



HAL
open science

Émission acoustique et analyse vibratoire pour l'étude des défauts de roulements pour différents régimes moteurs

Christophe Migeon

► **To cite this version:**

Christophe Migeon. Émission acoustique et analyse vibratoire pour l'étude des défauts de roulements pour différents régimes moteurs. Mécanique [physics.med-ph]. 2011. dumas-01157531

HAL Id: dumas-01157531

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01157531>

Submitted on 28 May 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR

spécialité :

MECANIQUE option Mécanique des structures et des systèmes

par

Christophe MIGEON

Emission acoustique et analyse vibratoire pour l'étude des défauts de roulements pour différents régimes moteurs

Le 22 juin 2011

JURY

Président

Roger Ohayon - Professeur titulaire de la chaire Mécanique des structures et des systèmes - Conservatoire National des Arts et Métiers.

Membres

Jean-Paul Dron - Professeur des Universités - Université de Reims Champagne-Ardenne,

Fabrice Bolaers - Maître de Conférences - Université de Reims Champagne-Ardenne,

Xavier Chiementin - Maître de Conférences - Université de Reims Champagne-Ardenne,

Vincent Meunier - Ingénieur - Altéad Industries Est - Reims (51),

Philippe Vervoort - Ingénieur - Brüel & Kjaer Vibro - Mennecey 91).

Cham

CONSERVATOIRE NATIONAL
DES ARTS ET METIERS

CENTRE RÉGIONAL
CHAMPAGNE-ARDENNE

Remerciements

Je tiens à remercier les membres du jury, Mr Roger OHAYON, Professeur titulaire de la chaire Mécanique des structures et des systèmes au CNAM, Mr Jean-Paul DRON, Professeur des Universités de Reims Champagne-Ardenne, Mr Fabrice BOLAERS, Maître de Conférences à l'URCA et HDR, Mr Xavier CHIEMENTIN, Maître de Conférences à l'URCA, Mr Vincent MEUNIER, Altéad Industries Est et Mr Philippe VERVOORT, Brüel & Kjaer Vibro.

Je remercie Mr Xavier CHIEMENTIN et Mr Jean-Paul DRON pour m'avoir encadré durant ce mémoire et m'avoir fait découvrir, par le biais de l'expérimentation, l'analyse et le diagnostic sur machines tournantes.

Je souhaite remercier tout particulièrement Samuel CREQUY, Ingénieur d'Etudes, pour m'avoir formé sur le système d'acquisition en vibration ainsi que sur le banc d'essais.

Je tiens également à remercier l'ensemble des Professeurs et Maîtres de Conférences du GRESPI (Groupe de Recherche en Sciences Pour l'Ingénieur) de Reims Champagne-Ardenne pour m'avoir soutenu et accueilli au sein du laboratoire MAN (Mécanique Appliquée et Numérique).

Je voudrais également remercier deux intervenants extérieurs.

Le premier, Mr Alain PROUST, Directeur de la branche contrôle EA (Emission Acoustique) dans les matériaux à l'entreprise MISTRAS du groupe Euro Physical Acoustics à Sucy en brie (94). Son aide a été importante, il m'a permis de mieux appréhender l'expérimentation avec l'émission acoustique tout en me conseillant sur les différents paramétrages possibles du système d'acquisition.

Le second intervenant est le Professeur Mr David MBA, Professeur en technologie des machines tournantes, au sein du Département de puissance et propulsion à l'Université de Cranfield (UK) pour m'avoir accueilli durant deux semaines et m'avoir permis de réaliser des expérimentations dans son laboratoire. Il est un des spécialistes européens en émission acoustique. Nos échanges ont été très enrichissants et ce séjour en Angleterre m'a permis d'approfondir mon anglais.

Et pour finir, je tiens à remercier ma famille pour leurs soutiens et encouragements tout au long de cette formation.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	2
INTRODUCTION GENERALE	6
1. PRESENTATION DE L'EMISSION ACOUSTIQUE ET DE L'ANALYSE VIBRATOIRE	9
1.1. INTRODUCTION	9
1.2. PRÉSENTATION DE L'EMISSION ACOUSTIQUE	10
1.2.1. <i>Principe</i>	10
1.2.1.1. <i>Deux types de signaux d'émission acoustique</i>	11
1.2.1.2. <i>Caractéristiques d'une salve</i>	12
1.2.1.3. <i>Propriété d'irréversibilité</i>	13
1.2.1.4. <i>Ondes élastiques</i>	14
1.2.2. <i>Acquisition du signal</i>	18
1.2.2.1. <i>Chaîne d'acquisition</i>	18
1.2.2.2. <i>Paramètres de réglage du système d'acquisition</i>	19
1.2.2.3. <i>Le capteur piézoélectrique acoustique</i>	21
1.2.3. <i>Traitement du signal</i>	22
1.2.3.1. <i>Méthode temporelle ou mesure du niveau global</i>	22
1.2.3.2. <i>Méthodes fréquentielles</i>	24
1.2.3.3. <i>Autres méthodes pour le traitement du signal</i>	24
1.2.4. <i>Localisation</i>	25
1.3. PRÉSENTATION DE L'ANALYSE VIBRATOIRE	27
1.3.1. <i>Principe</i>	27
1.3.2. <i>Acquisition du signal</i>	28
1.3.2.1. <i>Chaîne d'acquisition</i>	28
1.3.2.2. <i>Le capteur accéléromètre piézoélectrique</i>	29
1.3.3. <i>Traitement du signal</i>	31
1.3.4. <i>Localisation</i>	31
1.4. CONCLUSION	32
2. ANALYSE DES SIGNAUX ISSUS D'UNE BUTEE A BILLES.....	35
2.1. INTRODUCTION	35
2.1.1. <i>Intérêts</i>	35
2.1.2. <i>Protocole de mesure</i>	35
2.2. PRESENTATION DU BANC AINSI QUE DE LA BUTEE A BILLES	40
2.2.1. <i>Présentation du banc</i>	40
2.2.2. <i>Présentation de la butée à billes avec les fréquences caractéristiques.</i>	41

2.3.	INSTRUMENTATION.....	44
2.3.1.	<i>Emission acoustique</i>	44
2.3.2.	<i>Analyse vibratoire</i>	44
2.4.	ANALYSE TEMPORELLE DU BANC DE FATIGUE EN VIBRATION.....	45
2.5.	ANALYSE TEMPORELLE DU BANC DE FATIGUE EN EMISSION ACOUSTIQUE.....	47
2.6.	ETUDE À 3 TR/MIN.....	49
2.6.1.	<i>Emission acoustique</i>	49
2.6.2.	<i>Analyse vibratoire</i>	51
2.6.3.	<i>Résultats</i>	52
2.7.	ETUDE À 2000 TR/MIN.....	53
2.7.1.	<i>Emission acoustique</i>	54
2.7.2.	<i>Analyse vibratoire</i>	55
2.7.3.	<i>Résultats</i>	56
2.8.	CONCLUSION.....	59

3. CONDITIONING MONITORING VUE PAR L'UNIVERSITE DE CRANFIELD61

3.1.	INTRODUCTION.....	61
3.1.1.	<i>Intérêts</i>	61
3.1.2.	<i>Protocole de mesure</i>	61
3.2.	PRESENTATION DU BANC AINSI QUE DES ROULEMENTS.....	65
3.2.1.	<i>Présentation du banc</i>	65
3.2.2.	<i>Présentation des roulements avec calculs des fréquences caractéristiques</i>	65
3.3.	INSTRUMENTATION.....	68
3.3.1.	<i>Emission acoustique</i>	68
3.3.2.	<i>Analyse vibratoire</i>	69
3.3.3.	<i>Horlroyd Instrument</i>	70
3.4.	RÉSULTATS.....	71
3.4.1.	<i>Méthode de l'émission acoustique</i>	71
3.4.2.	<i>Etude fréquentielle des signaux d'émission acoustique</i>	77
3.4.3.	<i>Etude temporelle des signaux d'émission acoustique (fws)</i>	78
3.4.4.	<i>Analyse vibratoire</i>	80
3.4.5.	<i>Horlroyd Instrument</i>	83
3.5.	PERSPECTIVE À UNE CLASSIFICATION.....	85
3.6.	CONCLUSION.....	96

CONCLUSION GÉNÉRALE 99

ANNEXE 1. EXERCICES LUDIQUES POUR UNE MEILLEURE COMPREHENSION..... 103

EXERCICE 1.....	103
EXERCICE 2.....	105

EXERCICE 3 - LOCALISATION	106
EXERCICE 4	108
ANNEXE 2. SIGNAUX EN ÉMISSION ACOUSTIQUE	114
ANNEXE 3. SIGNAUX EN ANALYSE VIBRATOIRE	119
ANNEXE 4. RAPPORT D'ESSAIS DE L'UNIVERSITE DE CRANFIELD (VERSION ANGLAISE).....	124
ANNEXE 5. COMPARATIF DES FACTEURS EN EMISSION ACOUSTIQUE (VERSION ANGLAISE).....	124
BIBLIOGRAPHIE	125
LISTE DES FIGURES.....	127
LISTE DES TABLEAUX	129
RESUME.....	130

Introduction générale

Aujourd'hui l'industrie exige, de plus en plus, une optimisation de la maintenance ce qui nécessite une politique très rigoureuse. Le choix du type de maintenance a des incidences sur le coût et la production.

Le choix d'une maintenance prédictive va permettre de réduire les probabilités de défaillance ou de limiter la dégradation du fonctionnement d'un bien. Le choix d'une maintenance corrective va impliquer d'exécuter des opérations correctives après la détection d'une défaillance, ainsi que l'arrêt de la production ce qui engendrera des coûts supplémentaires.

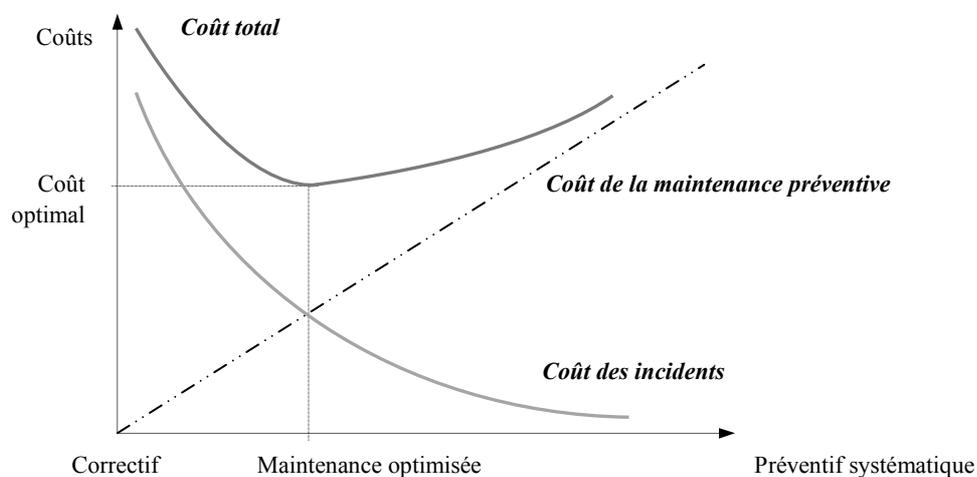


Figure 1 : Optimisation de la politique de maintenance

Le contrôle non destructif, que ce soit par l'analyse vibratoire ou par l'émission acoustique a le même but, détecter des défaillances par l'installation de différentes alarmes. Elles sont définies par l'utilisateur et doivent correspondre à des seuils auxquels des défauts sont détectés. Ces alarmes permettent de déterminer les éléments qui sont en cours de défaillance et qui doivent être contrôlés par le personnel de maintenance. Cela va rendre possible la planification des phases de maintenance, et porte aussi le nom de maintenance préventive (Figure 1) [MORE].

L'intérêt de l'émission acoustique est de définir l'état de santé des matériaux par l'étude des fissures ou des composants qui constituent la machine tournante (roulement à billes) pendant son fonctionnement. L'émission acoustique fait partie des méthodes de Contrôle Non Destructif (C.N.D.).

Aujourd'hui, la méthode la plus utilisée et la plus connue dans l'industrie est l'analyse vibratoire. Elle s'est développée avec l'émergence de l'informatique et avec l'amélioration des procédés de traitement du signal.

