rompent les liens de corrélation entre les composantes (Figure 1.18a), et, ensuite, changer la forme d'hodographe (Figure 1.18 b).

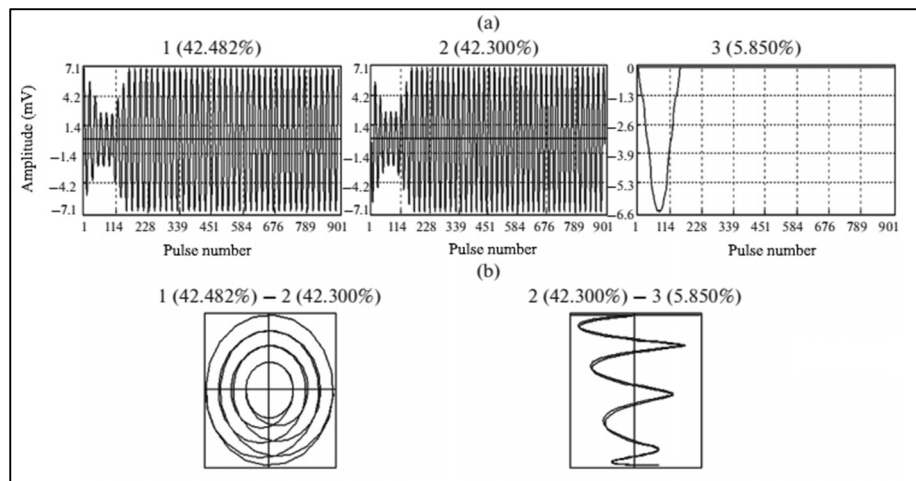


Figure 1.19 Résultat de détection de discordes : a) Trois composantes de signal de bruit avec l'ÉA b) Hodographes de signal de bruit avec ÉA
Tirée de Barat, Chernov & Elizarov (2016, p.8)

1.8 Conclusion

La méthode de contrôle par l'ÉA est largement utilisée pour inspecter des équipements industriels sous pression tels que les vaisseaux ou les tuyaux. Contrairement aux autres méthodes d'évaluation de l'intégrité des matériaux recommandées par les normes et procédés, la méthode de contrôle par l'ÉA permet de détecter les défauts au moment de leur développement dans l'ensemble de la paroi avec un accès limité à la surface. L'utilisation des techniques d'analyse des résultats permet d'évaluer le niveau de risque d'endommagement des équipements, et favorise ainsi l'utilisation des nouvelles méthodes d'inspection basée sur les risques.

En cas de contrôle des équipements industriels sous pression, les bruits d'origines différents peuvent détériorer ou chevaucher les signaux utiles d'ÉA. Afin d'améliorer la détectabilité de

signaux, de différentes techniques de filtrage ont été développées dont certains sont obligatoires selon les normes et sont introduits dans les systèmes d'ÉA. Les techniques de filtrage peuvent être devisés en trois groupes selon leur complexité.

Les caractéristiques spectrales ou temporels des bruits de premier groupe sont différentes des caractéristiques des signaux de l'ÉA provenant des défauts. Les bruits de ce groupe peuvent avoir une origine mécanique ou électrique et un caractère continu ou discret. L'élimination de ces bruits ne représente aucun problème et peut être effectuée par un filtre de fréquence ou un filtre médian.

Le deuxième groupe contient des bruits stationnaires d'une bande de fréquence large. Ces bruits peuvent être causés par les flux de liquides ou gaz, le bruit de la voie acoustique et électrique des systèmes d'ÉA. Les bruits de ce groupe peuvent chevaucher le spectre de signaux utiles. Dans ce cas, le filtrage est effectué à l'aide de traitement numérique, par exemple avec la technique de seuillage des coefficients d'ondelettes.

Les bruits de troisième groupe ressemblent aux signaux d'ÉA par leur forme d'ondes et leur spectre de fréquence. Ces bruits peuvent être causés par un flux turbulent, l'ébullition, le craquement pendant le réchauffement ou refroidissement, le frappement des gouttes de pluie et d'autres actions mécaniques. Dans ce cas, le filtrage peut être basé sur le fait que les signaux de bruit ont un caractère quasi-stationnaire pendant le monitoring continu, alors que les signaux provenant des sources d'ÉA ont un caractère stochastique. Ainsi, ce type de bruit exige l'analyse statistique de série chronologique pendant le monitoring continu et représente la plus grande complexité parmi les autres groupes de bruits.

Selon tout ce qui est mentionné ci-dessus, un bon contrôle des équipements sous pression en service dans les conditions industrielles dépend d'efficacité de technique de filtrage choisi et son applicabilité aux systèmes d'ÉA multivoies. Ces techniques doivent également fournir un résultat qui permettra l'analyse de l'évolution des signaux dans le temps. Dans les chapitres suivants, nous allons comparer les différentes techniques de filtrage de bruit et passer en revue leur état de développement.

CHAPITRE 2

TRAVAUX EXPÉRIMENTAUX

2.1 Planification

Les travaux expérimentaux ont pour but de simuler les conditions de contrôle des équipements industriels sous pression tels que les vaisseaux et les tuyaux pendant leur fonctionnement régulier. Les bruits typiques de ces conditions ne peuvent pas être éliminés par les instruments standards. Ces bruits proviennent de flux turbulent et l'ébullition des produits et le fonctionnement des pompes et des compresseurs. Ainsi, les données enregistrées doivent contenir les signaux d'une source d'ÉA de type fissure. Ces signaux doivent avoir une haute reproductibilité pour plusieurs essais. Le bruit de fond doit avoir une bande de fréquence large avec une amplitude variable. Les données doivent être produites dans un format qui permet tout traitement ultérieur ainsi que l'interprétation des résultats de traitement. Les procédures et les résultats de traitement des données sont présentés dans le Chapitre 3.

2.2 Équipement d'enregistrement de signaux d'ÉA

Selon le standard de l'ASTM E 1139 « Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries » la bande de fréquence recommandée pour le contrôle continu des équipements en service est de 50 à 100 kHz. Ainsi, le capteur piézoélectrique d'ÉA avec les caractéristiques appropriées a été choisi. Les caractéristiques de base de capteur SNK-15 fabriqué par Strategia-NK (Russie) sont présentées dans le Tableau 2.1.

Afin de fixer le capteur sur l'échantillon, le support a été fabriqué avec la technologie d'impression 3D. Ce support a trois pieds avec des aimants et une vis qui permet de régler la force appliquée sur le capteur.

Tableau 2.1 Caractéristiques techniques de capteur SNK-15

Paramètre	Valeur
Type	Non-résonant
Bande de fréquences	30 – 150 kHz
Coefficient de conversion	$\geq 4 \times 10^8$ V/m
Dimensions	Ø22,5 mm × 24 mm

Le contact acoustique entre le capteur et la surface de l'échantillon est assuré par l'application de graisse blanche au lithium.

Afin d'améliorer les caractéristiques des signaux, le capteur piézoélectrique est connecté par le câble coaxial au préamplificateur 1220B de Physical Acoustic Corporation (États-Unis). Ce préamplificateur possède un filtre de fréquences passe-bande de 100 à 1000 kHz qui a été changé pour un filtre de haute fréquence de 20 kHz. Le gain de 40 dB a été choisi. Les caractéristiques de base sont présentées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Caractéristiques techniques de préamplificateur 1220B

Paramètre	Valeur
Gain	40 ou 60 dB
Filtre de hautes fréquence	20 kHz
Entrée	Simple ou différentielle
Impédance d'entrée	10 kOhms en parallèle avec 15 pF
Tension de sortie	≥ 15 V en 50 Ohms
Plage dynamique	85 dB
Niveau de bruit	< 2 μ V

L'acquisition de signal de la sortie de préamplificateur et la conversion analogique-numérique de haute vitesse sont effectuées par l'oscilloscope numérique Tektronix TDS2012C. La bande de fréquence, le taux d'échantillonnage et la résolution correspondent aux capacités de systèmes d'ÉA commercial, ce qui permet d'enregistrer précisément les formes d'ondes de signaux d'ÉA pour tout traitement ultérieur. L'oscilloscope est connecté à l'ordinateur avec

l'interface USB et transfère les formes d'ondes en temps réel vers l'ordinateur. Les caractéristiques de base sont présentées dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 Caractéristiques techniques d'oscilloscope Tektronix TDS2012C

Paramètre	Valeur
Plage de fréquence	100 MHz
Fréquence d'échantillonnage	2 GS/s
Longueur de forme d'onde	2500 points
Résolution verticale	8 bits
Sensibilité verticale	2 mV – 5 V/division
Plage de base de temps	2,5 ns – 50 s/division



Figure 2.1 Capteur d'ÉA, support et préamplificateur installés sur le banc d'essai

2.3 Source d'ÉA

Il existe plusieurs techniques standards d'imitation de sources d'ÉA avec une complexité différente de réalisation. Parmi les techniques recommandées par le standard de l'ASTM E 976

« Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response » (2015), la technique de source Hsu-Neilsen a été choisie.

La source Hsu-Neilsen produit un signal au moment de la fracture de mine de crayon. Cette mine de crayon a un diamètre de 0.5 mm, une longueur de 3 mm et une dureté de 2H. Afin d'augmenter la reproductibilité de ce type de source, le support de crayon a été fabriqué par impression 3D. Le support fixe la mine de crayon avec un angle de 30° (Figure 2.1).



Figure 2.2 Source Hsu-Neilsen –crayon mécanique avec le support

2.4 Banc d'essai

Le banc d'essai est construit pour mener les essais non destructifs des équipements soumis aux conditions industrielles, par les différentes méthodes.

Le banc contient 5 tubes d'acier ASTM A105 ayant des diamètres de 2,0; 2,5; 3,0; 6,0; 6,5 pouces. Le tube utilisé pour les essais a le diamètre de 6,5 pouces et l'épaisseur de 0,218 pouces. Les tubes peuvent être couverts par l'isolation thermique de types différents (Figure 2.2). Le système de contrôle de Microtherm construit par la compagnie de Chromalox permet de contrôler la pressurisation et le réchauffement des tubes. Pour le projet actuel, le banc d'essai est utilisé dans le régime isothermique. Afin d'obtenir un niveau maximal de bruit hydraulique, le taux de circulation de liquide dans les tubes est réglé par la vanne de recirculation.

Le bruit de flux hydraulique a tendance d'avoir un spectre décalé vers une fréquence de 100 kHz ou moins élevée (Moore, Miller, & Hill, 2005). Cependant, le bruit mécanique provenant de frottement continu a un spectre beaucoup plus large. Ainsi, on a décidé d'ajouter aussi une source de bruit mécanique produit par un disque abrasif appliqué sur le tube à une distance maximale possible du capteur.



Figure 2.3 Banc d'essai expérimental

2.5 Logiciel d'acquisition de données

Un logiciel avec une interface conviviale a été créé dans l'environnement de programmation graphique de LabVIEW, afin de réaliser l'acquisition de données, faire le suivi des essais, faire une analyse préliminaire et sauvegarder les données.

Le logiciel contient les fonctions de base de système d'ÉA :

- Affichage et l'enregistrement continu sans seuillage de signal d'ÉA sous forme d'onde long ;
- Afficher les formes d'ondes de signaux transitoires dépassant le seuil déterminé par l'opérateur ;
- Afficher les paramètres de formes d'ondes des signaux transitoires détectés sous forme de tableau et les enregistrer dans le fichier Excel. Les paramètres comme l'amplitude maximale (Hit amplitude, Volts), le numéro des comptes (Counts) et la durée du signal

(Duration, ms). Le nombre de comptes correspond au nombre de fois où l'amplitude a dépassé le seuil choisi par l'opérateur. La durée du signal correspond au temps écoulé entre le premier et le dernier compte;

- Afficher les amplitudes des signaux transitoires (salves) dépassant le seuil, sous forme de points sur le graphique chronologique ;
- Afficher la somme totale des signaux transitoires (salves) enregistrés, sous forme de graphique chronologique ;
- Ajouter le bruit blanc au signal acquis avec l'amplitude et l'écart-type déterminés par l'opérateur ;
- Calculer et afficher le rapport signal-bruit (SNR) pour chaque salve détecté ;
- Sauvegarder les données enregistrées dans le fichier de type TDMS pour tout traitement ultérieur.

L'interface du logiciel est montrée dans la Figure 2.4.

L'enregistrement de signal d'ÉA sans seuillage avec forme d'onde longue dans le fichier permet de traiter les données avec de différents logiciels, ce qui n'est normalement pas possible en utilisant des systèmes commerciaux. La forme d'ondes a une résolution de 1×10^6 points par second.

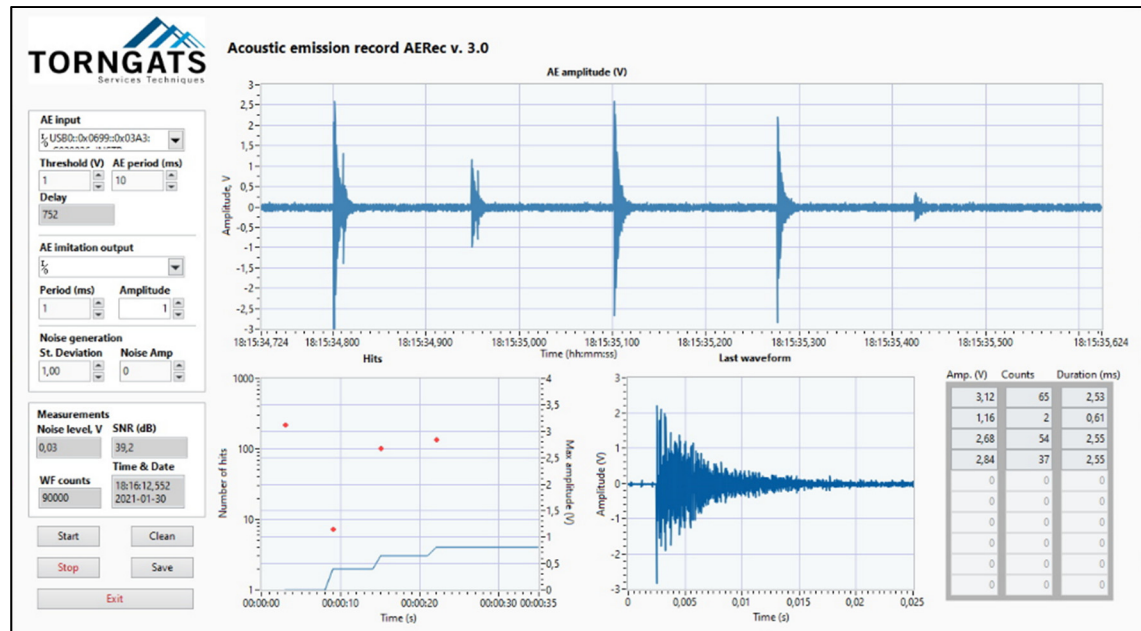


Figure 2.4 Interface du logiciel d'enregistrement

2.6 Plan d'essais

Le plan d'essais inclut les essais préliminaires et les essais avec le bruit généré par la circulation de liquide et le frottement de disque abrasif.

2.6.1 Essais préliminaires

Les essais préliminaires ont pour but de confirmer le fonctionnement stable de l'installation expérimentale, la précision et la reproductibilité des résultats et choisir la distance optimale entre le capteur et la source d'ÉA sur l'échantillon.

Le capteur est installé sur une surface préparée mécaniquement. La vis de support fournit l'épaisseur minimale de couche de graisse entre le capteur et l'échantillon.

Les fractures de mine de crayon sont produites dans les points préparés mécaniquement aux distances de 50, 300, 1300, 2300 et 3300 mm de capteur. Dans chaque point 10 fractures ont été créées à des intervalles convenables. Le niveau de bruit avait une valeur de 0,03 V. Ainsi, le niveau de seuil 0,04 V a été choisi. Un exemple de signal d'une fracture de mine de crayon

est montré dans la Figure 2.5. Les données liées à chaque point ont été sauvegardées dans les fichiers séparés.

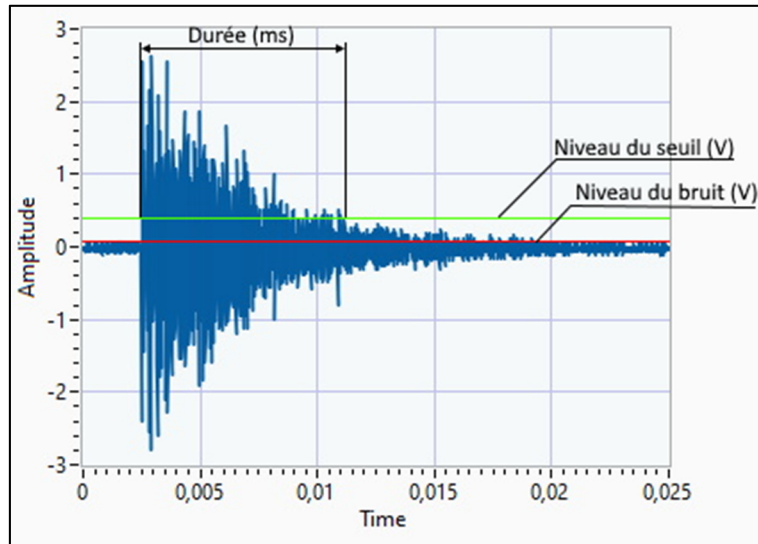


Figure 2.5 Exemple de signal enregistré avec le niveau du bruit de 0,03 V et le niveau du seuil de 0,2 V

Les résultats sont présentés dans la Figure 2.6 sous la forme d'un graphique de l'amplitude moyenne de signal en fonction de la distance.

D'après les résultats des essais préliminaires, on a choisi un point avec une distance de 1300 mm afin d'avoir un signal d'amplitude assez élevée et d'éviter la saturation et la distorsion du signal. L'amplitude moyenne des signaux des 10 fractures est de 2,03 V avec un écart-type de 0,08 V. Ainsi, à cause de l'augmentation de la longueur de voie acoustique « source – capteur », le signal original subit les transformations qui sont propres au contrôle par l'ÉA dans les conditions réelles, telles que l'atténuation et l'augmentation de temps de montée à la suite de la dispersion de vitesses des modes d'ondes de Lamb.

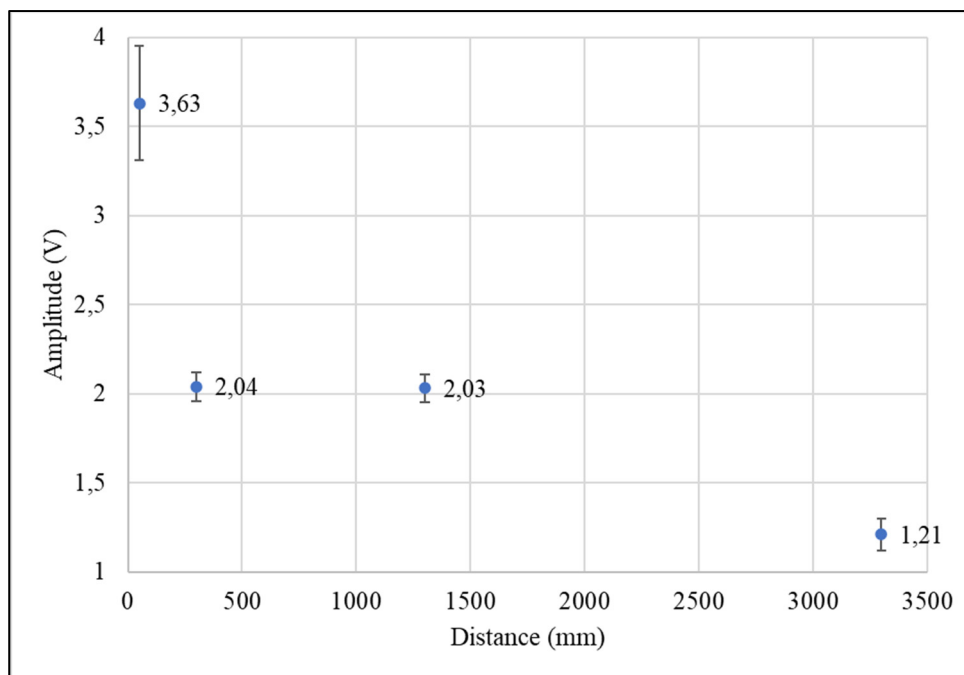


Figure 2.6 Amplitudes moyennes de signaux en fonction de la distance.
Les barres d'erreur signifient l'écart-type

Afin d'évaluer la capacité de banc d'essai de produire le bruit acoustique de niveaux suffisants et contrôlables, on a enregistré le signal qui correspond au taux optimal de circulation de liquide dans les tubes de l'installation, ainsi que le signal de bruit de source mécanique. Les résultats sont présentés dans les Figures 2.7 et 2.8.

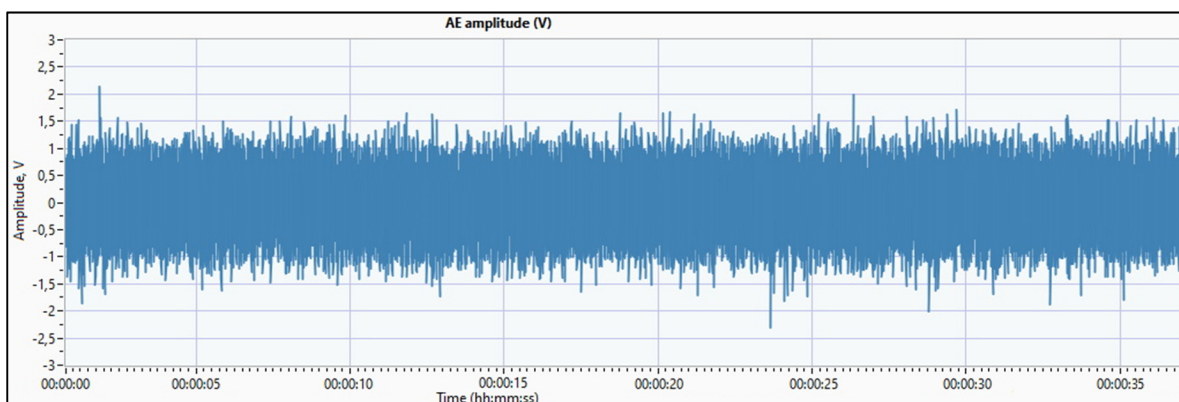


Figure 2.7 Oscillogramme du signal du bruit hydraulique

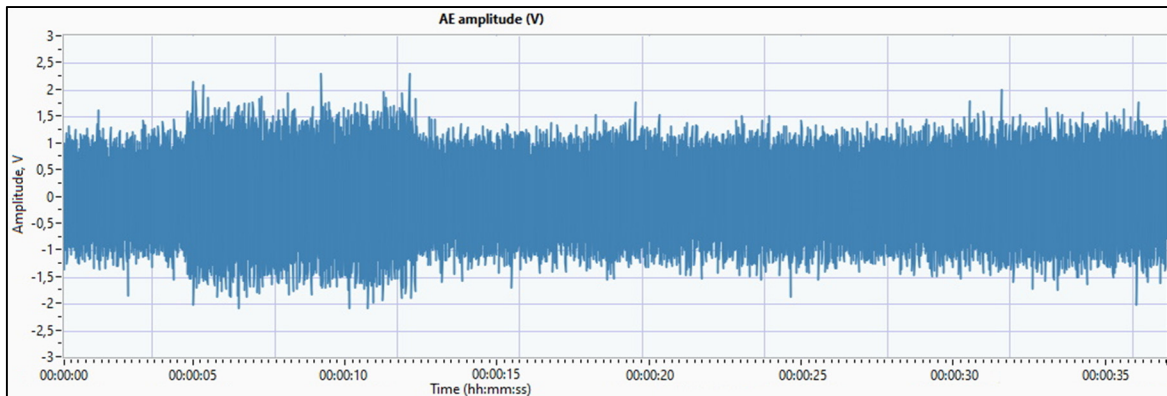


Figure 2.8 Oscillogramme du signal du bruit mécanique

2.6.2 Essais avec le bruit

Les signaux d'ÉA contaminés par le bruit sont enregistrés dans deux étapes : le premier essai avec le bruit de circulation de liquide et le deuxième essai avec le bruit mécanique.