A ce jour, le GRESPI (Groupe de Recherche en Sciences pour l'Ingénieur) de Reims réalise l'ensemble de ses recherches sur l'analyse vibratoire sur machines tournantes et apporte un nouvel intérêt à l'analyse par émission acoustique.

Depuis 1 an, Mr Chiementin est en collaboration avec le Professeur D.Mba de l'Université de Cranfield (UK). Cette collaboration a permis de mieux appréhender l'étude des signaux en émission acoustique.

Le Professeur D.Mba a pour spécialité le suivi de l'état des machines, pronostic des machines et turbo-machines. Il est animateur d'une Organisation Internationale de Normalisation chargée d'élaborer les premières normes internationales à l'application de l'émission acoustique pour la surveillance de l'état des machines (ISO TC108 SC5 WG14). Il est actif au sein du British Standard Institut (BSI). Ce comité travaille sur la vibration et sur la surveillance de l'état des machines. Il est aussi membre du jury (Master Thesis Award) à l'E.F.N.M.S. (European Federation of National Maintenance Societies).

Pendant le mémoire, j'ai eu la chance de pouvoir réaliser un stage de 2 semaines en Février à l'Université de Cranfield. Cette courte période m'a permis de réaliser des mesures en émission acoustique ainsi qu'en vibration et de découvrir leurs méthodes d'analyses en émission acoustique. Ce stage m'a aussi permis de parfaire mes connaissances acquises lors des cinq premiers mois (*Figure 2*).

Le mémoire s'est déroulé en quatre phases :

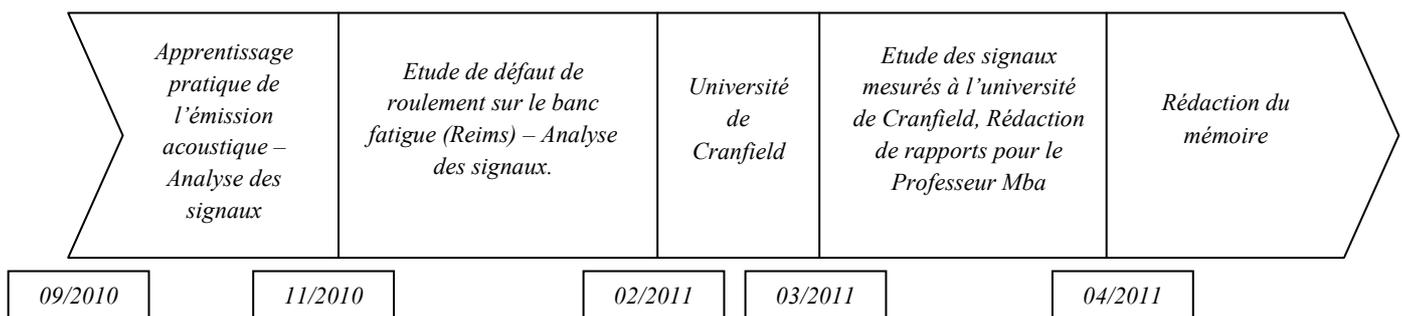


Figure 2 : Planification du mémoire

L'étude menée avait pour but de montrer la complémentarité entre les 2 méthodes qui sont l'analyse vibratoire et l'émission acoustique.

Le premier chapitre est dédié à la présentation et à la théorie de chacune des méthodes présentées ci-dessus. Chacune des méthodes est décomposée de la façon suivante : le principe, la chaîne d'acquisition avec l'instrumentation et le type de capteur, l'acquisition du signal d'origine et le traitement de celui-ci dans le but d'analyser les défauts.

Le second chapitre expose la mesure de défaut sur une butée à billes à l'aide des deux méthodes. Cette étude est réalisée à faible vitesse de rotation et à vitesse moyenne. Cette piste de recherche est orientée grâce à la théorie de l'émission acoustique. Cette étude a été réalisée à l'Université de Reims.

Le troisième chapitre présente l'étude réalisée à l'Université de Cranfield. Elle permet de comparer les deux méthodes à vitesses et charges variables, et ce, avec 3 types de roulement : défaut interne, défaut externe et sain.

Pour finir, un comparatif entre l'émission acoustique et l'analyse vibratoire est proposé en fonction de différents paramètres : charge, vitesse et type de défaut.

1. Présentation de l'émission acoustique et de l'analyse vibratoire

1.1. Introduction

De nombreuses ressemblances existent entre l'analyse vibratoire et l'émission acoustique. Leurs principes ne sont d'ailleurs pas si éloignés.

L'analyse vibratoire traduit les mouvements relatifs d'une structure soumise à une sollicitation dynamique. L'accélération est la grandeur la plus souvent mesurée, par une simple intégration (au sens mathématique du terme), elle donne accès à la vitesse puis au déplacement. La mesure de vibrations impose peu de contraintes au niveau de l'installation des capteurs : un ou plusieurs accéléromètres (de type piézoélectrique) placés à proximité de la source vibratoire mesurent les vibrations dans une ou plusieurs directions.

Quant à l'émission acoustique, elle est causée par des déformations à l'échelle microscopique : une sollicitation statique ou dynamique de la pièce fait naître des micro-déplacements internes au matériau (dislocations, maclage...) qui créent des ondes à hautes fréquences. L'atténuation rapide de ces ondes impose de placer le capteur au plus près de la source d'émission acoustique.

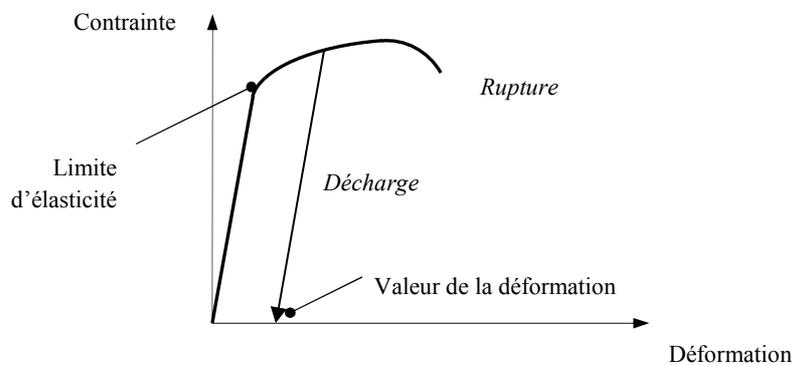


Figure 3 : Schéma d'une courbe de traction

L'analyse vibratoire, méthode de choix qui a fait ses preuves depuis longtemps déjà dans le milieu industriel, fournit une mine d'informations grâce à l'analyse temporelle et surtout fréquentielle des signaux. Depuis quelques années, quelques travaux [M. AL 06] [TAND 99] tendent à montrer une corrélation entre l'analyse vibratoire et l'émission acoustique dans le cadre de la détection de défauts sur roulement à billes. Cette méthode permet de détecter l'amorçage de défauts à caractère évolutif (fissures, phénomènes de corrosion, etc.) et de suivre leur progression. Elle ne peut donc être utilisée que lorsque la matière évolue, se déforme sous l'effet d'une contrainte extérieure (Figure 3).

1.2. Présentation de l'Emission Acoustique

1.2.1. Principe

Selon la norme NF A 09-350 de 1984, l'émission acoustique résulte d'un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau soumis à sollicitation [NORM 1]. Cette norme a été remplacée par la norme NF EN 1330-9 d'Avril 2000 [NORM 2] qui correspond aux essais non destructifs en émission acoustique. L'émission acoustique consiste à détecter des signaux à hautes fréquences (ultrasons) sur une gamme de 20 kHz à 10 MHz.

L'émission acoustique fait partie des méthodes de contrôle non destructif. Elle a un grand intérêt pour la maintenance conditionnelle car elle permet de planifier des phases de contrôle et de définir les interventions à l'aide de seuils, d'alarmes.

Les premiers travaux réalisés sur l'émission acoustique ont débuté dans les années 1950 par Kaiser. Les premières applications dans le domaine industriel datent des années 1970 avec le contrôle de réservoirs des fusées POLARIS et des contrôles d'équipements sous pression au niveau de la Marine Française quelques années après. Depuis 1980, la technique s'est améliorée et a permis de développer de nouvelles fonctions qui sont : le contrôle de l'état de santé de matériaux (corrosion, fissures), le contrôle de soudure, le contrôle de matériaux composites et la surveillance en service. [ROGE]

Cette technique s'améliore grâce à l'évolution de l'informatique et aux moyens de traitements de signaux et commence à se développer dans le contrôle de machines tournantes.

Comme résumé précédemment, L'Emission Acoustique (EA) découle d'une libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau ou d'un élément mécanique sous contrainte de tensions (*Figure 4*). L'EA permet de relever plusieurs phénomènes : la relaxation de contraintes dans les soudures, la propagation de fissures, la corrosion, les frottements (éléments tournants, les roulements), les fuites (de liquide ou de gaz).

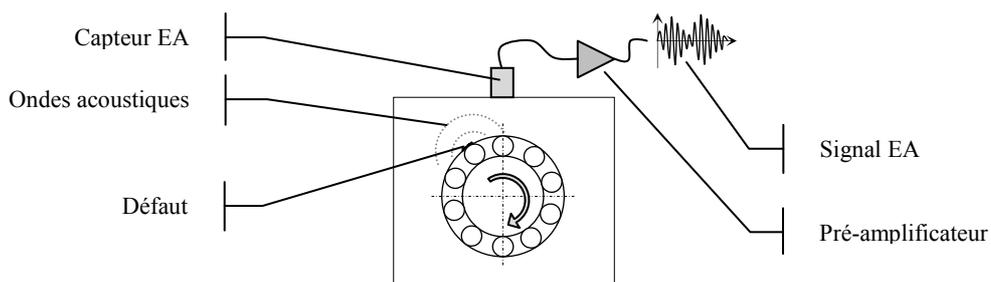


Figure 4 : Schéma de la chaîne d'émission acoustique, de la création de l'onde mécanique à la visualisation du signal EA

L'analyse par émission acoustique découle de l'analyse des ondes élastiques qui se propagent dans le matériau.

1.2.1.1. Deux types de signaux d'émission acoustique

On distingue deux types de signaux d'émission acoustique, l'émission continue et l'émission discrète par le biais d'évènements (salves). Ces deux types [WEB 02] sont la conséquence des paramètres d'acquisition et correspondent à un choix de l'opérateur.

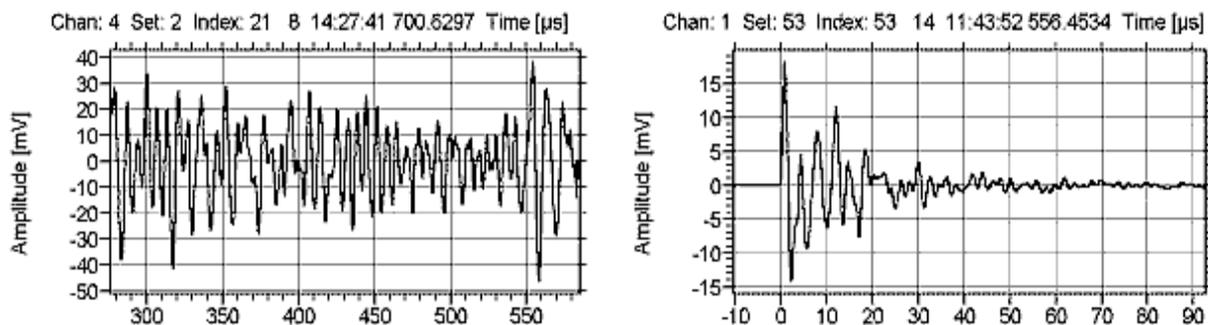


Figure 5a et 5b : Représentation d'une émission continue et d'une émission discrète

L'émission est continue ou pseudo-continue (*Figure 5a*) lorsque les salves ne peuvent être séparées les unes des autres. Ce type de signal provient de l'augmentation du bruit de fond qui couvre le signal émis par le défaut de l'élément contrôlé.

Ce type de signal est rencontré lors de la déformation plastique dans des matériaux de type cuivre ou aluminium. Elle est due au fait qu'un grand nombre d'évènements, individuellement peu énergétiques, sont répartis aléatoirement dans le volume déformé et dans le temps.

Elle n'est pas utilisée en milieu industriel et se caractérise par une continuité d'émissions discrètes.

Le bruit de fond est l'information analogique obtenue en l'absence d'émission acoustique.

L'émission acoustique est dite discontinue ou discrète (*Figure 5b*) lorsque les salves peuvent être séparées les unes des autres par observation ou traitement du signal.

Ce type d'émission acoustique est observé dans les structures métalliques au delà de la limite élastique. Elle est due aux évènements énergétiques et localisés.

1.2.1.2. Caractéristiques d'une salve

L'émission discrète appelée salve est la plus utilisée en industrie car elle permet de faire apparaître plus facilement les caractéristiques des événements sans prendre en compte le bruit de fond. Elle est liée à un événement d'endommagement dans le matériau ou au sein de la machine tournante. Ainsi pour identifier précisément le type d'évènement physique au sein du matériau, il faut analyser les paramètres qui caractérisent la salve.

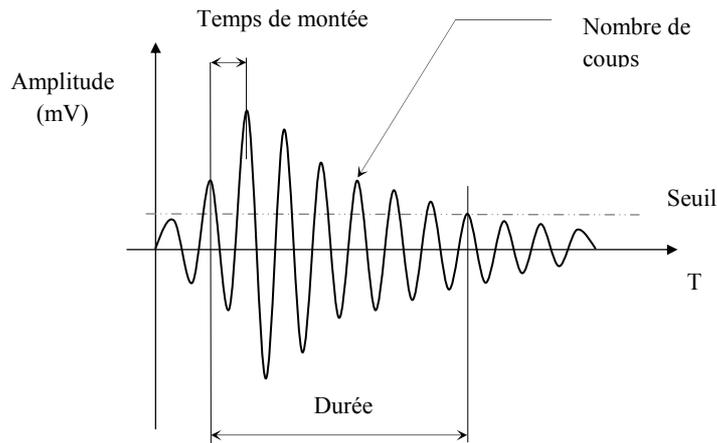


Figure 6 : Schéma d'une salve

Une salve (*Figure 6*) est un signal oscillatoire qui se caractérise par une montée rapide de l'amplitude des oscillations à partir d'un niveau de référence initial. Ce niveau de référence correspond généralement au niveau du bruit de fond. La salve se définit par une décroissance plus lente et qui tend vers le niveau initial.

Elle est bornée par la première et dernière arche dépassant le seuil. Les caractéristiques qui permettent de définir un problème sont les suivants [HUGE 02]:

- L'amplitude (mV) : amplitude maximale du signal pendant la durée de la salve.
- L'énergie (E) : intégrale du carré de l'amplitude de la salve sur toute la durée du signal.
- Nombre de coups : nombre d'alternances dépassant le seuil.
- Durée (micro sec) : temps séparant le premier et le dernier dépassement de seuil dans chaque salve.
- Temps de montée (micro sec) : intervalle de temps entre le premier dépassement de seuil et l'instant où l'amplitude est atteinte.
- Fréquence moyenne (kHz) : nombre de coups de la salve divisé par la durée.

- Fréquence maximale (kHz) : valeur de la fréquence pour laquelle la Transformée de Fourier du signal électrique présente un maximum.
- Barycentre fréquentiel (kHz) : barycentre de la surface déterminée par la densité spectrale énergétique associée à chaque salve.

1.2.1.3. Propriété d'irréversibilité

Dans les années 1950, les recherches effectuées sur l'émission acoustique ont permis de démontrer son irréversibilité. C'est-à-dire, après une sollicitation, aucune émission n'est observée lors des sollicitations ultérieures, tant que le niveau de contrainte atteint précédemment n'est pas dépassé. C'est l'effet KAISER (*Figure 7*). Cependant, il n'est pas toujours vérifié, et les écarts, c'est-à-dire la reprise de l'émission acoustique avant la contrainte maximale déjà atteinte, sont actuellement largement utilisés pour évaluer la qualité des structures, en particulier les structures composites (effet Felicity) [BOVA 86].

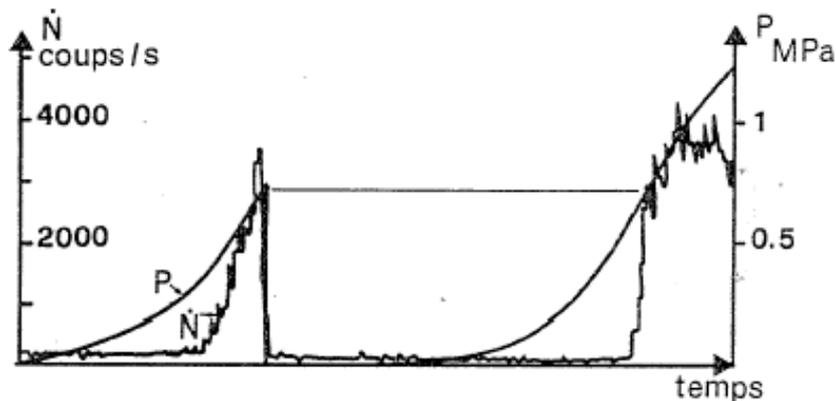


Figure 7 : Effet Kaiser lors de deux mises en charges successives

L'activité de l'émission acoustique dépend des conditions de sollicitations et du rôle actif des matériaux [CHER]:

Les facteurs qui favorisent des signaux de grandes amplitudes sont : la résistance élevée, la vitesse de déformation élevée, l'anisotropie, l'hétérogénéité, l'épaisseur importante, la tendance à former des macles, la rupture par clivage, la température basse, la présence de défauts, la transformation martensitique possible, la propagation de fissures, la structure brute de coulée, la structure brute de soudage et la taille de grain élevée.

Les facteurs qui entraînent des signaux de faibles amplitudes sont : la résistance faible, la vitesse de déformation faible, l'isotropie, l'homogénéité, l'épaisseur faible, le maillage très difficile, la déformation par cisaillement, la température élevée, les matériaux sans défaut, la transformation de phases contrôlées par un phénomène de diffusion, la déformation plastique uniforme, la structure forgée, la structure détensionnée et la structure à grains fins.

1.2.1.4. Ondes élastiques

Les ondes élastiques se caractérisent par leurs célérités et leurs amplitudes.

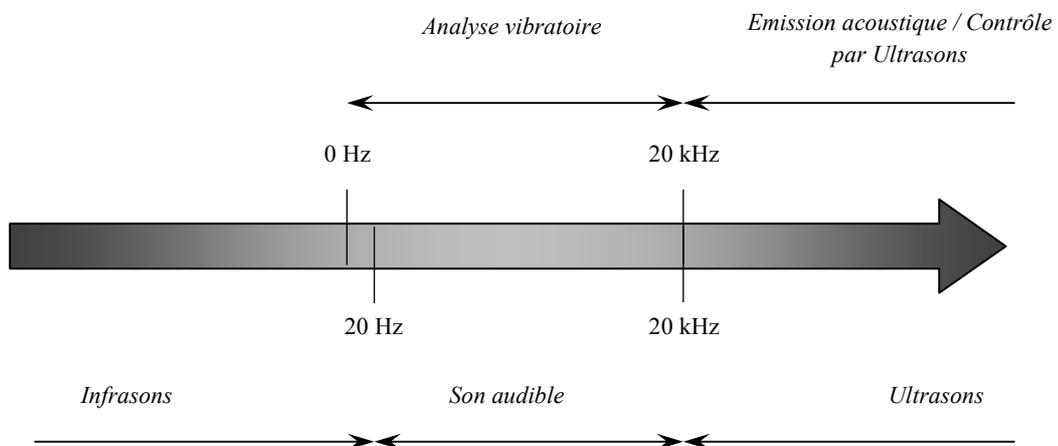


Figure 8 : Plage de mesures fréquentielles de chaque méthode

L'émission acoustique permet de détecter des ondes de quelques kHz à 10 MHz (ultrasons) (Figure 8).

Les ondes ultrasons sont des ondes de vibration. Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui varient selon le milieu et le type d'ondes.

Dans les matériaux métalliques, les fréquences d'utilisations courantes vont de quelques centaines de kHz à quelques dizaines de MHz. Dans ce domaine de fréquence, l'amortissement dans l'air est quasi nul.

Les ondes élastiques se décomposent en ondes de volume et ondes de surface.

Les deux types **d'ondes de volume** utilisés en contrôle non destructif sont les ondes longitudinales et les ondes transversales [BOVA 86].

Les ondes longitudinales, appelées ondes de compression ou de dilatation, sont les plus rapides, elles sont les premières à être détectées par les capteurs (*Tableau 1*).

Dans les ondes longitudinales, les particules se déplacent parallèlement à la direction de propagation. Par conséquent, il en découle une succession de zones comprimées et tendues (*Figure 9*). La vitesse de propagation de ces ondes V_L (*Equation 1.1*) est liée aux caractéristiques du matériau (module d'Young, coefficient Poisson).

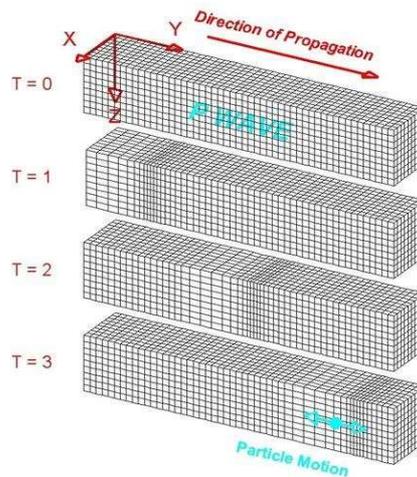


Figure 9 : Représentation du déplacement d'ondes longitudinales

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}} \quad (1.1)$$

Avec : ρ est la densité (kg/m^3), λ et μ sont des constantes de Lamé, E est le module d'Young (N/m^2) et σ est le coefficient de Poisson.

Les ondes transversales sont appelées ondes de cisaillement.

Dans les ondes transversales, les particules se déplacent perpendiculairement à la direction de propagation (*Figure 10*).

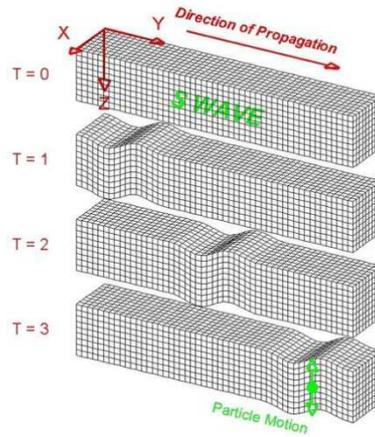


Figure 10 : Représentation du déplacement d'ondes transversales

Equation de vitesse d'ondes transversales V_T (Equation I.2).

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (I.2)$$

Les ondes de surface sont de deux natures suivant l'épaisseur des matériaux [BOVA 86].

Dans les matériaux épais (épaisseur supérieure à 30 mm), les ondes de surface sont dites ondes de Rayleigh (Figure 11).

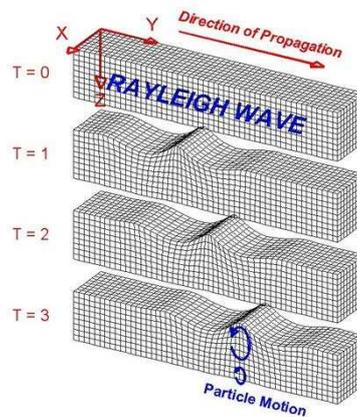


Figure 11 : Représentation du déplacement d'ondes de surface (ondes de Rayleigh)

Equation de vitesse d'ondes de surface dans un matériau épais V_R (Equation I.3).

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} \sqrt{\frac{E}{2(1 + \rho)}} = \frac{0.72 - (V_T/V_L)^2}{0.75 - (V_T/V_L)^2} \cong 0.9V_T \quad (I.3)$$

Dans les matériaux fins ou plaques (épaisseur inférieure à 30 mm), les ondes de surface sont quant à elles appelées ondes de Lamb (Figure 12).

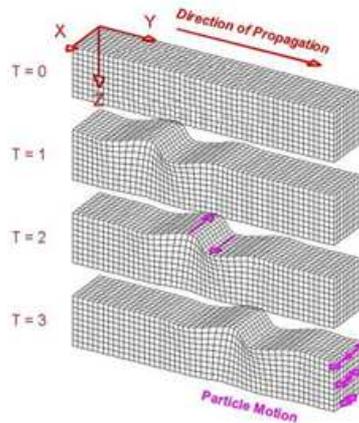


Figure 12 : Représentation du déplacement d'ondes de surface (ondes de Lamb)

	V_L	V_T
Acier	5900 m/s	3250 m/s
Aluminium	6300 m/s	3100 m/s
Béton	4500 m/s	
Verre	5650 m/s	3400 m/s
Eau	1480 m/s	
Air	330 m/s	

Tableau 1 : Exemples de vitesses d'ondes

L'équation d'onde est l'équation (Equation I.4) qui décrit la propagation d'une onde.