Le premier fichier est enregistré après le démarrage de système de circulation et la stabilisation de circulation. Les 10 fractures de mine de crayon ont été créées à des intervalles suffisants dans le point qui a été choisi après les essais préliminaires.

Le deuxième fichier est enregistré quand le système de circulation a été arrêté et après le démarrage de meuleuse à disque abrasif. Les 10 fractures de mine de crayon ont été créées à des intervalles suffisants dans le point qui a été choisi après les essais préliminaires.

Les résultats graphiques sont présentés dans les Figures 2.9 et 2.10. Les flèches grises montrent les signaux générés.

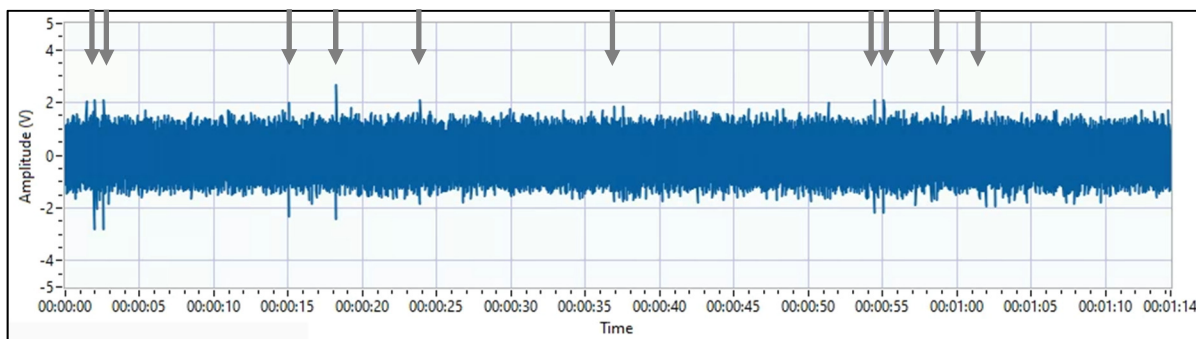


Figure 2.9 Oscillogramme de 10 signaux d'ÉA avec le bruit de circulation de liquide

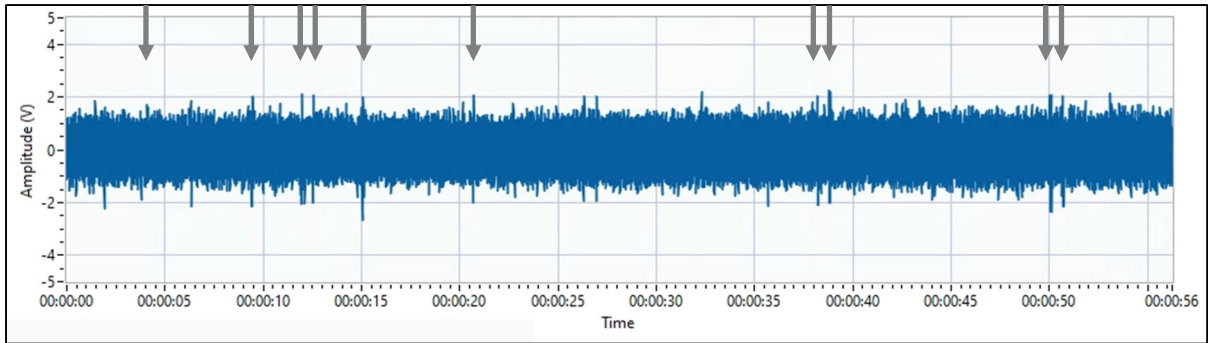


Figure 2.10 Oscillogramme de 10 signaux d'ÉA avec le bruit de frottement

2.7 Résultats des essais

Les signaux enregistrés présentent un exemple de situations de contrôle de défaut actif de type de fissure par l'ÉA dans les équipements industriels en service.

Le rapport signal-bruit maximal pendant l'essai avec le bruit de circulation de liquide est de 3,5 dB, et de 3,2 dB pour le bruit de frottement. Le nombre des comptes et la durée de signal ne peuvent pas être mesurés.

L'augmentation de niveau de bruit à un niveau plus élevé que 1,5 V dans les conditions réelles oblige l'opérateur d'augmenter le niveau de seuil de 6 à 8 dB du niveau de bruit (ASME Pressure Vessel code V). Cette action cause la distorsion de forme de signaux de source d'ÉA et rend difficile de mesurer les paramètres de salve ou entraîne la perte des signaux d'amplitude basse.

Les résultats des essais ont été sauvegardés dans les fichiers TDMS pour tout traitement ultérieur. Les techniques de traitement de signaux et les résultats de l'utilisation de ces techniques sont présentés dans le Chapitre III.

CHAPITRE 3

TRAITEMENT DE SIGNAUX

Le traitement de signaux a pour but d'approuver les techniques de filtrage, déterminer des paramètres optimaux de chaque technique et comparer leur niveau d'efficacité. Ces techniques incluent un filtre adaptatif à réponse impulsionnelle finie (FIR) avec l'algorithme des moindres carrés récursifs (RLS) et l'algorithme des moindres carrés moyens (LMS), un filtre variant dans le temps basé sur la transformation de Gabor et un filtre par seuillage des coefficients d'ondelettes

3.1 Théorie sur les techniques de filtrage testées

3.1.1 Filtres adaptatifs avec la ligne à retard

Les filtres adaptatifs sont des filtres numériques dont les coefficients s'adaptent à des phénomènes variant dans le temps comme dans le cas de l'élimination d'un bruit dont les caractéristiques fréquentielles changent avec le temps. Le filtre peut être du type FIR (réponse impulsionnelle finie) ou IIR (réponse impulsionnelle infinie). L'algorithme permet d'ajuster les coefficients du filtre selon un algorithme d'adaptation LMS et RLS. Le schéma de base de filtre adaptatif est présenté dans la Figure 3.1, où $x(n)$ est le signal bruité, $d(n)$ est un signal désiré, $y(n)$ représente l'estimation de signal filtré et $e(n)$ est l'erreur d'estimation.

Le choix des techniques de filtrage dépend de la simplicité et le délai de réponse. L'algorithme RLS a une vitesse de convergence plus élevée que celle des algorithmes LMS et ne présente pas de problème aux valeurs propres. Cependant, les algorithmes RLS impliquent des opérations mathématiques plus compliquées et ont besoin de plus de ressources informatiques que les algorithmes LMS (Diniz, 2008).

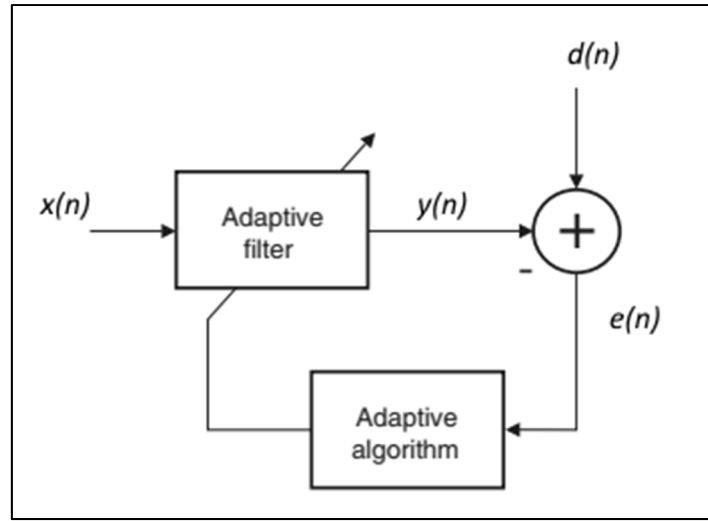


Figure 3.1 Schéma de base de filtre adaptatif
Adaptée de Diniz (2008, p.3)

Les algorithmes standards de RLS et de LMS effectuent les opérations suivantes pour mettre à jour les coefficients d'un filtre adaptatif :

- Calcul de signal de sortie $y(n)$;
- Calcul de signal d'erreur $e(n)$;
- Mise à jour de coefficients de filtre.

Les filtres adaptatifs calculent le signal de sortie $y(n)$ par l'équation suivante :

$$y(n) = \vec{u}^T \cdot \vec{w}(n) \quad (3.1)$$

ou $\vec{u}$ est un vecteur d'entrée :

$$\vec{u} = [x(n)x(n-1)..x(n-N+1)]^T \quad (3.2)$$

et $\vec{w}$ est un vecteur de coefficients de filtre :

$$\vec{w} = [w_0(n)w_1(n) \dots w_{N-1}(n)]^T \quad (3.3)$$

Le signal d'erreur est calculé avec l'équation suivante :

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (3.4)$$

où $d(n)$ est le signal de référence.

Les filtres adaptatifs ajustent ces coefficients pour minimiser la fonction de coût $J(n)$. Pour l'algorithme LMS, cette fonction est définie par l'équation suivante :

$$J(n) = e^2(n) + \alpha \sum_{i=0}^{N-1} w_i^2(n) \quad (3.5)$$

où α est le facteur de fuite avec une plage de $(0 ; 0,1)$ et n est la longueur de filtre.

Pour l'algorithme RLS la fonction de coût est déterminée par l'équation suivante :

$$J(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \lambda^i e^2(n-i) \quad (3.6)$$

où λ est le facteur d'oubli avec une plage de $(0 ; 1]$. Lorsque le facteur d'oubli est inférieur à 1, ça veut dire que l'algorithme RLS accorde un poids plus important à la valeur actuelle et un poids plus faible aux valeurs passées.

L'algorithme LMS avec une fuite met à jour les coefficients par l'équation suivante :

$$\vec{w}(n+1) = (1 - \mu\alpha) \cdot \vec{w}(n) + \mu \cdot e(n) \cdot \vec{u} \quad (3.6)$$

où μ est la taille de pas de filtre.

Pour l'algorithme RLS, le filtre met à jour les coefficients par l'équation suivante :

$$\vec{w}(n+1) = \vec{w}(n) + e(n) \cdot \vec{K}(n) \quad (3.7)$$

où $\vec{K}$ est le vecteur de gain défini par l'équation suivante :

$$\vec{K}(n) = \frac{P(n) \cdot \vec{u}(n)}{\lambda + \vec{u}^T(n) \cdot P(n) \cdot \vec{u}(n)} \quad (3.8)$$

où $P(n)$ est la matrice de corrélation inversée de signal d'entrée qui a la valeur initiale suivante :

$$P(0) = \begin{bmatrix} \delta^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \delta^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

où δ est le facteur de régularisation. L'algorithme RLS de filtre met à jour la matrice de corrélation inversée par l'équation suivante :

$$P(n+1) = \lambda^{-1}P(n) - \lambda^{-1}\vec{K}(n) \cdot \vec{u}^T(n) \cdot P(n) \quad (3.10)$$

Les algorithmes adaptatifs de filtrage de bruit sont basés sur l'utilisation de signal de référence fourni par le capteur supplémentaire ou un signal exemplaire. Le capteur supplémentaire doit enregistrer le bruit non corrélé au signal de défaut, mais bien corrélé au bruit enregistré par le capteur principal. Quand le signal de référence est corrélé seulement avec le bruit de signal d'entrée, le résultat de filtration $y(n)$ est une estimation de bruit présent dans le signal d'entrée et le signal d'erreur $e(n)$ est un signal provenant de défaut.

Cependant, les ondes acoustiques provenant du défaut se propagent dans toute l'intégrité de paroi. En même temps, le bruit se propage par les voies différentes pour atteindre le capteur principal et le capteur de référence. Alors, il n'est pas possible d'avoir un signal de bruit parfait pendant l'inspection. Ainsi, on peut créer le signal de référence en utilisant la ligne à retard pour le signal d'entrée. La valeur de retard dépend de corrélation entre un signal de défaut et un signal de bruit.

3.1.2 Filtre variant dans le temps (TVF)

La technique de filtrage variant dans le temps est basée sur la transformation discrète de Gabor. La transformation de Gabor est un cas particulier de la transformation de Fourier à court terme. Elle est utilisée pour déterminer le contenu en fréquence et en phase de sections locales d'un signal lorsqu'il évolue dans le temps. La fonction à transformer est d'abord multipliée par une fonction gaussienne, qui peut être considérée comme une fonction fenêtre, et la fonction résultante est ensuite transformée par une transformation de Fourier pour obtenir l'analyse temps-fréquence (Sejdić, Djurović, & Jiang, 2009).

La transformation discrète de Gabor est une transformation linéaire inversible. Le résultat de cette transformation est un ensemble de coefficients de Gabor $c_{m, n}$. L'expansion de Gabor discrète est l'inverse de la transformation discrète de Gabor.

Pour éliminer le bruit ou séparer les composantes d'un signal variant dans le temps, on utilise d'abord la transformation discrète de Gabor pour calculer la représentation temps-fréquence d'un signal. Après avoir supprimé les composantes non utiles tel que le bruit, et modifier la représentation temps-fréquence du signal, le signal peut être recomposé par l'opération inverse intitulée l'expansion discrète de Gabor (Figure 3.2).

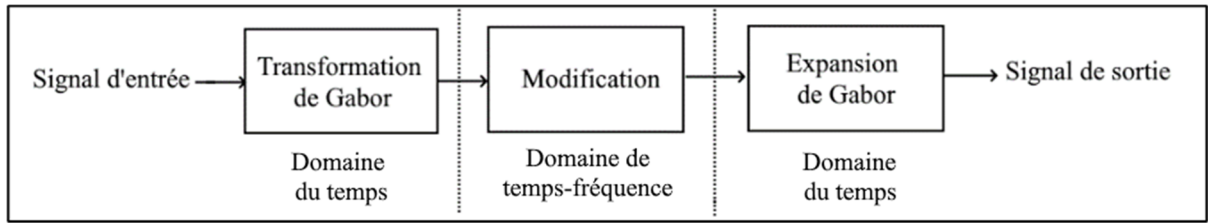


Figure 3.2 Principe de filtrage basé sur la transformation discrète de Gabor

Le masquage et le seuillage sont les méthodes les plus couramment utilisées pour modifier un signal dans le domaine temps-fréquence. Un masque définit les parties de la représentation temps-fréquence à conserver et celles à mettre à zéro. Le seuil définit les parties de la représentation temps-fréquence dont l'amplitude est supérieure au seuil et celles qui doivent être mises à zéro. Le masque et le seuil sont similaires à des filtres dont les spécifications dépendent du temps. Ce type d'application est communément appelé filtre variant dans le temps.

La composition de signal filtré $s(i)$ est une combinaison de fonctions linéaires élémentaires $h_{m,n}(i)$:

$$s(i) = \sum_{m=D}^{M-1} \sum_{n=D}^{N-1} c_{m,n} h_{m,n}(i) \quad (3.11)$$

La fonction $h_{m,n}(i)$ est la version décalée dans le temps et modulée en fréquence d'une fonction de fenêtre $h(i)$:

$$h_{m,n}(i) = h(i - mdM) e^{\left(\frac{j2\pi ni}{N}\right)} \quad (3.12)$$

où $h(i)$ est la fenêtre de synthèse, dM est le pas de temps, et N est la barre de fréquence. Coefficient $c_{m,n}$ montre comment le signal se comporte dans le domaine temps-fréquence autour des centres de temps et de fréquence de $h_{m,n}(i)$ et il est défini par l'équation suivante :

$$c_{m,n} = \sum_i s[i] \gamma[i - mdM] e^{\left(-\frac{j2\pi ni}{N}\right)} \quad (3.13)$$

où $\gamma(i)$ est la fenêtre d'analyse. Le choix approprié du type et des paramètres de fenêtre est important pour la transformation de Gabor. Le rapport N sur dM est appelé le taux de suréchantillonnage. Le taux de suréchantillonnage doit être supérieur ou égal à 1 pour reconstruire le signal du domaine temporel à partir de la représentation du domaine temps-fréquence.

3.1.3 Filtrage par seuillage des coefficients d'ondelettes

Les ondelettes sont des fonctions mathématiques qui découpent les données en différentes composantes de fréquence, puis étudient chaque composante avec une résolution adaptée à son échelle. La principale différence entre la transformation de Gabor et la transformation en ondelettes est que les fonctions d'ondelettes individuelles sont localisées dans l'espace. Les transformées en ondelettes ne disposent pas d'un ensemble unique de fonctions de base comme la transformée de Fourier, qui utilise uniquement les fonctions sinus et cosinus. Au contraire, les transformées en ondelettes disposent d'un très grand ensemble (infini) de fonctions de base possibles. L'analyse en ondelettes permet donc d'accéder immédiatement à des informations qui peuvent être masquées par d'autres méthodes temps-fréquence telles que l'analyse de Fourier.

Sur la base d'une ondelette particulière, il est possible de définir une expansion d'ondelette. Une expansion d'ondelette est la représentation d'un signal en termes d'une collection orthogonale de fonctions à valeur réelle générées en appliquant des transformations appropriées à l'ondelette originale donnée. Ces fonctions sont appelées ondelettes "filles" tandis que l'ondelette originale est appelée ondelette "mère", en reconnaissance de sa fonction de source de la collection orthogonale.

Si $f(t)$ est un signal donné à décomposer, il est possible de représenter le signal comme suit :

$$f(t) = \sum_j \sum_i a_{j,i} \psi_{j,i}(t) \quad (3.14)$$

où $\psi_{j,i}(t)$ sont les fonctions de base orthogonales, et les coefficients $a_{j,i}$ peuvent être trouvés par le produit interne de $f(t)$ et des fonctions $\psi_{j,i}(t)$.

Les techniques de filtrage supposent que la représentation par ondelettes utilisée pour la suppression du bruit est obtenue en utilisant des ondelettes périodisées basées sur $[0,1]$. Les fonctions de base sont générées par dilatation et translation d'une fonction d'échelle φ à support compact, également appelée ondelette père, et d'une fonction d'ondelette mère familière, ψ . L'expression de la décomposition en utilisant une ondelette mère et une ondelette père est représentée par l'équation suivante :

$$g(t) = \sum_{k=0}^{2^{j_0}-1} \alpha_{j_0 k} \varphi_{j_0 k}(t) + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_{k=0}^{2^j-1} \beta_{jk} \psi_{jk}(t), \quad j_0 \geq 0, t \in [0,1] \quad (3.15)$$

où j_0 est un niveau de résolution primaire, et $\alpha_{j_0 k}$ et β_{jk} sont calculés comme les produits internes indiqués dans les équations suivantes :

$$\alpha_{j_0 k} = \int_0^1 g(t) \varphi_{j_0 k}(t) dt, \quad j_0 \geq 0, k = 0, 1, \dots, 2^{j_0} - 1 \quad (3.16)$$

$$\beta_{jk} = \int_0^1 g(t) \psi_{jk}(t) dt, \quad j \geq j_0 \geq 0, k = 0, 1, \dots, 2^j - 1 \quad (3.17)$$

Lorsque la transformée en ondelettes discrètes est utilisée, les coefficients $c_{j_0 k}$, coefficients d'échelle discrets et d_{jk} , coefficients d'ondelettes discrets sont utilisés à la place des paramètres continus $\alpha_{j_0 k}$ et β_{jk} .

La méthode pour éliminer le bruit d'un signal contaminé consiste à modifier les coefficients des ondelettes de manière intelligente, de sorte que les "petits" coefficients associés au bruit soient fondamentalement négligés. Les coefficients mis à jour peuvent donc être utilisés pour reconstruire la fonction sous-jacente originale sans les effets du bruit. Il est implicite dans la stratégie que seuls quelques "grands" coefficients d'ondelettes d_{jk} sont associés au signal original, et que leur identification et l'élimination de tous les autres coefficients permettront une reconstruction parfaite du signal sous-jacent $g(t)$.

Plusieurs méthodes utilisent cette idée et la mettent en œuvre de différentes manières. Lorsque l'on tente de réduire l'influence des coefficients des ondelettes de bruit, il est possible de le faire de manière particulière, et le besoin d'informations sur le signal sous-jacent conduit à différents traitements statistiques des informations disponibles (Kougioumtzoglou, I. et al., 2009).

3.2 Logiciel de traitement de signaux

Afin de traiter les données expérimentales, un logiciel avec l'interface conviviale a été créée dans l'environnement de programmation graphique LabVIEW, le langage graphique est nommé « G », un langage de programmation de flux de données. L'exécution des logiciels est déterminée par la structure d'un schéma fonctionnel graphique sur lequel le programmeur relie différents nœuds de fonctions en dessinant des câbles. Ces câbles propagent les variables et tout nœud (fonction) peut s'exécuter dès que toutes ses données d'entrée sont disponibles. Comme cela peut être le cas pour plusieurs nœuds simultanément, G est intrinsèquement capable d'exécution parallèle.

Les programmes et sous-programmes de LabVIEW sont appelés instruments virtuels (VI). Chaque VI comporte trois éléments : un diagramme de blocs (Block-diagramme), une interface (Front Panel) et un panneau de connexion. Ce dernier est utilisé pour représenter le VI dans les schémas-blocs d'autres VI appelants. Les commandes et les indicateurs de l'interface permettent à un opérateur de saisir des données dans un instrument virtuel en cours d'exécution ou d'en extraire.

Le logiciel de traitement de signaux permet d'ouvrir les fichiers TDMS enregistrés pendant les essais, de visualiser le contenu de ces fichiers et d'appliquer plusieurs techniques de filtrage. Ces techniques incluent un filtre adaptatif à réponse impulsionnelle finie (FIR) avec l'algorithme des moindres carrés récurrents (RLS) et l'algorithme des moindres carrés moyens (LMS), un filtre variant dans le temps basé sur la transformation de Gabor et un filtre par seuillage des coefficients d'ondelettes.

L'efficacité de filtrage est évaluée à l'aide de rapport signal-bruit (SNR) minimal, le délai de traitement et le nombre de signaux d'ÉA détectables après le filtrage.

Les résultats de filtrage sont présentés sur le graphique en bas de graphique de signal d'entrée. Les résultats peuvent être sauvegardés dans le fichier TDMS sous forme d'onde pour toute analyse ultérieure.

L'interface du logiciel est présentée dans la Figure 3.3.