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (I.4)$$

La célérité (Equation I.5) correspond à la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans le solide.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (I.5)$$

c est la vitesse de propagation (m/s)

La longueur d'onde λ (Equation I.6) est calculée en mètres.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (I.6)$$

f est la fréquence (Hz)

1.2.2. Acquisition du signal

1.2.2.1. Chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition (*Figure 13*) [ROGE] est l'élément essentiel de toutes techniques. Elle permet de transformer un phénomène physique (génération d'ondes élastiques) en un signal exploitable via le capteur. Son intérêt est d'améliorer le signal émis en un signal retravaillé pour faire ressortir ses caractéristiques.

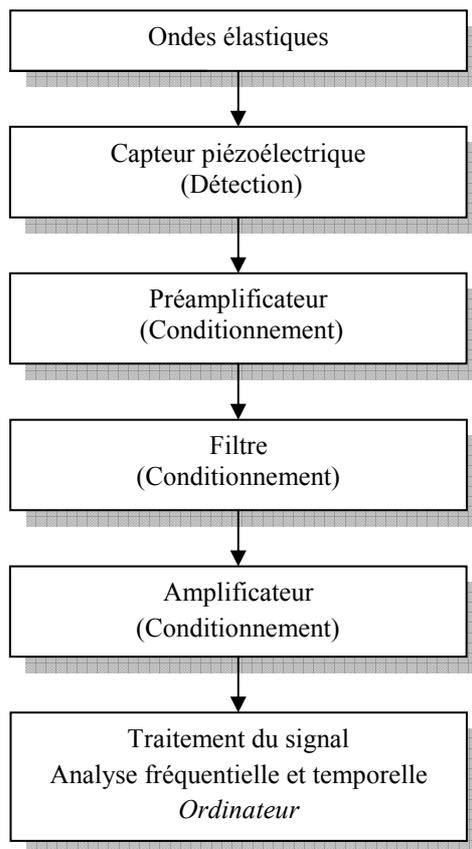


Figure 13 : Chaîne de mesure Emission Acoustique

La partie conditionnement regroupe le préamplificateur, le filtre et l'amplificateur. **Le préamplificateur** se trouve à proximité du capteur. Dans certains cas, il peut être intégré au capteur. Son but est d'effectuer une première amplification du signal et de convertir les ondes élastiques en un signal électrique. **Le filtre** permet d'améliorer le signal relevé en le dissociant du bruit relevé lors de la mesure. Un filtre passe-haut va permettre d'éliminer les bruits de fonctionnement de l'installation sur lesquels une mesure en service est effectuée. **L'amplificateur** permet de préparer le signal pour qu'il puisse être traité par la suite.

Le capteur idéal devra assurer la conversion des ondes mécaniques en ondes électriques en conservant au mieux les informations contenues dans le signal d'origine.

Les qualités primordiales pour un capteur sont la sensibilité qui va dépendre de la précision du déplacement de l'ordre de quelques nanomètres, une grande dynamique, une réponse linéaire à des phénomènes dynamiques dont le temps de montée peut être de quelques nanosecondes et la durée de quelques microsecondes, une grande impédance d'entrée et une bande passante très élevée pour ne pas altérer les caractéristiques du signal, une bonne tenue dans le temps pour garantir la fidélité et la répétitivité des mesures.

Les différents types de capteurs pour l'émission acoustique sont : le capteur piézoélectrique, le capteur optique, le capteur capacitif.

Le capteur qui correspond le mieux aux critères cités ci-dessus est le capteur piézoélectrique.

La détection de l'onde élastique et sa conversion en un signal d'émission acoustique sont réalisées dans la plupart des cas par des capteurs de type piézoélectrique. Ce capteur est l'élément majeur de la chaîne d'émission acoustique.

1.2.2.2. Paramètres de réglage du système d'acquisition

L'acquisition d'un signal en émission acoustique nécessite au préalable de réfléchir à la méthode et surtout au résultat voulu. Le paramétrage va dépendre du type de matériau, du signal escompté et surtout de l'intérêt de la mesure : localisation de fissure dans l'acier ou composite, mesure de corrosion, mesure de défauts sur machine tournante.

Les différents paramètres sont le seuil, les paramètres de fenêtrage de la salve (PDT, HDT et HLT) et la longueur de la salve.

Le seuil d'acquisition [VERV 09]

Le seuil est le paramètre le plus important, il permet la détection et l'enregistrement de la salve ainsi que sa fin.

Dans le cas du contrôle sur machine tournante, ce seuil a été paramétré légèrement en dessous du bruit de fond. L'intérêt n'étant pas de détecter tous les événements, il faut s'intéresser aux événements majeurs. Le réglage du seuil est déterminé en fonction de la

fréquence de rotation. Cette méthode permet de faire apparaître uniquement les évènements générés par le défaut du roulement et non le bruit de fond.

Le seuil S est paramétré en décibel (émission acoustique). Cependant, le signal est en μV . La formule (*Equation I.7*) permettant ce passage est [VERV 09] :

$$S(\text{dB}_{EA}) = 20 \times \log \left[\frac{A(\mu\text{V})}{A_0(\mu\text{V})} \right] - \text{gain} \quad (I.7)$$

Formule de Graham Bell

A est la tension mesurée.

A_0 est la tension en sortie capteur ($A_0=1\mu\text{V}$ équivalent à 0 dB_{EA}).

Les paramètres de forme d'onde (*Figure 14*) [KIM 03] [VERV 09] :

L'intérêt est d'isoler chaque évènement en salve et surtout d'éviter les chevauchements de salves dus à des retours d'ondes.

PDT (Peak Definition Time en μsec)

Ce paramètre permet de déterminer l'alternance maximale de la salve. Il se déclenche à partir du moment où le signal dépasse le seuil. L'amplitude de la salve est retrouvée durant ce temps. C'est-à-dire, qu'il est lié indirectement au temps de montée.

HDT (Hit Definition Time en μsec)

Il est paramétré pour définir le temps de fin de l'évènement. Son départ commence à partir du moment où le signal repasse en dessous du seuil. Dans le cas où cette atténuation est supérieure au HDT, l'enregistrement de la salve se termine. Dans le cas où cette atténuation est inférieure au HDT, la salve n'est pas finie.

HLT (Hit Lockout Time en μsec)

Il permet de limiter les effets d'échos renvoyés par les ondes acoustiques. Il débute à la fin du HDT. La fin de celui-ci donne la fin de la salve.

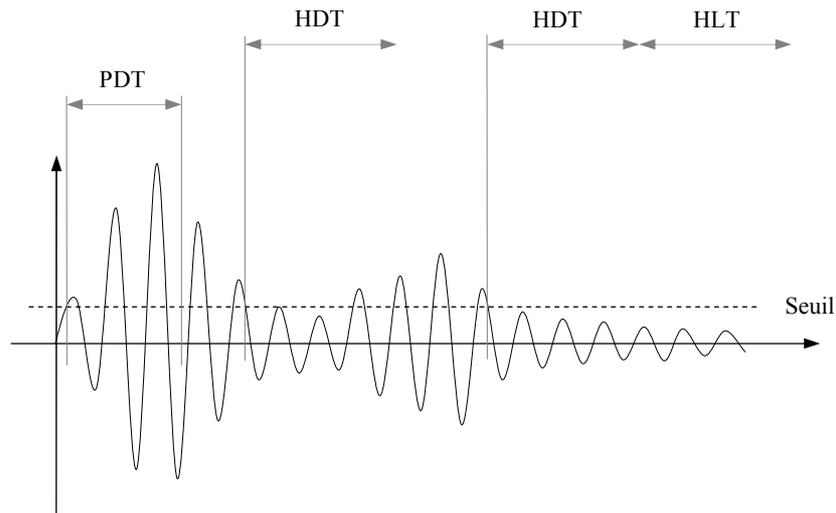


Figure 14 : Paramètres d'acquisition du signal en émission acoustique

1.2.2.3. Le capteur piézoélectrique acoustique

Le choix du capteur se fait principalement sur la fréquence de résonance ou sur la bande de fréquences. Il faut que cette fréquence soit proche de la fréquence émise par le signal d'émission acoustique, produit par la source afin de détecter les sources d'émission acoustique. [ROGE]

Les capteurs à émission acoustique sont répertoriés en 2 catégories :

- Les capteurs large bande. Ils sont uniquement sensibles aux ondes longitudinales arrivant perpendiculairement à la face du capteur. Ils ne présentent aucune résonance dans la bande de fréquences considérée. L'avantage de ce type de capteur est de ne pas modifier la forme réelle du signal, en revanche, ils possèdent une faible sensibilité. Ils permettent aussi d'obtenir des signaux très courts et de déterminer des localisations très précises.
- Les capteurs dits « résonants » ont une bande passante moins large et présente un pic de réponse aux alentours d'une certaine fréquence.

L'élément sensible (*Figure 15*) est constitué d'une céramique piézoélectrique fixée dans un boîtier dont le fond sert de face de couplage à la structure. [WEB 02]

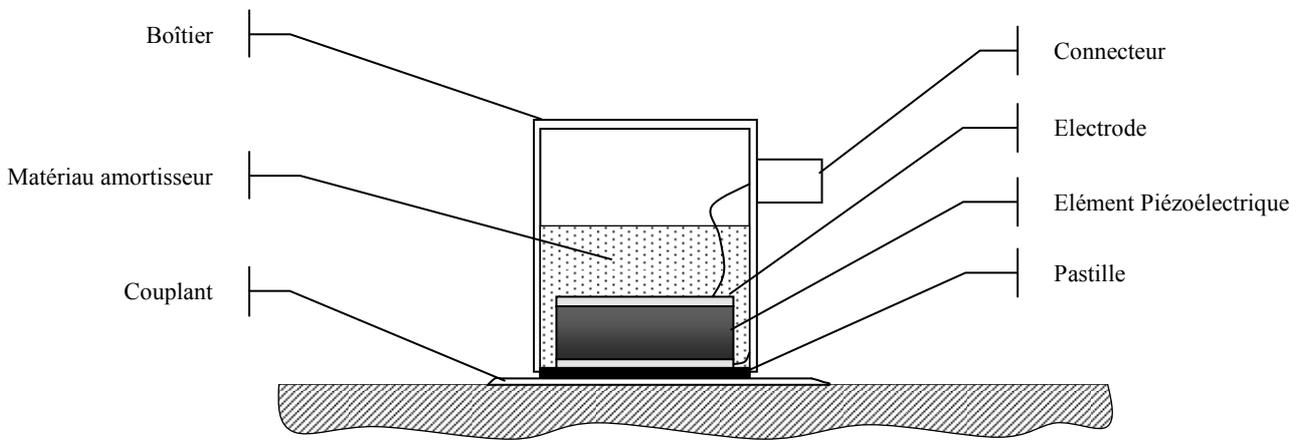


Figure 15 : Coupe d'un capteur d'émission acoustique piézoélectrique

Les capteurs piézoélectriques sont très sensibles, très fiables et stables dans le temps. Cependant, leur fonction de transfert est assez mal connue. Le capteur peut avoir des caractéristiques différentes qui vont dépendre du préamplificateur.

De même certains seront plus ou moins résonants, ce qui de ce fait marque plus ou moins le signal.

1.2.3. Traitement du signal

Pour le traitement du signal, il existe une multitude de méthodes temporelles et fréquentielles. La présentation se porte alors sur les méthodes les plus usuelles tout en sachant que la liste n'est pas exhaustive.

1.2.3.1. Méthode temporelle ou mesure du niveau global

La méthode d'analyse temporelle est une analyse statistique du signal.

La valeur efficace V_{RMS} (Root Mean Square) est exprimée en Volts. Elle représente la tension efficace du signal $V(t)$ sur une période T (*Equation 1.8*).

$$V_{efficace} = V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{n=1}^N [x(n)]^2} \quad (1.8)$$

N représente le nombre de points du signal.