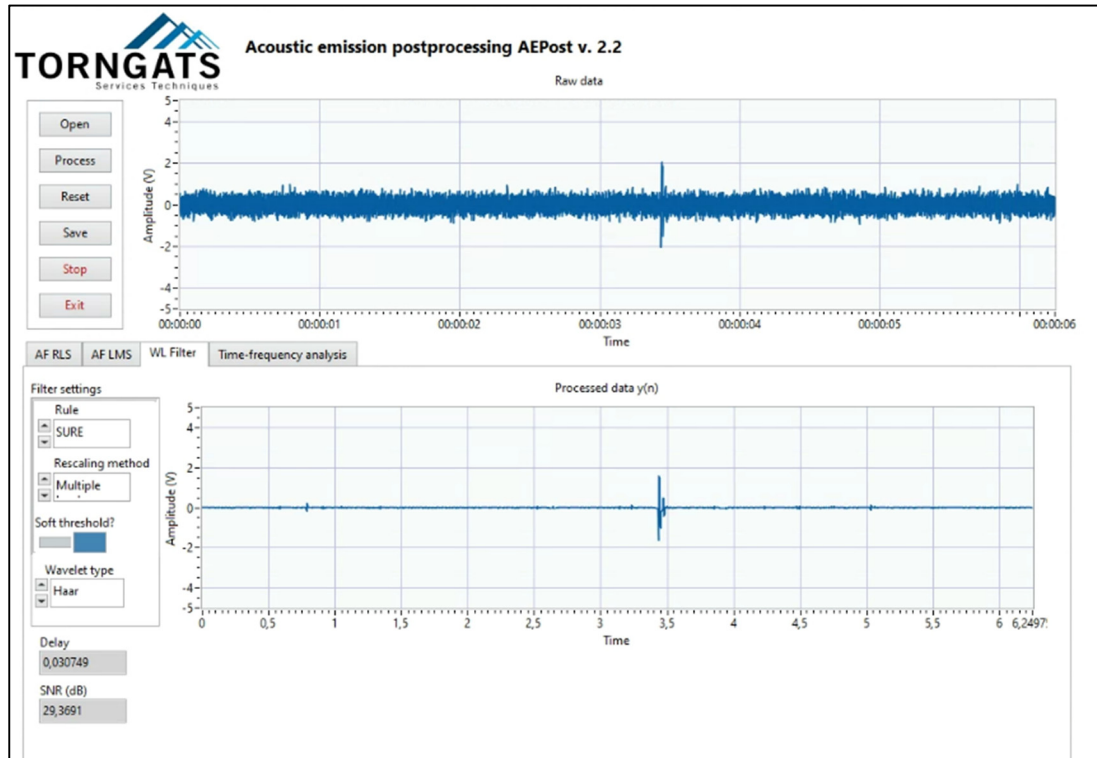


Figure 3.3 Interface du logiciel de traitement de données

3.2.1 Implémentation des techniques de filtres adaptatifs

Dans le logiciel, le filtrage de données se fait avec les instruments de Bibliothèque de filtres adaptatifs. Cette bibliothèque fournit les VI qu'on peut utiliser pour créer, utiliser et détruire les filtres adaptatifs. On va montrer les étapes d'un filtrage adaptatif à l'aide de l'exemple d'un filtre adaptatif à réponse impulsionnelle finie (FIR) avec l'algorithme des moindres carrés récurrents (RLS).

D'abord on doit créer un filtre adaptatif en utilisant le VI « AFT Create FIR RLS » et spécifier les paramètres principaux :

- Facteur de régularisation ;
- Longueur de filtre ;
- Facteur d'oubli ;

Pour l'algorithme LMS on doit spécifier les paramètres suivants :

- Facteur de fuite ;
- Taille de pas de filtre.

Les paramètres sont contrôlés par l'utilisateur par les commandes numériques correspondants sur l'interface du logiciel.

Ensuite on utilise VI « AFT Filter Signal and Update Coefficients » pour simuler le filtre et le VI « AFT Destroy Adaptive Filter » pour détruire le filtre adaptatif après avoir filtré un signal. Si on ne détruit pas le filtre adaptatif, des fuites de mémoire peuvent se produire. Le VI de filtrage est créé en boucle « For Loop » avec le nombre d'itérations N égale au nombre de lignes du tableau de données d'une forme d'onde. Tout d'abord, on extrait et met dans le mémoire une forme d'onde de fichier TDMS par une fonction « TDMS Read ». Le tableau de donnée est extrait d'une forme d'onde par une fonction « Get Waveform components ». Le nombre de ligne de ce tableau est calculé par une fonction « Array size ». Après le filtrage, le signal est reconstruit avec les paramètres de la forme d'onde originale à l'aide d'une fonction « Build Waveform ». Le diagramme de blocs est montré sur la Figure 3.4.

La valeur de retard de signal de l'entrée $d(n)$ est définie par l'opérateur. La valeur de retard est déterminée par le nombre des lignes par lequel le tableau de données d'une forme d'onde sera décalé. Ce décalage est spécifié par l'opérateur par un commande numérique « Delay ». La somme de la valeur « Delay » et le numéro de l'itération courante détermine quelle ligne de tableau sera sélectionnée par une fonction « Index Array ». La valeur de cette ligne sera utilisée par le filtre adaptatif comme le signal $d(n)$. La valeur de retard doit être déterminée pour chaque cas selon les conditions de contrôle.

Le délai de réponse de filtre est calculé comme la somme de toutes les itérations de la boucle. La durée de chaque itération est calculée à l'aide d'un VI « High Resolution Relative Seconds ».

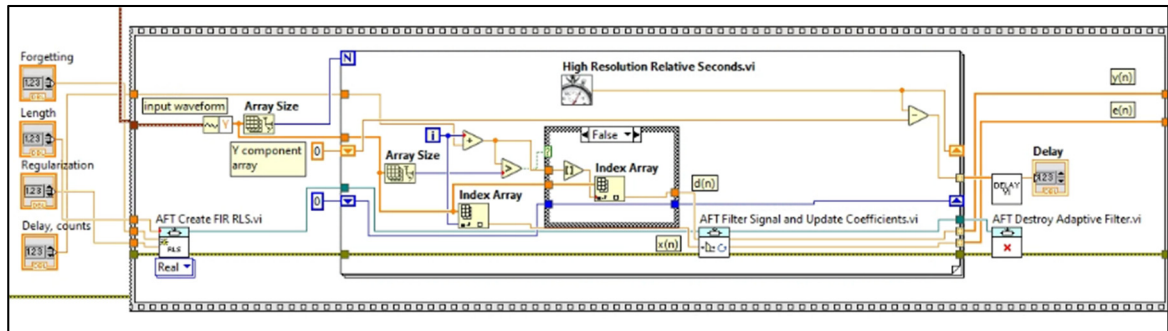


Figure 3.4 Diagramme de blocs du filtre adaptatif avec une ligne à retard

3.2.2 Implémentation d'une technique de filtre TVF

Dans le logiciel, le filtrage se fait avec le VI « TFA Time Varying Filter » de Bibliothèque Traitement avancé de signaux. Pour le filtrage de signal on a utilisé les paramètres suivants : nombre de barres de fréquences, taille de pas de temps, longueur de fenêtre et le niveau de seuil.

Le nombre de barres de fréquences N définit le nombre des fréquences porteuses des fonctions élémentaires de Gabor. N doit être une puissance de 2. Pour une reconstruction stable de signal, N doit être supérieur ou égal à dM (pas de temps). Le paramètre dM (pas de temps) définit la taille de pas de déplacement de fenêtre. La longueur de fenêtre L définit la longueur de fenêtres des fonctions élémentaires de Gabor. La longueur de la fenêtre gaussienne doit être supérieure ou égale à N . Dans le logiciel, le paramètre S (seuil) est manipulé par l'opérateur et définit l'amplitude de seuil pour les coefficients de Gabor et met au zéro tous les coefficients inférieurs au seuil.

Ce VI utilise le signal d'entrée sous forme d'une forme d'onde qui a été extrait de fichier TDMS. Ainsi, le VI n'est pas besoin d'être mis en boucle pour traiter les données. On peut choisir le niveau de seuil par un contrôle numérique sur l'interface. En activant le bouton « Front Panel » on peut spécifier les paramètres de la transformation de Gabor de filtre dans la fenêtre de dialogue. Deux VI « High Resolution Relative Seconds » sont utilisés pour mesurer

la différence de temps entre le début et la fin de l'exécution du code dans le segment central de la structure de la séquence afin d'évaluer le délai de réponse. Un fragment de diagramme de blocs et de la fenêtre de dialogue sont montrés sur la Figure 3.5.

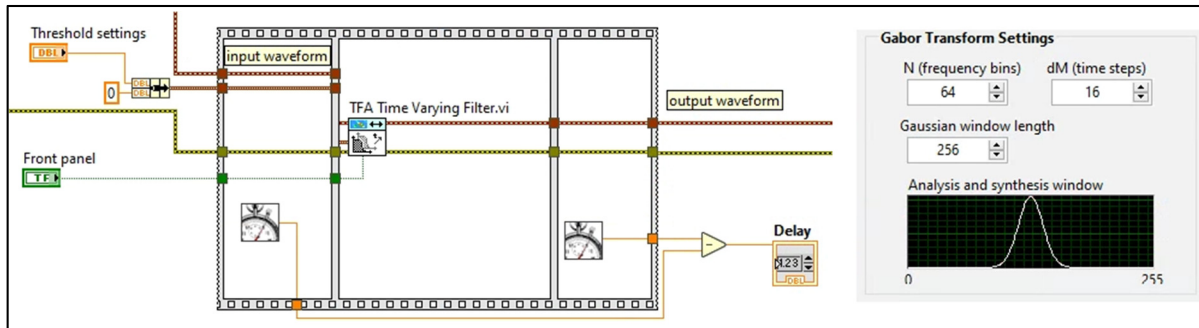


Figure 3.5 Diagramme de blocs du filtre TVF et la fenêtre de dialogue

3.2.3 Implémentation d'une technique du seuillage des coefficients des ondelettes

Le seuillage des coefficients d'ondelettes qui est une autre technique de filtrage dans le domaine de temps-fréquences, a été utilisé dans le logiciel. Le filtrage se fait à l'aide de VI « WA Denoise » de Bibliothèque Traitement avancé de signaux. Ce VI utilise une transformation en ondelettes discrète.

Le filtrage se fait en trois étapes :

- Transformation du signal en ondelettes et obtention des coefficients de détail et les coefficients d'approximation ;
- Application d'un seuillage doux aux coefficients résultant et supprimant ainsi les coefficients inférieurs à un certain seuil. Le seuillage doux permet de conserver la continuité des coefficients et la fluidité du signal reconstruit, mais peut réduire l'amplitude du signal ;
- Reconstruction des coefficients après le seuillage et retransformation de signal dans le domaine de départ.

Comme le VI précédent, ce VI peut travailler avec des formes d'onde et il n'a pas besoin d'être mis en boucle. Sur l'interface on peut choisir le type de l'ondelette utilisée pour la transformation à l'aide d'une liste déroulante. Les commandes pour les autres paramètres

restants sont regroupées dans un cluster. Dans ce cluster on peut choisir sur l'interface on peut choisir la règle de seuillage de coefficients, le type de seuillage et la méthode de redimensionnement. Le délai de réponse est calculé de la même manière que pour le filtre TVF. Un fragment de diagramme de blocs de filtre du seuillage des coefficients des ondelettes est montré sur la Figure 3.6.

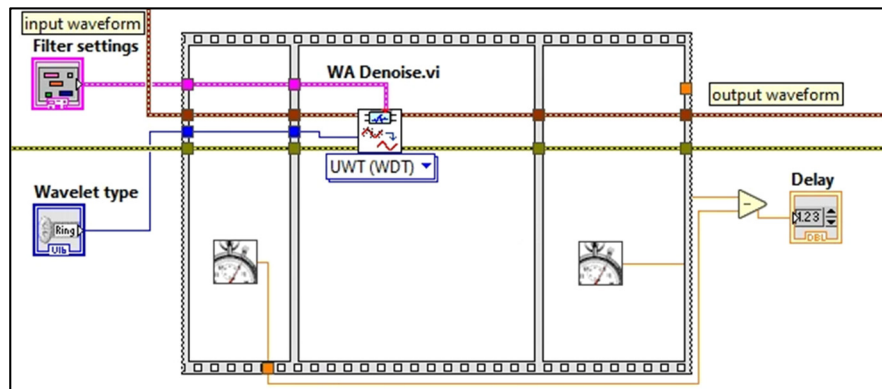


Figure 3.6 Diagramme de blocs du filtre du seuillage de coefficients d'ondelettes

3.3 Optimisation des paramètres de filtres et résultats du filtrage

3.3.1 Filtres adaptatifs avec la ligne à retard

Pour trouver la combinaison optimale des paramètres de filtres, on a fait plusieurs essais de filtrage d'après le plan factoriel à plusieurs niveaux.