Le Kurtosis est un indicateur de forme (*Equation I.9*). Il correspond à un indicateur d'aplatissement. Il est très sensible au défaut qui est reflété sur le signal. Dans le cas d'un roulement sain, la distribution des amplitudes du signal obéit à une loi gaussienne. Mais lors d'un défaut, le signal est modifié et donc, l'indicateur augmente.

$$Kurtosis = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (I.9)$$

Le facteur Crête (*Equation I.10*) est le rapport entre la valeur crête du signal et la valeur efficace. Il est pertinent dans le cas d'un signal non sinusoïdal caractérisé par des impulsions soudaines de grandes amplitudes.

$$Facteur\ Crête = \frac{Valeur\ Crête}{V_{RMS}} = \frac{\sup|x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{n=1}^N [x(n)]^2}} \quad (I.10)$$

L'ABS ENERGY (10^{-18} Joules) (*Equation I.11*) est une mesure de l'énergie et provient de l'intégrale du signal au carré divisé par la résistance de référence (10 k-Ohms) sur la durée du signal AE.

$$ABS\ ENERGY = \int_t^{t+T} \frac{[V(t)]^2}{R} dt \quad (I.11)$$

L'ASL (Average Signal Level) (*Equation I.12*) est la tension efficace du signal venant du capteur. Il est exprimé en décibels. Il est représentatif du bruit de fond.

$$ASL = 20 \text{ Log}_{10} (1.4 \times V_{RMS}/100) \quad (I.12)$$

Le Counts est le nombre de fois où l'amplitude du signal dépasse le seuil. Cette fonction est aussi utilisée comme indicateur d'activité.

L'Amplitude représente le pic de l'événement en Volts. Il est utile comme mesure de l'intensité mais aussi comme indicateur de détectabilité et de caractérisation du défaut.

Les facteurs temporels ASL, ABS ENERGY, COUNTS et AMP sont spécifiques à l'analyse par émission acoustique.

1.2.3.2. Méthodes fréquentielles

L'analyse fréquentielle constitue la meilleure méthode pour le diagnostic de défaut sur roulement [ESTO 04].

L'analyse fréquentielle est la plus utilisée pour l'analyse vibratoire. Elle se pratique à l'aide de la Transformée de Fourier. La Transformée de Fourier permet de convertir un signal temporel en un signal fréquentiel et donc d'obtenir une représentation amplitude/fréquence de $s(t)$.

L'intérêt de cette méthode est de faire ressortir les fréquences caractéristiques du signal et de détecter les défauts.

Les fréquences sont proportionnelles à la fréquence de rotation des arbres. Un signal quelconque $s(t)$ peut être décomposé en signaux sinusoïdaux élémentaires (*Equation I.13*).

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (I.13)$$

$S(f)$ est la Transformée de Fourier (domaine fréquentiel)

L'analyse enveloppe a pour intérêt de faire apparaître les basses fréquences. Cette méthode permet d'améliorer l'étude fréquentielle. Cette analyse se fait par l'intermédiaire de la transformée de Hilbert du signal brut.

1.2.3.3. Autres méthodes pour le traitement du signal

Dans le cas où la mesure du niveau global et l'analyse spectrale ne permettent pas un diagnostic précis, de nombreuses techniques de traitement du signal sont disponibles, telles que l'analyse cepstrale et l'analyse par ondelettes. Cependant, ces méthodes restent du domaine de la recherche mais peuvent être utilisées.

1.2.4. Localisation

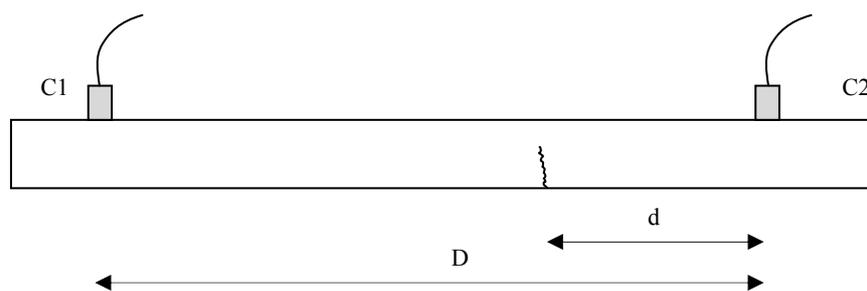
Deux méthodes de localisation sont possibles :

La première consiste à connaître le type de matériaux qui compose l'élément à analyser. Ce critère va permettre de choisir le type de capteur. Le choix se portera sur un capteur piézoélectrique résonant.

La seconde méthode, la plus utilisée pour la détection de défaut matière (fissure, corrosion,...), consiste à déterminer les différences de temps d'arrivée Δt (Equation I.14) des signaux émis par la source. Un minimum de 3 suffit dans le cas d'une plaque à analyser car la localisation se fait par le biais d'une triangulation. Les capteurs sont positionnés sur la structure de telle façon à réaliser une maille de localisation. Dans le cas d'une barre ou d'une éprouvette, 2 capteurs suffisent (Figure 16) [WEB 02] [ROGE 88]. Lorsque le matériau est hétérogène (type composite), le problème devient plus complexe, car les caractéristiques ne sont pas les mêmes selon le sens de l'onde (célérité).

Cependant, il y a plusieurs règles à respecter selon les résultats et la recherche souhaitée.

La précision va dépendre : du nombre de capteurs, des conditions de contrôle, de l'état de surface de l'appareil, de la dimension de la surface ou de l'élément à mesurer.



$$d = \frac{1}{2} (D - \Delta T \times V) \quad (I.14)$$

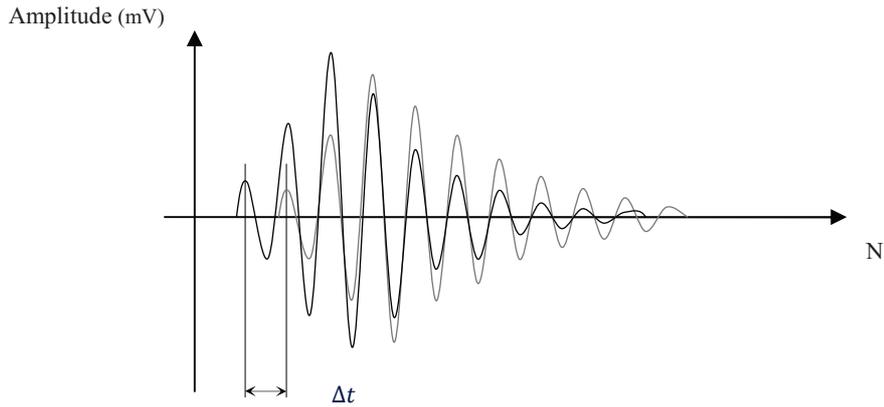


Figure 16 : Représentation d'une localisation de source acoustique avec deux capteurs

Pour la localisation et le diagnostic **dans le cas d'une machine tournante** (étude de roulement), 2 choix sont possibles :

- Soit le but est de chercher un défaut à une fréquence bien précise, le choix se portera sur un capteur résonant à cette fréquence (défaut de bagues,...).
- Soit le but est de réaliser une analyse acoustique pour contrôler la détérioration d'un élément sur une longue durée, un capteur large bande sera alors choisi. Le risque est d'obtenir un signal perturbé par le bruit. Mais l'avantage de cette analyse est de pouvoir repérer toutes les fréquences de défauts sur la bande de fréquences du capteur.

Le capteur est toujours assemblé avec un couplant visqueux. Ce couplant permet de faire la liaison avec la surface du matériau.

Dans le cas d'une machine tournante, il n'y a pas réellement de méthode de localisation pour l'émission acoustique. Le seul point important est de positionner le capteur piézoélectrique acoustique au plus près de la source donc proche du palier ou du roulement. Cependant, il est primordial de connaître la composition de la machine tournante. Les résultats ne sont pas identiques si le bâti est en fonte, acier, ou composite.

1.3. Présentation de l'Analyse Vibratoire

La présentation suivante permet de rappeler la théorie de l'analyse vibratoire ainsi que sa chaîne d'acquisition avec toute l'instrumentation permettant l'acquisition d'accélération générées par le système. Cette partie a pour intérêt de faire apparaître les divergences et convergences avec l'analyse par émission acoustique.

1.3.1. Principe

Les éléments tournants d'une machine, lors du fonctionnement, engendrent des efforts internes et des déformations au sein de la structure. Ces déformations et efforts varient en fonction de la fréquence de rotation et des défauts de l'élément (roulement à billes, ...). Ces déformations et ces efforts entraînent le déplacement de la structure par rapport à elle-même, ce qui constitue la vibration.

La vibration est un mouvement d'oscillation autour d'une position d'équilibre stable ou d'une trajectoire moyenne.

L'analyse vibratoire a pour but de déterminer les forces internes et externes qui sont appliquées à une installation et de statuer sur la gravité de leurs présences et de leurs amplitudes.

L'analyse vibratoire se fait avec un capteur accéléromètre de type piézoélectrique.

L'analyse vibratoire peut se caractériser par l'équation différentielle du mouvement (Equation I.15) d'un système masse - ressort - amortissement à 1DDL (Figure 17) :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \quad (I.15)$$

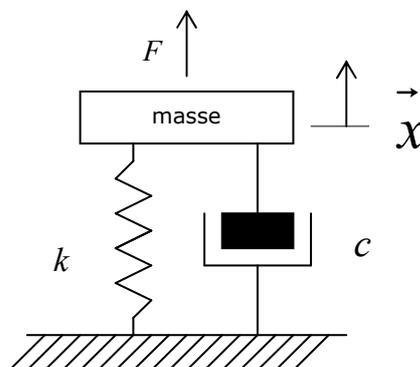


Figure 17 : Système à un degré de liberté

Avec :

m est la masse en kg,

c est l'amortissement en N.s/m,

k est la raideur en N/m,

$x = x(t)$ représente le déplacement de la masse en mètre à partir de sa position d'équilibre statique,

$F = F(t)$ représente l'impulsion émise par le choc du roulement (force externe) en N.

Fréquence caractéristique (Equation I.16) :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (I.16)$$

Avec :

ω est la pulsation propre en rad/s,

f est la fréquence en Hz.

Lors du fonctionnement, les signaux vibratoires permettent de contrôler l'état des composants. Ces signaux vibratoires contiennent l'information nécessaire relative à leur état. Ce signal est constitué de plusieurs parties :

- une partie cyclique, ce phénomène se reproduit à des périodes constantes. Ces événements se caractérisent par un défaut qui peut se trouver sur la bague externe, la bague interne, la cage ou l'élément roulant.
- une partie aléatoire qui est due au phénomène de bruit (parasite) lors du fonctionnement.

1.3.2. Acquisition du signal

1.3.2.1. Chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition (*Figure 18*) est, comme signalé dans le cas de l'analyse par émission acoustique, un élément important de l'analyse vibratoire. Elle a pour objectif de transformer le signal sinusoïdal généré par les accélérations du système en un signal exploitable.

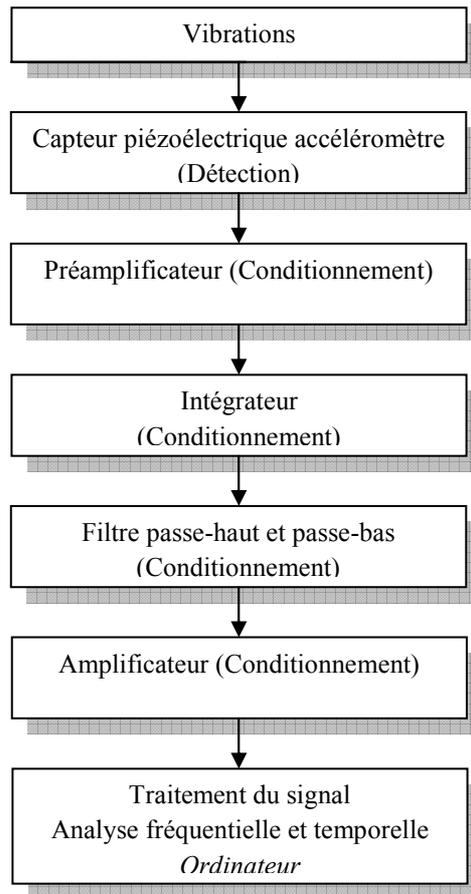


Figure 18 : Chaîne de mesure Analyse Vibratoire

La partie conditionnement regroupe le préamplificateur, l'intégrateur, le filtre (passe-haut et passe-bas) et l'amplificateur. **Le préamplificateur** permet d'effectuer une amplification du signal pour le rendre exploitable. **L'intégrateur** permet de passer le signal d'accélération en un signal de vitesse ou déplacement. **Le filtre (passe-haut et passe-bas)** permet de limiter le signal sur une plage de fréquence. **L'amplificateur** permet la transmission du signal à l'appareillage d'analyse vibratoire.

1.3.2.2. Le capteur accéléromètre piézoélectrique

L'analyse vibratoire se fait le plus fréquemment avec un accéléromètre piézoélectrique (Figure 19). Il possède les propriétés suivantes :

- Une utilisation sur de grandes gammes de fréquences.
- Une excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique.
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse.

- Les mesures peuvent être faites dans des conditions assez variables au niveau température, la limite la plus fréquente pour ces capteurs est de 250°C mais il est possible d'avoir des capteurs spécifiques qui peuvent atteindre des températures maximales d'utilisation de 700°C.
- Nécessite un conditionnement de sa sortie, cela se fait par l'intermédiaire d'un préamplificateur de charge.
- Aucun élément mobile donc extrêmement durable.
- Extrêmement compact.

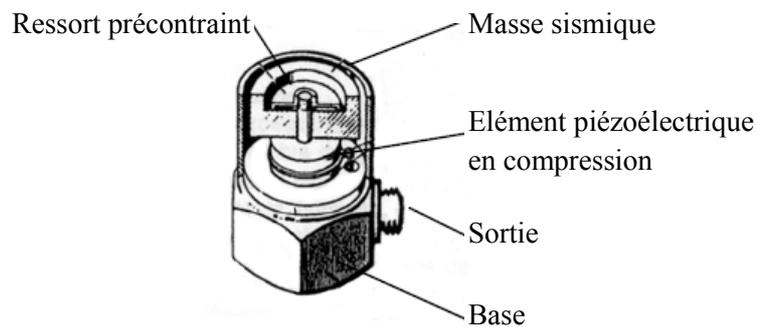


Figure 19 : Accéléromètre piézoélectrique

Sur la fréquence de résonance, la masse applique une force sur l'élément piézoélectrique proportionnelle à l'accélération subie par l'embase du capteur.

L'accéléromètre est limité (Figure 20) :

- Aux basses fréquences par la technologie du capteur,
- Aux hautes fréquences par la masse de l'accéléromètre.

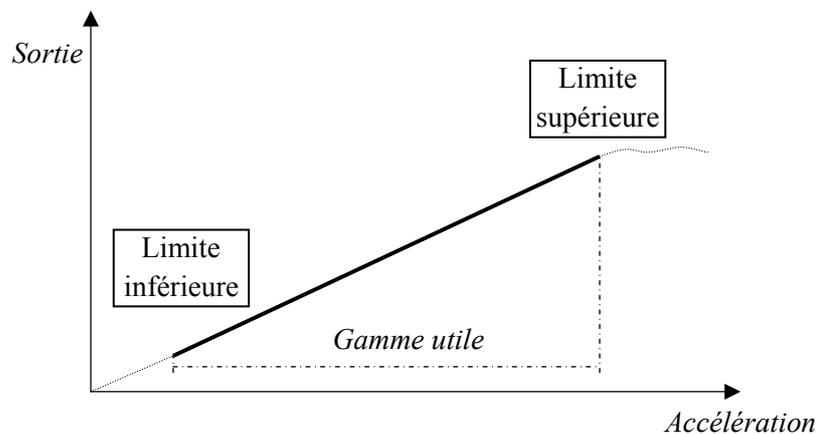


Figure 20 : Schéma représentant la gamme utile du capteur

1.3.3. Traitement du signal

La méthode de traitement du signal est la même que celle utilisée pour l'émission acoustique, se référer au chapitre 1.2.3.

1.3.4. Localisation

Il n'y a pas réellement de méthodes de localisation pour l'analyse vibratoire. Le premier point important est de positionner le capteur accéléromètre au plus près de la source, donc proche du palier ou du roulement.

Le second point important est la direction des accélérations, ce qui a une grande incidence sur l'implantation du capteur ainsi que de son choix (simple axe ou tri-axes).

1.4. Conclusion

Le tableau (*Tableau 2*) rappelle certains points cités dans les précédents chapitres et permet de réaliser un comparatif [WEB 01].

	Analyse par emission acoustique	Analyse vibratoire
Capteur	Capteur piézoélectrique (autre nom : capteur d'émission acoustique)	Capteur piézoélectrique (autre nom : accéléromètre)
Fréquence	Détection de signaux hautes fréquences (20 kHz à 10 MHz)	Détection de signaux basses fréquences (0 Hz à 20 kHz)
Applications :	<ul style="list-style-type: none"> - surveillance de l'apparition de phénomènes hautes fréquences, - localisation possible avec plusieurs capteurs, - détection précoce des défauts à caractère évolutif avec un suivi de leur progression. 	<ul style="list-style-type: none"> - surveillance de machine pour la maintenance prédictive, - identification de l'origine et de la nature du signal, - détection précoce des défauts dans la machine tournante, - réalisation de diagnostic approfondi avec l'analyse dans le domaine spectral.
Restrictions	<p>Problème d'atténuation des ondes hautes fréquences : impose de disposer le capteur au plus près de la source.</p> <p>Analyse plus complexe dans les matériaux hétérogènes (composite, ...).</p>	Les analyses approfondies nécessitent une interprétation des spectres par des spécialistes.
Observations	Applications encore rares dans la machine tournante.	Méthode déjà utilisée dans le domaine de la surveillance des machines tournantes.

Tableau 2 : Tableau comparatif des deux méthodes

Avantages de l'émission acoustique pour l'analyse des machines tournantes :

- Réaliser des analyses sur des machines tournantes qui ont de faibles fréquences de rotation (de l'ordre de 2tr/min).
- Permet de réaliser une analyse de l'évolution du défaut.
- Permet de détecter l'apparition de défauts audibles.
- Autorise une surveillance continue.
- Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par l'analyse vibratoire.

Inconvénients de l'émission acoustique :

- Elle ne permet pas de définir avec précision le défaut sur la machine tournante.
- Elle est complexe à utiliser dans le cas de matériaux hétérogènes (composite).
- La localisation doit se faire par le biais de un ou plusieurs capteurs. La difficulté peut venir de la taille du bâti ou de l'éloignement de la source acoustique par rapport au capteur. Plus les capteurs sont éloignés de la source, moins le signal est net.
- Lors de l'analyse, en prenant un capteur large bande, le phénomène de bruit dans le signal a un grand risque d'être observé car la plage de fréquences est trop large.
- Sensibilité au bruit ambiant.
- Diagnostic souvent difficile à réaliser.
- Problème de répétabilité des mesures.

Avantages de l'analyse vibratoire pour l'analyse des machines tournantes :

- Détection de défauts à un stade précoce.
- Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi.
- Autorise une surveillance continue.
- Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance).
- Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure.

Inconvénients de l'analyse vibratoire :

- Spectres parfois difficiles à interpréter.
- Dans le cas de la surveillance continue, les installations deviennent relativement coûteuses.

Le contrôle non destructif est devenu primordial dans l'industrie, il permet de limiter les coûts de maintenance et de préparer les programmes de maintenance sur des machines à grandes cadences et à fonctionnement 24h/24.

Ce chapitre permet de réaliser le comparatif entre deux méthodes de contrôle non destructif d'un point de vue théorique. L'émission acoustique dans le domaine de la machine tournante est une technique nouvelle, peu connue et peu utilisée. Elle est basée sur l'analyse des ondes élastiques qui sont émises par le biais d'une contrainte dans le matériau ou d'un défaut dans la machine tournante (roulement). Cette méthode s'est améliorée avec l'évolution de l'informatique qui a permis d'augmenter les capacités pour la prise de données et leurs analyses.

Tout d'abord, une présentation de l'émission acoustique a été réalisée. Cette présentation a permis de comprendre le principe et d'expliquer le phénomène des ondes élastiques qui est la base de cette méthode.

La première méthode, qui est fortement utilisée en industrie, est l'analyse vibratoire. Elle permet dans la plupart des cas de réaliser un pronostic de la machine et de définir les différents défauts. La seconde méthode, qui est plus récente, est l'émission acoustique. Elle permet de réaliser une détection de défauts sur machines tournantes.

L'avantage majeur de l'émission acoustique par rapport à l'analyse vibratoire est de réaliser un examen de la machine à de faibles fréquences de rotation (aux environs de deux tr/min). Car, lors de l'analyse vibratoire, les chocs émis par les défauts ne génèrent pas d'accélération importantes afin de traiter les signaux.

Le plus gros inconvénient de l'émission acoustique vient de l'étude des ondes élastiques. La vitesse de propagation des ondes élastiques est le critère principal de cette méthode. Dans l'hypothèse où le bâti de la machine est constitué de plusieurs types de matériaux, il est très difficile d'analyser les courbes de fréquences.

2. Analyse des signaux issus d'une butée à billes

2.1. Introduction

2.1.1. Intérêts

Certaines études ont démontré que l'émission acoustique est particulièrement bien adaptée à l'analyse de défaut à faible fréquence de rotation [JAMA 02-a] [JAMA 02-b]. Aussi, il a été décidé de travailler sur l'étude de défaut sur une butée à billes à faible vitesse puis à vitesse moyenne.

Cette étude permet de faire apparaître les avantages et limites de chaque méthode. Dans la première partie, une analyse du banc de fatigue a été réalisée en analyse vibratoire. L'intérêt est de vérifier le comportement des indicateurs temporels pour la détection de défaut.

Puis, la deuxième partie a consisté à réaliser le comparatif entre les deux méthodes d'un point de vue fréquentiel et temporel.

L'intérêt de ce travail a été de faire apparaître une nouvelle fonction de l'émission acoustique qui est le diagnostic de défaut sur une butée à billes.

Cette étude s'est réalisée au laboratoire du GRESPI. Elle porte sur la détection et l'analyse de défaut sur une butée à billes. Elle s'est déroulée à différentes fréquences de rotation et sur un roulement écaillé naturellement.

2.1.2. Protocole de mesure

Le choix du protocole de mesure a été porté préalablement sur une analyse vibratoire du banc de fatigue à différentes fréquences de rotation (*Tableau 3*). L'intérêt de cette première phase est de faire apparaître la limite de détection de cette méthode, ainsi que de réaliser une étude temporelle des signaux.

La seconde phase a permis d'effectuer quelques mesures en émission acoustique sur le banc. L'intérêt de cette phase est d'appréhender l'appareil d'acquisition et de préparer les programmes sur Matlab pour la reconstruction des signaux et l'étude de ceux-ci. La phase

d'apprentissage de l'appareil d'émission acoustique a été menée parallèlement avec Mr Proust de la société Mistras qui m'a conseillé sur le choix du capteur et des différents paramétrages.

La troisième phase concerne la prise de signaux en émission acoustique à différents régimes. Cependant, étant donné que la reconstruction de signaux en émission acoustique est très longue et difficile, le choix s'est porté sur 5 vitesses au-delà de 10 tr/min et de 3 vitesses inférieures à 10 tr/min (*Tableau 4*).

Pour toutes les mesures, la butée à billes était chargée axialement de 500 daN, cette charge était variable de + / - 5%.

Phase 1 :

Fréquence de rotation (tr/min)	Temps d'acquisition (sec)
1	10
2	10
3	10
5	10
10	10
20	10
50	10
100	2
200	2
400	2
600	2
800	2
1000	2
1200	2
1400	2
1600	2
1800	2
2000	2
2200	2
2400	2

2600	2
2800	2
3000	2

Tableau 3 : Protocole de mesure en analyse vibratoire

Les paramètres pour l'analyse vibratoire sont :

- Pour les 7 premières vitesses de rotation

Fréquence d'échantillonnage : 51.2 kHz

Temps d'acquisition : 10 sec

Nombre de points : 512 000 pts

Résolution : 0.1 Hz

- Pour les vitesses de rotation suivantes

Fréquence d'échantillonnage : 51.2 kHz

Temps d'acquisition : 2 sec

Nombre de points : 102 400 pts

Résolution : 0.5 Hz

Les signaux à basses fréquences de rotation ont été enregistrés sur une durée de 10 sec afin d'obtenir le maximum d'informations. A titre informatif, il faut 20 sec pour réaliser un tour à 3 tr/min.