Le plan d'essai pour l'algorithme RLS comprend 3 facteurs : longueur de filtre, retard de signal de l'entrée et facteur d'oubli. Les valeurs de niveau des facteurs sont présentées dans le Tableau 3.1. Les niveaux maximaux et minimaux des facteurs ont été déterminés avec les essais préliminaires.

D'après le plan, 18 combinaisons de paramètres de l'algorithme RLS ont été essayées pour le traitement de fichier enregistré pendant les essais avec le bruit de circulation et le bruit de frottement.

Tableau 3.1 Valeurs de niveaux de facteurs d'essais et les valeurs optimisées de filtre RLS

Facteur	Nombre de niveaux	Valeurs de niveaux			Valeurs optimisées	Désirabilité
Longueur de filtre (comptes)	3	10	15	20	10	0,82
Retard de signal de l'entrée $d(n)$ (comptes)	3	10	15	20	10	
Facteur d'oubli	2	0,95	0,99	-	0,99	

Les résultats des essais ont été traités avec le logiciel Minitab 19 avec la fonction d'optimisation de réponses. L'optimisation de réponse a pour l'objectif de minimiser le délai de réponse, maximiser le rapport signal-bruit et avoir un nombre de signaux d'ÉA détectables égal à 10. La désirabilité détermine dans quelle mesure une combinaison de variables satisfait aux objectifs définis pour les réponses. La désirabilité est comprise entre zéro et un. Un représente le cas idéal ; zéro indique qu'une ou plusieurs réponses se situent en dehors des limites acceptables. Les résultats d'optimisation sont présentés dans le Tableau 3.1.

Le plan pour l'algorithme LMS comprend 2 facteurs : taille de pas de filtre et retard de signal de l'entrée $d(n)$. Les valeurs de niveau de facteurs sont présentées dans le Tableau 3.2.

D'après le plan, 25 combinaisons de paramètres de l'algorithme LMS ont été essayées pour le traitement de fichier enregistré pendant les essais avec le bruit de circulation et le bruit de frottement. L'optimisation des paramètres a été effectuée également avec le logiciel Minitab avec les mêmes valeurs de réponses désirées. Les résultats d'optimisation sont présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Valeurs de niveaux de facteurs d'essais et les valeurs optimisées de l'algorithme LMS

Facteur	Nombre de niveaux	Valeurs de niveaux					Valeurs optimisées	Désirabilité
Taille de pas de filtre	5	0,0001	0,0005	0,001	0,005	0,009	0,009	0,88
Retard de signal de l'entrée $d(n)$ (comptes)	5	5	10	15	20	25	7	

Les résultats d'application des filtres adaptatifs avec les paramètres optimisés sont présentés dans la Figure 3.7 sous forme d'un graphique pour chaque technique de filtrage et de quatre caractéristiques d'efficacité : délai de réponse, nombre des signaux détectables parmi 10 signaux générés dans l'échantillon et rapport signal-bruit maximal et minimal. L'oscillogramme du signal de sortie (rouge) est superposé sur l'oscillogramme du signal d'entrée (bleu), les lignes vertes indiquent le niveau de seuil de détection et les flèches vertes montrent les signaux détectés.

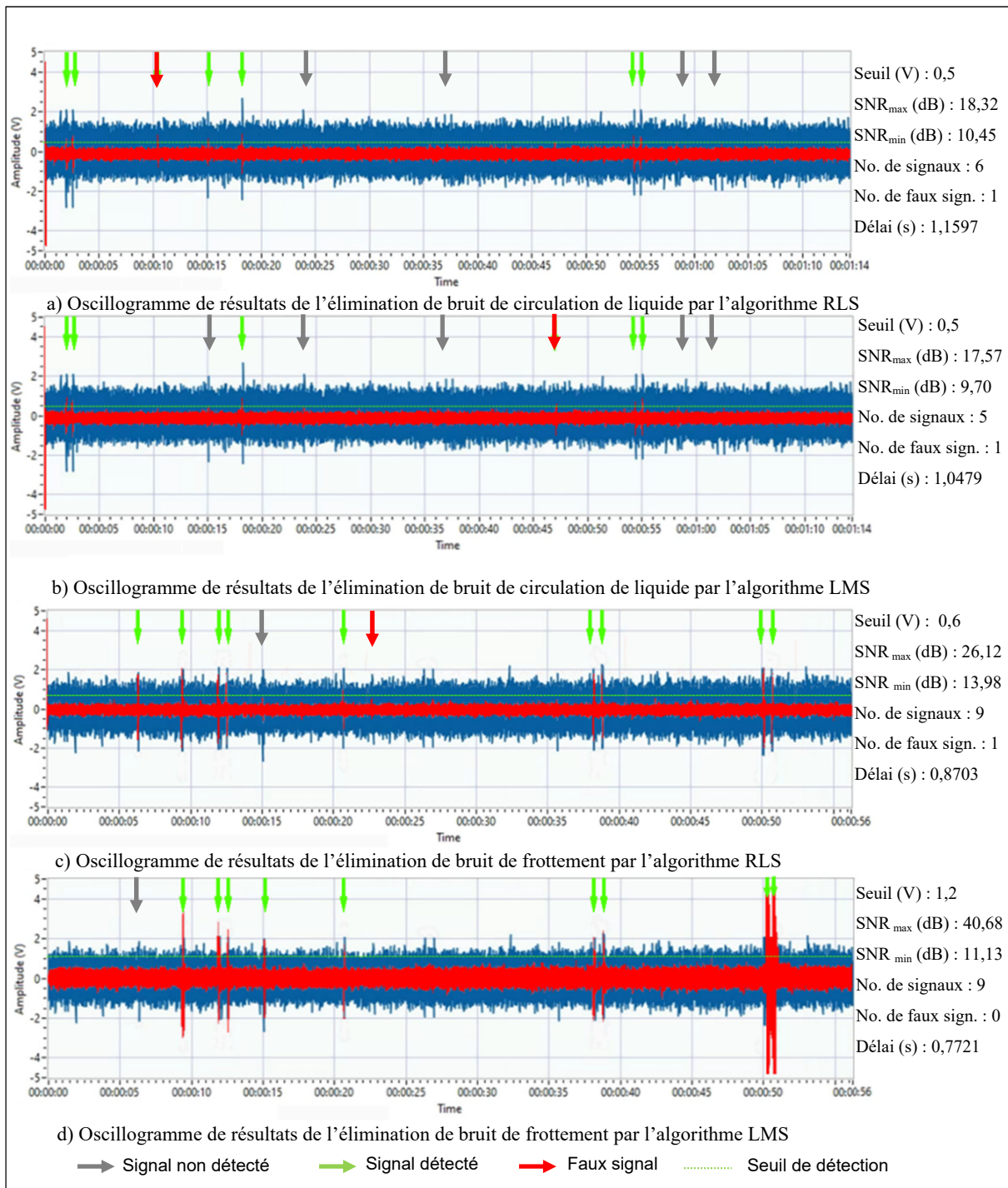


Figure 3.7 Résultats d'application des filtres adaptatifs

3.3.2 Filtre variant dans le temps (TVF)

Pour trouver la combinaison optimale des paramètres de filtres, on a fait plusieurs essais de filtrage d'après le plan factoriel à plusieurs niveaux. Le plan comprend 3 facteurs : nombre de barres de fréquences N , taille de pas de temps dM , longueur de fenêtre L . Les valeurs de niveau de facteurs sont présentées dans le Tableau 3.3. Les niveaux maximaux et minimaux des facteurs ont été déterminés avec les essais préliminaires.

D'après le plan, 63 combinaisons de paramètres de filtre TVF ont été essayées pour le traitement de fichier enregistré pendant les essais avec le bruit de circulation et le bruit de frottement.

Tableau 3.3 Valeurs de niveaux de facteurs d'essais de filtre TVF

Facteur	Nombre de niveaux	Valeurs de niveaux			Valeurs optimisées	Désirabilité
N	3	32	64	128	94,61	0,99
dM	3	32	64	128	32,02	
L	3	128	256	512	512	
S	3	0,7	0,9	1,0	0,7	

Les résultats des essais ont été traités avec le logiciel Minitab avec la fonction d'optimisation des réponses. L'optimisation de réponse a pour l'objectif de minimiser le délai de réponse, maximiser le rapport signal-bruit et avoir un nombre de signaux d'ÉA détectables égal à 10.

Les résultats d'optimisation sont présentés dans le Tableau 3.3. Car N et dM doivent être une puissance de deux il a été ajouté la combinaison choisie pour l'utiliser dans la filtration de données. Les paramètres choisis de filtrage sont présentés dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 Paramètres de transformation de Gabor de filtre TVF

Nom de paramètre	Valeur de paramètre
Type de fenêtre	Gaussienne
Nombre de barres de fréquences N	128
Pas de temps dM	32
Longueur de fenêtre L	512
Seuil des coefficients S	0,7

Les résultats d'application de filtre TVF avec les paramètres optimisés sont présentés dans la Figure 3.8 sous forme d'un graphique de quatre caractéristiques d'efficacité : délai de réponse, nombre des signaux détectables parmi 10 signaux générés dans l'échantillon et rapport signal-bruit maximal et minimal. L'oscillogramme du signal de sortie (rouge) est superposé sur l'oscillogramme du signal d'entrée (bleu), les lignes vertes indiquent le niveau de seuil de détection et les flèches vertes montrent les signaux détectés.

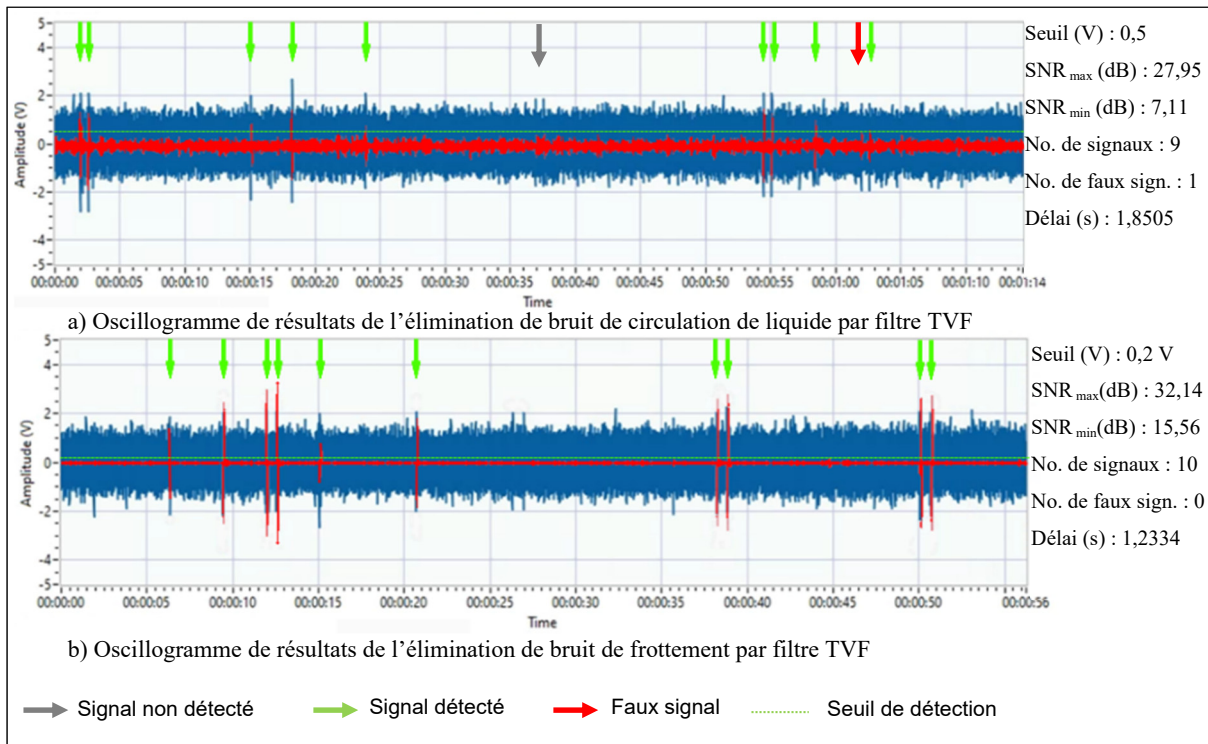


Figure 3.8 Résultats d'application de filtre TVF

3.3.3 Filtrage par seuillage des coefficients d'ondelettes

En se référant aux travaux de Barat, Borodin, & Kuzmin (2010), on a choisi la règle de seuillage SURE (Stein's unbiased risk estimation) comme la règle optimale pour le filtrage des signaux d'ÉA dans les conditions industrielles.

Dans ses recherches Izmaylova (2013) a trouvé que parmi les 40 types disponibles dans la Bibliothèque Traitement avancé de signaux de LabVIEW les types d'ondelettes Haar, Maxican Hat et Morlet sont optimales pour les signaux d'ÉA contaminé par le bruit de circulation du liquide et de fonctionnement d'une pompe. Rao & Subramanyam (2008) ont utilisé avec succès les ondelettes Coiflet 3, Biorthogonal 3.9, Symplets 8 et Haar pour les signaux contaminés par les mêmes types de bruit. Ainsi, on a choisi le type d'ondelette Haar comme le type optimal pour les signaux d'ÉA.

L'instrument de filtrage « WA Denoise » de Bibliothèque Traitement avancé de signaux de LabVIEW utilise la variance de bruit pour redimensionner le seuil. On a choisi la méthode de redimensionnement de niveau multiple, car on considère que le bruit de fond ne doit pas être nécessairement blanc et cet instrument estime l'écart-type du bruit à chaque niveau indépendamment.

Les résultats d'application de filtre avec les paramètres mentionnés sont présentés dans la Figure 3.9 sous forme d'un graphique de quatre caractéristiques d'efficacité : délai de réponse, nombre des signaux détectables parmi 10 signaux générés dans l'échantillon et rapport signal-bruit maximal et minimal. L'oscillogramme du signal de sortie (rouge) est superposé sur l'oscillogramme du signal d'entrée (bleu), les lignes vertes indiquent le niveau de seuil de détection et les flèches vertes montrent les signaux détectés.

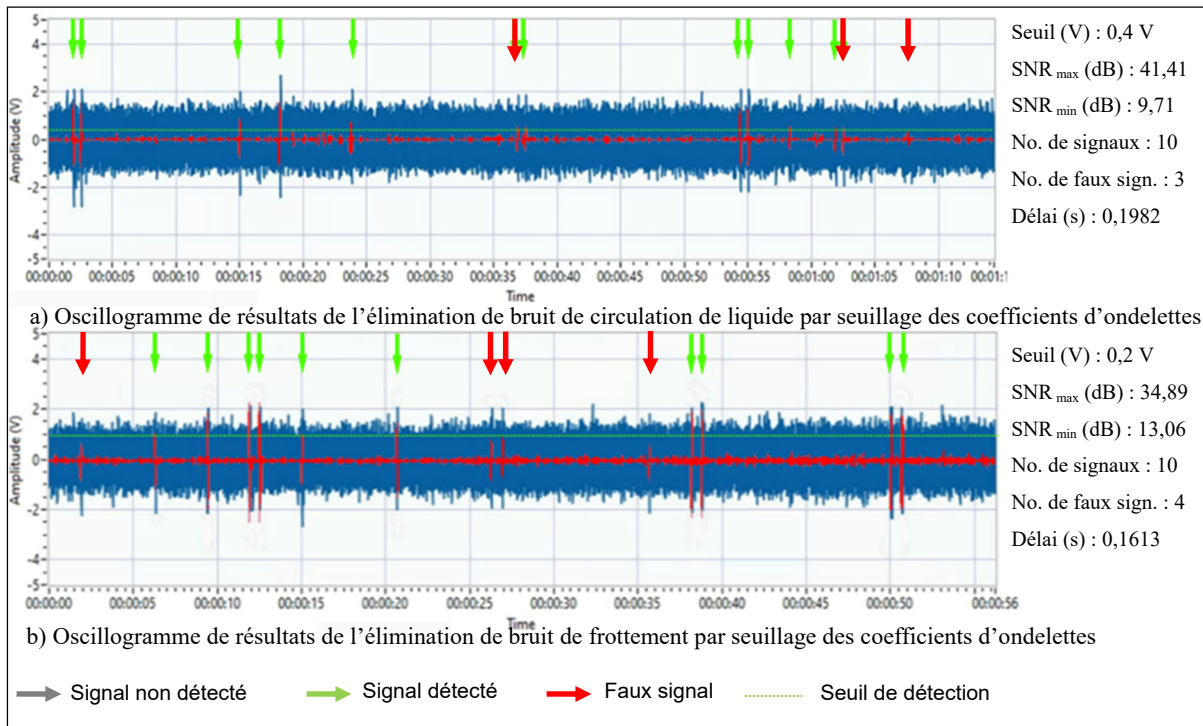


Figure 3.9 Résultat d'élimination de bruit par seuillage des coefficients d'ondelettes

3.4 Discussion

Pour toutes les quatre techniques de filtrage de signaux d'ÉA contaminés par les bruits de deux types de source, on a trouvé les paramètres optimaux pour les conditions de travaux expérimentaux. L'efficacité des techniques de filtrage a été évaluée par le délai de réponse, le nombre des signaux détectés et des faux signaux, et le rapport signal-bruit minimal.

Afin de comparer l'efficacité des différentes techniques, on évalue d'abord la rapidité de filtrage. La rapidité de filtrage est le temps (ms) de traitement d'un second de signal par le logiciel. Les techniques qui nécessitent beaucoup de temps et de ressources ne seront pas efficaces pour traiter de longs fichiers enregistrés lors d'un monitoring continu. On évalue ensuite la capacité de détection des signaux d'ÉA. Le pourcentage des signaux détectés (parmi tous les signaux générés) définit cette capacité. Aussi, on évalue la proportion de faux signaux parmi les signaux en sortie des filtres.

Finalement, les valeurs moyennes des paramètres d'efficacité de chaque technique ont été calculées. Les données consolidées d'efficacité de filtrage sont présentées dans le Tableau 3.5.

Les techniques de filtrage des signaux étudiées peuvent augmenter notablement le rapport signal-bruit et rendre possible tout traitement ultérieur de données par les techniques conventionnelles. On peut évaluer les paramètres de base de l'ÉA tels que nombre de salves (hits), activité d'ÉA et amplitudes de signaux, tout en maintenant les rapports des amplitudes et les valeurs des temps d'arrivée de signaux. On peut aussi localiser des sources d'ÉA par zones et par la différence de temps d'arrivée. Cependant, tout traitement ultérieur demandera l'amplification et le seuillage de ces signaux.

Tableau 3.5 Efficacité de filtrage pour quatre techniques

Technique de filtrage	Rapidité (ms/s)	Capacité de détection (%)	Proportion de faux signaux (%)	Rapport signal - bruit minimal, (dB)
RLS	15,438	80	10	12,22
LMS	32,601	75	5	10,42
TVF	23,380	95	5	11,34
Seuillage des coefficients d'ondelettes	2,763	100	26	11,39

Malgré une valeur assez élevée de rapport signal-bruit pour les filtres adaptatifs, la distorsion de signal ne permet pas de détecter 100 % des signaux générés. Ensuite, au début de traitement et au moment de stabilisation des filtres, il est possible d'avoir un faux signal d'une grande amplitude et perdre un vrai signal. Aussi, il existe la probabilité d'avoir des faux signaux après la stabilisation de filtres. Les filtres adaptatifs peuvent avoir un niveau de rapidité trop bas. Ce désavantage peut être lié avec l'algorithme de filtres adaptatifs : la structure de boucle traite le signal point par point avec l'ajustement de coefficients à chaque cycle. Ainsi, le traitement de données brutes de monitoring continu avec un système multivoie peut exiger beaucoup de ressources et de temps.

Selon les résultats obtenus, le filtrage par les techniques de domaine temps-fréquence tels que TVF et par seuillage des coefficients d'ondelettes est plus efficace que le filtrage par filtres

adaptatifs qui analysent seulement l'évolution d'amplitude du signal dans le temps. Les valeurs de capacité de détection et du rapport signal-bruit obtenus en utilisant cette technique permettent d'utiliser les données traitées pour un traitement ultérieur avec plus de certitude. La capacité de produire de faux signaux est relativement basse. Cependant, le niveau de rapidité de filtrage est plus ou moins égal à celui de filtrage par filtres adaptatifs. Ainsi, le traitement de fichier long peut être trop lent et peut exiger beaucoup de ressources.

Le niveau de rapidité de filtrage par seuillage des coefficients d'ondelettes est au moins cinq fois plus élevé que celui des autres techniques, ce qui rend plus facile le traitement de grandes quantités de données. Le rapport signal-bruit minimal est aussi plus élevé que celui obtenu par certaines autres techniques, ce qui augmente la qualité de traitement conventionnelle de données. Pourtant, la probabilité élevée d'apparition de faux signaux avec une durée et une amplitude semblable aux ceux de vrais signaux (Figures 3.5) demande un seuillage plus attentionné afin d'éviter la distorsion des résultats.

Selon ce qu'on a mentionné plus haut, parmi les techniques étudiées, celle de filtrage par seuillage des coefficients d'ondelettes est la plus efficace pour le traitement de signaux d'ÉA contaminés par le bruit de circulation de liquide ou par le bruit de frottement de disque abrasif dans les conditions des travaux expérimentaux. Les performances observées et l'aptitude de cette technique au filtrage des signaux d'ÉA sont déterminés par son algorithme. La décomposition en ondelettes permet d'analyser l'évolution des signaux dans le domaine temps-fréquence. Le seuillage des coefficients d'ondelettes repose sur l'hypothèse que le bruit indésirable sera séparé du signal souhaité par leurs gammes de fréquences. Normalement, lors de l'inspection d'équipements industriels, les composants du signal EA sont situés à des fréquences supérieures aux bruits hydrauliques et mécaniques et les signaux provenant de défauts de type fissure sont de courte durée. Cependant, comme indiqué précédemment, le bruit mécanique peut avoir une large gamme de fréquences et peut chevaucher des signaux utiles. Ainsi, de courtes rafales de bruit similaires en durée et en réponse en fréquence aux signaux AE ont été faussement détectées en tant que signaux AE.

CONCLUSION

L'utilisation de méthode de contrôle par l'ÉA pour inspecter les équipements en service est souvent limitée par la présence des bruits de ces équipements ou tout autre équipement à la proximité. Les techniques standards de traitement de données ne permettent pas souvent de réaliser le contrôle dans ces conditions.