Phase 2 et phase 3 :

La méthode d'acquisition en émission acoustique est totalement différente de l'analyse vibratoire avec la Pocket AE. La Pocket AE enregistre les événements à partir du moment où le signal dépasse le seuil paramétré et se termine lorsque le seuil n'est plus atteint. Les différents paramètres d'acquisition cités précédemment (*Figure 14*) qui sont HDT, PDT et HLT ont été pris en compte pour l'acquisition.

Les vitesses choisies ont été :

Fréquence de rotation (tr/min)	Seuil (db)
1	51
3	51
10	50
50	56
100	58
200	62
1000	65
2000	74

Tableau 4 : Protocole de mesure en émission acoustique

La détermination des seuils a été réalisée sur le banc à la fréquence de rotation choisie. Le seuil a été réglé légèrement en dessous de la détection des ondes afin de capter les évènements qui caractérisent le défaut tout en évitant un bruit de fond. Cela a été possible à basse vitesse car le bruit venant du haut parleur du système d'acquisition est très marqué par le défaut et très espacé.

La phase de reconstruction sur Matlab est très importante, car elle permet de positionner chaque évènement (forme d'onde) sur l'axe des temps en fonction de leurs temps d'enregistrement. Cette phase permet d'avoir un signal de quelques secondes à partir de formes d'onde de quelques μsec . La durée du signal au final dépend des limites de Matlab, car lors des reconstructions, il n'était pas rare d'arriver aux limites de mémoire aux environs de 40 000 000 pts.

Paramétrage de la Pocket AE :

- Nombre d'échantillons : 2MSPS (Méga échantillon par seconde)
- Résolution : $5 \cdot 10^{-7}$ sec
- Nombre de points par forme d'onde : 1024 pts
- PDT : 20 μsec
- HDT : 50 μsec
- HLT : 200 μsec
- Durée maximale d'une forme d'onde : 2 msec

Les paramètres ont été choisis pour effectuer une reconstruction sur un temps assez long avec des formes d'onde assez courtes. Dans le cas contraire, le temps de signal aurait été plus limité avec des formes d'onde plus longues.

Présentation d'une forme d'onde prise (*Figure 21*) avec la Pocket AE :

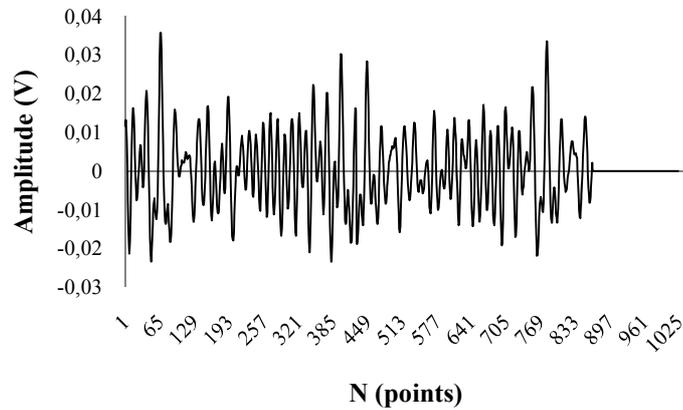


Figure 21 : Forme d'onde à 3 tr/min

Une forme d'onde de 1024 pts représente $5,12 \cdot 10^{-4}$ sec.

Signal reconstruit à 3 tr/min (*Figure 22*).

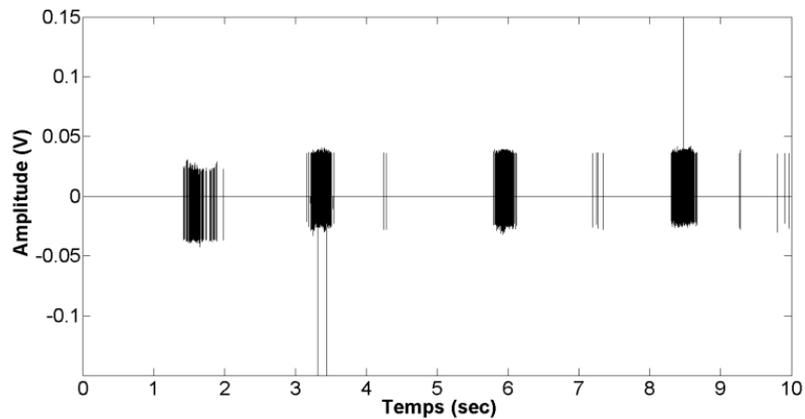


Figure 22 : Reconstruction d'un signal à 3tr/min avec Matlab

Trois mesures ont été enregistrées pour chaque fréquence de rotation.

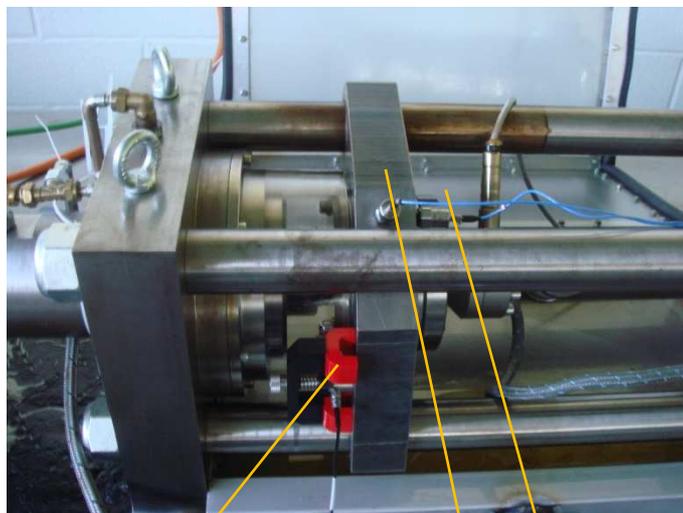
2.2. Présentation du banc ainsi que de la butée à billes

2.2.1. Présentation du banc

Le banc de fatigue (*Figure 23*) a pour particularité la réalisation d'études sur des butées à billes écaillées naturellement par fatigue et de permettre des études jusqu'à la dégradation.



Figure 23: Banc de fatigue



Capteur Emission Acoustique

Capteur Analyse Vibratoire
- Axial (non visible)

Capteur Analyse Vibratoire
- radial

Figure 24 : Disposition des capteurs

Le banc permet de réaliser des essais à basses fréquences de rotation, cependant, la fréquence de rotation en dessous des 0.5 Hz soit 30 tr/min ne peut être certifiée.

Les caractéristiques du banc « SURVIB » sont les suivantes :

- La fréquence de rotation est paramétrable de 1 tr/min à 3000 tr/min. Cependant, il est préférable de limiter les durées de fonctionnement aux vitesses extrêmes pour limiter les échauffements.
- La force axiale est paramétrable de quelques dizaines de daN afin de permettre un contact de la butée à billes et donc, un fonctionnement normal du roulement et ce jusqu'à environ 5000 daN.
- La lubrification est réglable, le niveau minimum de lubrification donne un léger filet.
- Le banc de fatigue est positionné sur un bâti en fonte, lui-même positionné sur une dalle en béton pour limiter tous les phénomènes de vibrations, de bruits, venant de l'extérieur et pour stabiliser l'ensemble.
- Le banc est entièrement automatisé et piloté par une armoire de gestion qui permet de suivre les températures de chaque élément important, de paramétrer des rampes de variation de vitesses.

2.2.2. Présentation de la butée à billes avec les fréquences caractéristiques.



Figure 25 : Butée à billes réf 51207

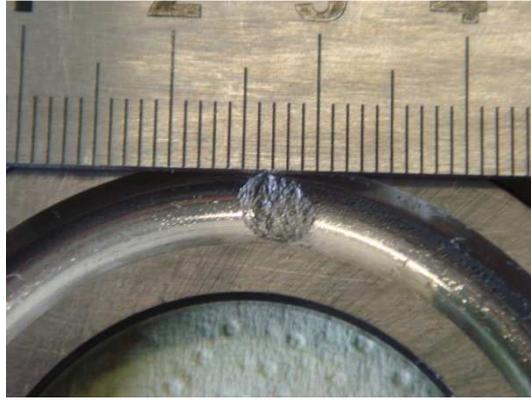


Figure 26 : Défaut sur le roulement de longueur 4.5 mm

Caractéristiques du roulement (Figure 25 et Figure 26):

Nombre d'éléments roulants	$Z = 12$	
Diamètre de l'élément roulant	$d = 7.2 \text{ mm}$	
Diamètre moyen	$D = 49.5 \text{ mm}$	
Angle de contact	$\alpha = 90^\circ$	$(\pi/2)$

Fréquence de défaut de la bague extérieure (Equation II.1 et Equation II.2).

$$f_{be} = \frac{f_{rot} \times Z}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \quad (II.1)$$

$$f_{be} = \frac{f_{rot} \times Z}{2} \quad (II.2)$$

Fréquence de défaut de la bague intérieure (Equation II.3 et Equation II.4).

$$f_{bi} = \frac{f_{rot} \times Z}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \quad (II.3)$$

$$f_{bi} = \frac{f_{rot} \times Z}{2} \quad (II.4)$$

Fréquence de défaut de l'élément roulant (Equation II.5 et Equation II.6).

$$f_{ér} = f_{rot} \times \frac{D}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha\right)^2\right) \quad (II.5)$$

$$f_{ér} = f_{rot} \times \frac{D}{d} \quad (II.6)$$

Fréquence de défaut de la cage (*Equation II.7 et Equation II.8*).

$$f_c = \frac{f_{rot}}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\alpha \right) \quad (II.7)$$

$$f_c = \frac{f_{rot}}{2} \quad (II.8)$$

Calcul des fréquences caractéristiques de défauts pour les vitesses 3tr/min et 2000 tr/min (*Tableau 5*).

Vitesse (tr/min)	3	2000
Vitesse (Hz) =	0.05	33.33
f_r		
f_{be}	0.3	200
f_{bi}	0.3	200
$f_{ér}$	0.34	229.17
f_c	0.03	16.67

Tableau 5: Tableau récapitulatif des fréquences caractéristiques de défaut pour les butées à billes réf 51207

2.3. Instrumentation

2.3.1. Emission acoustique

L'Université de Reims dispose d'un système d'acquisition de la gamme Physical Acoustic. La Pocket AE (*Figure 27*) est un appareil de mesure et d'acquisition d'émission acoustique. Il permet de prendre des mesures discontinues (discrètes).



Figure 27 : Système d'acquisition en Emission Acoustique (Pocket AE)

Les essais ont été réalisés à l'aide d'un capteur R15a (*Figure 24*), ses caractéristiques sont les suivantes : une fréquence de résonance de 75 kHz et une gamme de fréquence de 50 à 200 kHz.

2.3.2. Analyse vibratoire

L'analyse vibratoire se fait à l'aide d'un système d'acquisition « OROS ». Cet appareillage permet l'acquisition sur 8 voies et de réaliser des mesures avec un nombre indéfini de points et donc un temps d'acquisition indéfini dans la limite du stockage et du traitement des signaux.

Le banc est équipé de 2 accéléromètres piézoélectriques (*Figure 24*) :

- Le premier sert à mesurer les accélérations axiales engendrées par le défaut de la butée à billes. Ce capteur est celui qui réagit le mieux et qui donne les meilleures informations.

- Le second sert à mesurer les accélérations radiales sur le banc.

2.4. Analyse temporelle du banc de fatigue en vibration

Avant de procéder à la phase d'essai, il a fallu réaliser une étude du banc de fatigue. Cette étude a pour intérêt d'analyser les facteurs temporels (Kurtosis, RMS, Facteur Crête) (*Tableau 6*). Pour obtenir un résultat très prononcé ainsi qu'une variation des facteurs très marquée, il a fallu prétraiter les signaux avec un spectre enveloppe (Hilbert), puis, les indicateurs ont été calculés avec un filtre butter entre 12 kHz et 16 kHz. Ce fenêtrage est choisi car les chocs émis par les défauts sont à des fréquences proches des 14 kHz.