Au cours de réalisation de projet, on a étudié le développement de méthode de contrôle par l'ÉA. Lors de ces études, on a essayé de connaître les origines physiques de signaux d'ÉA, les équipements et les principes de contrôle et le traitement de données de base. Ensuite, on a étudié les résultats des recherches antérieurs qui avaient pour but d'avancer les techniques de traitement de signaux et d'améliorer la qualité de contrôle dans les conditions de présence de bruit. On a passé en revue les résultats de six recherches antérieures dans le premier chapitre. Seulement les techniques qui ont été approuvés dans les conditions industrielles ou qui ont la possibilité d'être utilisées dans ces conditions ont été choisies.

L'installation expérimentale avait pour but de reproduire les conditions industrielles de contrôle dans lesquelles les dimensions des échantillons sont semblables aux dimensions des objets réels et où les bruits de fond naturels sont présents. Aussi, il était important d'avoir une source de signaux d'ÉA stable et contrôlable pour pouvoir reproduire les signaux plusieurs fois. Le bon choix des équipements a permis d'avoir le signal brut provenant de capteur, d'amplifier ce signal par un préamplificateur et d'éviter le seuillage et le traitement de données par les systèmes d'ÉA commerciaux. Un logiciel avec une interface conviviale a été créé, afin de réaliser l'acquisition de données, faire le suivi des essais, faire une analyse préliminaire et sauvegarder les données.

Le développement de logiciel de traitement de données a permis d'étudier la possibilité de l'utilisation des quatre techniques de filtrage. Ces techniques incluent un filtre adaptatif à réponse impulsionnelle finie (FIR) avec l'algorithme des moindres carrés récursifs (RLS) et algorithmes des moindres carrés moyens (LMS), un filtre variant dans le temps (TVF) basé sur la transformation de Gabor et un filtre par le seuillage des coefficients d'ondelettes.

Après avoir évalué les techniques de filtrage et comparé leur niveau d'efficacité, seulement la technique par seuillage des coefficients d'ondelettes a été trouvée utile pour les conditions de monitoring continu. Alors que le rapport signal-bruit et la capacité de détection de signaux sont semblables dans toutes les techniques étudiées, le délai de réponse peut être critique pour le traitement des grandes quantités de données. Ainsi, le filtrage par seuillage des coefficients d'ondelettes a un niveau de la rapidité de filtrage au moins 5,5 fois plus élevé que les autres techniques.

Selon les résultats obtenus, les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- La modélisation des conditions de contrôle reste relativement simple et comprend le bruit de circulation de liquide et de frottement. Il pourrait donc être intéressant de créer les bruits plus proches de la réalité et les bruits avec les paramètres qui sont mieux contrôlés. Nous pouvons enregistrer le bruit qui se propage dans l'équipement au milieu industriel et l'ajouter aux signaux d'ÉA enregistré dans le laboratoire ;
- Pour évaluer l'efficacité des techniques de filtrage, ce sera utile d'avoir une source de signaux d'ÉA contrôlable par un logiciel afin de pouvoir évaluer l'efficacité de traitement par la corrélation entre les signaux de sortie de filtre et les signaux de source. À cette fin, nous pouvons utiliser un palpeur piézoélectrique et convertisseur numérique-analogique avec les paramètres requis ;
- Nous avons optimisé les paramètres de filtres afin de produire la capacité maximale de détection dans les conditions courantes de travaux expérimentaux. Il serait donc intéressant d'étudier le lien entre l'efficacité des techniques et les valeurs de paramètres de filtres ;
- De l'autre côté, l'utilisation du simulateur de source d'ÉA éloigne toujours les travaux expérimentaux des conditions réelles. Ainsi, les essais avec les signaux provenant de vraies sources d'ÉA, telle que la fissure croissante, peuvent avoir des résultats plus importants pour une intégration future des techniques de traitement de signaux ;

- La possibilité d'intégration de ces techniques peut aussi être évaluée par l'utilisation d'un système d'ÉA commercial. Cependant, le défi qui se présente consiste à développer des techniques de filtrage de données multicanal avec une distorsion minimale et avec la possibilité de traitement ultérieur des données par les logiciels de systèmes commerciaux.

BIBLIOGRAPHIE

- Agletdinov, E., Merson, D., & Vinogradov, A. (2019). *A New Method of Low Amplitude Signal Detection and Its Application in Acoustic Emission*. Applied Sciences, 10(1), 73.
- American Society of Mechanical Engineers (2019). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V*. New York, NY: Two Park Avenue.
- American Society for Testing and Materials (2020). *Standard Terminology for Nondestructive Examinations*. Norme ASTM E1316. Repéré à <https://www.astm.org/Standards/E1316.htm>
- Barat, V. A., Chernov, D. V., & Elizarov, S. V. (2016). *Discovering data flow discords for enhancing noise immunity of acoustic-emission testing*. Russian Journal of Nondestructive Testing, 52(6), 347- 356.
- Barat, V, Grishin, D., & Rostovtsev, M. (2011). *Detection of AE signals against background friction noise*. Journal of acoustic emission, 133- 141.
- Barat, V, Borodin, Y., & Kuzmin, A. (2010). *Intelligent AE Signal Filtering Methods*. Journal of Acoustic Emission, (28), 109- 119.
- Beattie, A. (2013). *Acoustic emission non-destructive testing of structures using source location techniques*. (Rapport de recherche. SAND2013-7779, 1096442). Albuquerque, New Mexico et Livermore, California : Sandia National Laboratories.
- Builo, S. (2017). *Physico-mecanical, statistical and chemical aspects of acoustic-emission diagnostics*. Rostov-on-Don, Russia : South Federal University.
- Chen, G., Luo, H., Yang, H., Han, Z., Lin, Z., Zhang, Z., & Su, Y. (2019). *Effects of the welding inclusion and notch on the fracture behaviors of low-alloy steel*. Journal of Materials Research and Technology, 8(1), 447- 456.

- Chernov, D. (2018). *Development of diagnostic methods for fatigue cracks using the acoustic emission method*. National Research University «Moscow Power Engineering Institute », Moscow, Russia.
- Diniz, P. S. R. (2008). *Adaptive Filtering*. Boston, MA : Springer US.
- Dunegan, H., & Harris, D. (1969). *Acoustic emission-a new non-destructive testing tool*. Ultrasonics, 7(3), 160- 166.
- Elizarov, S., Barat, V., & Shimansky, A. (2014). *Nonthreshold Acoustic Emission Data Registration Principles* (p. 8). Communication présentée au 31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission, Dresden, Germany.
- Emamian, V., Kaveh, M., Tewfik, A. H., Shi, Z., Jacobs, L. J., & Jarzynski, J. (2003). *Robust Clustering of Acoustic Emission Signals Using Neural Networks and Signal Subspace Projections*. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2003(3), 248703.
- Gazprom JSC. (2007). *Standard Practice Instructions for comprehensive examination and diagnostics of gas pipelines subject to stress corrosion cracking*. Norme STO Gazprom 2-2.3-173-2007. Moscow, Russia: Gazprom VNIIGAZ.
- Grosse, C. U., & Reinhardt, H. W. (2002). *Signal Conditioning in Acoustic Emission Analysis using Wavelet*. Repéré à <https://www.ndt.net/article/v07n09/08/08.htm>.
- Han, Z., Luo, H., & Wang, H. (2011). *Effects of strain rate and notch on acoustic emission during the tensile deformation of a discontinuous yielding material*. Materials Science and Engineering: A, 528(13- 14), 4372- 4380.
- Hertzberg, R. W., Vinci, R. P., & Hertzberg, J. L. (2013). *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials (Fifth)*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Ivanov, V. & Barat, V. (2017). *Acoustic emission diagnostic*. Moscow, Russia : Spektr.
- Ivanov, V., Bigus, G., & Vlasov, I. (2015). *Acoustic emission (Second)*. Moscow, Russia : Spektr.

- Izmaylova, E. (2013). *Information-measuring system and method of pipeline control based on wavelet filtering of acoustic emission signals*. Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
- Katkovnik, V., Egiazarian, K., & Astola, J. (2002). *Adaptive Window Size Image Denoising Based on Intersection of Confidence Intervals (ICI) Rule*, Journal of Mathematical Imaging and Vision, 16, 223-235.
- Kaphle, M., Tan, A. C. C., Thambiratnam, D. P., & Chan, T. H. T. (2012). *Identification of acoustic emission wave modes for accurate source location in plate-like structures*. Structural Control and Health Monitoring, 19(2), 187- 198.
- Kougioumtzoglou, I., Hernandez-Fajardo, I., Evangelatos, G. & Ming, X., (2009). *Signal Denoising using Wavelet-based Methods*. ELEC 301 Projects Fall 2008. Houston, Texas: Connexions.
- Moore, P., Miller, R., & Hill, E. (2005). *Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 6, Acoustic Emission Testing*. Columbus, OH: ASNT.
- Nazarchuk, Z., Skalskyi, V., & Serhiyenko, O. (2017). *Acoustic Emission: Methodology and Application*. Cham, Switzerland : Springer International Publishing.
- Oropeza, V. E. (2010). *The Singular Spectrum Analysis method and its application to seismic data denoising and reconstruction*. University of Alberta, Edmonton, Alberta.
- Pinal Moctezuma, F., Delgado Prieto, M., & Romeral Martinez, L. (2019). *Performance analysis of acoustic emission hit detection methods using time features*. IEEE Access, 7, 71119- 71130.
- Pollock, A. (2018). Acoustic Emission Inspection. Dans L. J. Bond (Éd.), *ASM Handbook, Volume 17, Nondestructive Evaluation of Materials* (pp. 360-379). Russell, OH : ASM International.
- Prajna, K., & Mukhopadhyay, C. K. (2019). *Efficient harmonic regeneration noise reduction-based Wiener filter for acoustic emission signal detection*. Electronics Letters, 55(22), 1163- 1165.

- Rao, S., & Subramanyam, B. (2008). *Analysis of Acoustic Emission Signals using Wavelet Transformation Technique*. Defence Science Journal, 58(4), 559-564.
- Sause, M. G. R., Gribov, A., Unwin, A. R., & Horn, S. (2012). *Pattern recognition approach to identify natural clusters of acoustic emission signals*. Pattern Recognition Letters, 33(1), 17- 23.
- Sejdić, E., Djurović, I., & Jiang, J. (2009). *Time–frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances*. Digital Signal Processing, 19(1), 153-183.
- Stachel, P., Schegner, P., & Zivanovic, Ratko. (2008). *Enhanced segmentation of disturbance records by adaptive thresholding*. Repéré à <https://www.researchgate.net/publication/291313699>
- The Japanese Society for Non-Destructive Inspection (Éd.). (2016). *Practical Acoustic Emission Testing*. Tokyo : Springer Japan.
- Weathers, D. E., Nichols, C. T., Waller, J. M., & Regor L Saulsberry. (2010). *Automated Determination of Felicity Ratio for Composite Overwrapped Pressure Vessels*. (Rapport technique). Repéré à <https://www.researchgate.net/publication/275213401>
- Weaver, R. L. (2001). *Theoretical modeling of acoustic emission wave propagation in flat infinite plate: Study of inversive problem*. Princeton, NJ : Physical Acoustic Corporation.
- Wijaya, I. G. P. S., & Kencanawati, N. N. (2014). *Denoising Acoustic Emission Signal using Wavelet Transforms for Determining the Micro Crack Location Inside of Concrete*. International Journal of Technology, 5(3), 259.
- Xiang, D. (2017). *Acoustic emission detection of early stages of cracks in rotating gearbox components* (p. 07-010). Communication présentée au 43rd Annual Review of progress in quantitative non-destructive evaluation, volume 36, Atlanta, Georgia, USA.

- Yuyama, S. (1986). *Fundamental aspects of acoustic emission application for problem caused by corrosion*. Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Non-Destructive Testing and Electrochemical Methods, 31(1), 43- 74.
- Zhukov, A. (2015). *Increasing the accuracy of determining the coordinates of AE sources in the control of gas pipeline*. V mire NK, 18(3), 24- 26.