Fréquence de rotation (tr/min)	RMS	RMS	K	K	F. Crête	F. Crête
	Radial	Axial	Radial	Axial	Radial	Axial
1	0,0087	0,0058	3,2100	3,8839	3,4349	4,5163
2	0,0089	0,0061	3,3003	3,8283	3,5263	4,1247
3	0,0111	0,0070	3,4228	3,7577	4,0022	4,3310
5	0,0121	0,0074	3,2167	3,5429	3,6289	3,9924
10	0,0129	0,0078	3,1691	3,5706	3,5768	4,3473
20	0,0115	0,0079	3,0901	3,4852	3,3528	4,1648
50	0,0098	0,0097	3,3662	3,4746	3,6573	3,7103
100	0,0110	0,0135	3,1669	3,4332	3,5470	3,7035
200	0,0156	0,0334	3,6584	3,9241	3,9307	4,1269
400	0,0385	0,0919	4,1747	4,0327	4,7198	3,9544
600	0,0616	0,1795	6,8058	4,8219	6,1909	4,1852
800	0,0966	0,2750	17,5504	4,8343	8,4054	4,4299
1000	0,1532	0,4634	18,8666	9,4393	10,9265	8,4830
1200	0,2306	0,6917	11,9200	8,1266	8,4112	7,1853
1400	0,3144	1,0043	8,4712	9,7793	6,0170	7,2844
1600	0,3988	1,2458	5,9596	6,8318	5,6555	6,7287
1800	0,5492	1,7096	5,2828	5,8480	5,5865	6,5221
2000	0,6292	2,0066	6,1041	6,8891	5,1770	7,2468
2200	0,8917	2,8535	4,7318	4,8990	4,6472	4,1601

2400	1,1248	3,3035	5,1665	4,3999	5,4198	4,0562
2600	1,3004	3,9230	4,3091	4,8574	4,2049	4,1633
2800	1,5229	4,4831	5,0757	6,3426	4,3689	4,8826
3000	1,6981	5,2799	5,0185	6,7630	4,7038	5,7962

Tableau 6 : Facteurs temporels pour l'analyse vibratoire en fonction des vitesses définies

La valeur efficace (RMS) (Figure 28)

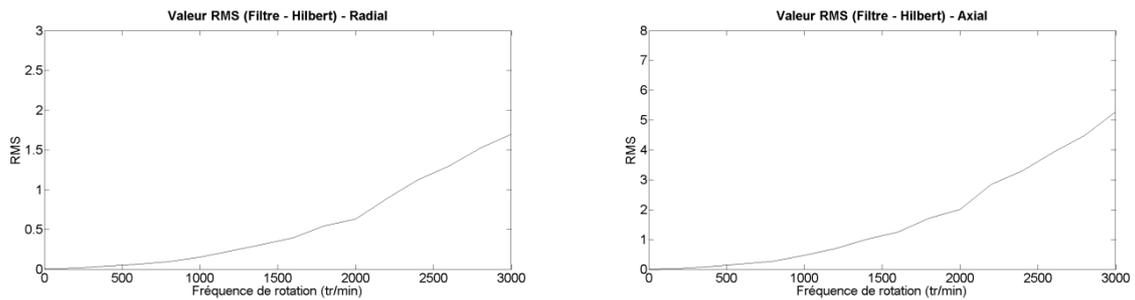


Figure 28 : Graphique des valeurs RMS en radial et axial en fonction des vitesses

Le Kurtosis (Figure 29)

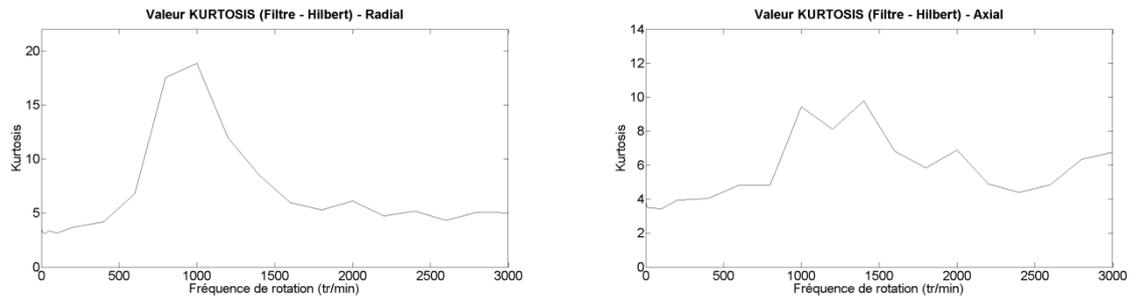


Figure 29 : Graphique des valeurs Kurtosis en radial et axial en fonction des vitesses

Le Facteur Crête (Figure 30)

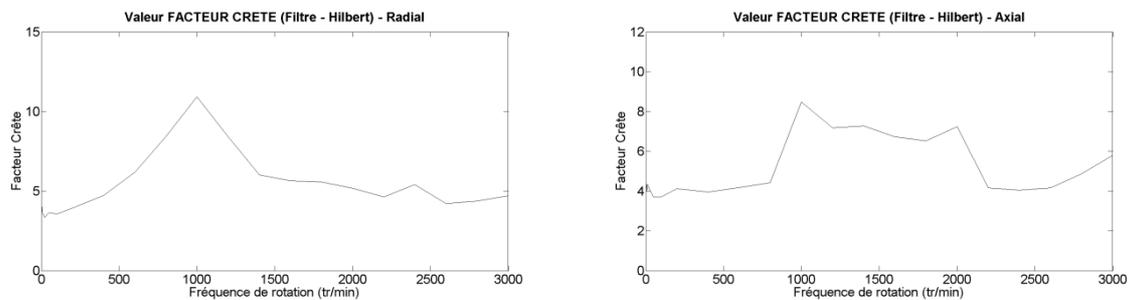


Figure 30 : Graphique des valeurs Facteur Crête en radial et axial en fonction des vitesses

Le facteur RMS croît en fonction de la vitesse. **Le facteur Kurtosis** réagit très bien aux fréquences de rotation proche de 1000 tr/min. A basses et hautes vitesses, il décroît car le signal est moins marqué, moins amplifié par le défaut. C'est-à-dire que l'amplitude générée par le défaut à hautes vitesses ne se distingue pas nettement du bruit de fond, et à basses vitesses, aucune accélération n'est générée. **Le Facteur Crête** réagit similairement au Kurtosis, il réagit bien sur la plage 500 tr/min à 2200 tr/min.

2.5. Analyse temporelle du banc de fatigue en émission acoustique

L'analyse temporelle du banc à l'aide de l'émission acoustique est plus complexe car il est nécessaire de reconstruire le signal à partir de toutes les formes d'onde enregistrées. La reconstruction impose de former le signal en fonction des temps d'amorçage de chaque forme d'onde. La reconstruction fait apparaître des zones nulles entre chaque forme d'onde ce qui va donner des incohérences à basses vitesses du facteur Kurtosis et du Facteur Crête.

Pour une raison de stockage, l'étude en émission acoustique porte sur un nombre inférieur de vitesses à celui de l'analyse vibratoire. L'important est de repérer la frontière entre l'incohérence des résultats et le fonctionnement de ceux-ci.

Fréquence de rotation (tr/min)	RMS	K	F. Crête
1	0,0014	283,05	35,15
3	0,0018	189,38	35,64
10	0,0024	74,86	21,39
50	0,0118	17,14	9,58
100	0,0154	41,26	28,46
200	0,0096	98,06	20,59
1000	0,0189	13,71	11,41
2000	0,0466	15,33	10,72

Tableau 7 : Facteurs temporels pour l'émission acoustique en fonction des vitesses définies

Comme cité préalablement, les résultats (*Tableau 7*) vérifient la théorie de chaque facteur. Les facteurs RMS (*Figure 31*), Kurtosis (*Figure 32*) et Facteur Crête (*Figure 33*)

donnent une valeur à la représentation du signal, cependant, le fait de reconstruire un signal à partir de salves implique d'avoir des zones nulles et cela est plus probant à faibles vitesses.

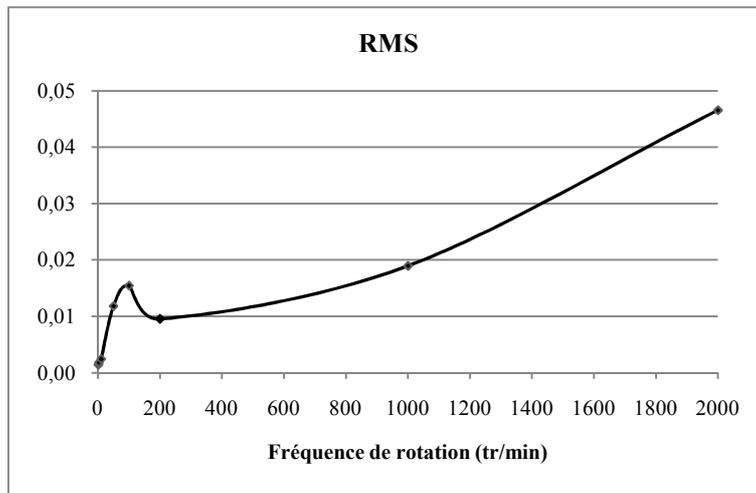


Figure 31 : Représentation du facteur RMS à partir des signaux d'émission acoustique

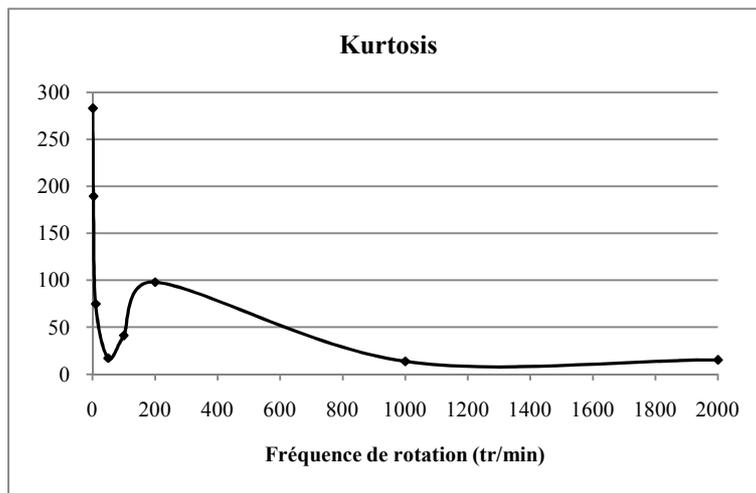


Figure 32 : Représentation du facteur Kurtosis à partir des signaux d'émission acoustique

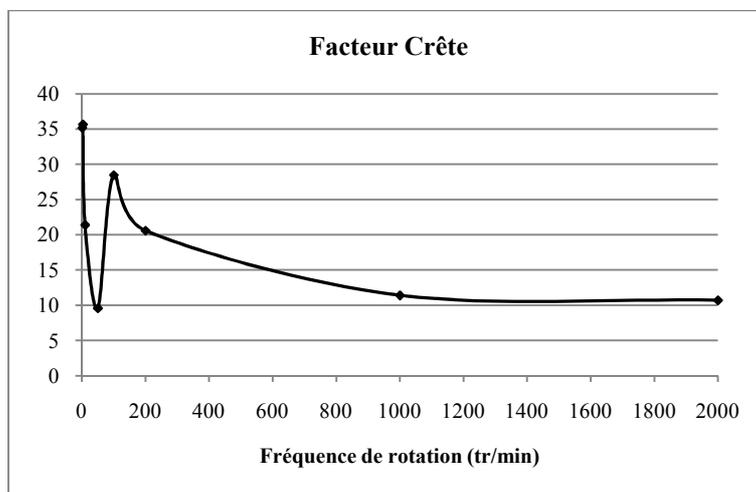


Figure 33 : Représentation du facteur crête à partir des signaux d'émission acoustique

A basses fréquences de rotation, le **facteur Kurtosis** est très élevé car le signal est très marqué avec des plages nulles et des regroupements de salves. Le **Facteur Crête** suit une évolution semblable. Ces deux facteurs ne réagissent pas convenablement selon la reconstruction du signal. Seul le **facteur RMS** évolue progressivement en fonction de la fréquence de rotation.

2.6. Etude à 3 tr/min

2.6.1. Emission acoustique

Dans le premier chapitre, l'émission acoustique a l'avantage de détecter les ondes aux faibles fréquences de rotation. Pour l'étude, le choix s'est porté sur la vitesse de 3 tr/min. La reconstruction du signal permet de faire apparaître des zones de détection du défaut. Ces zones peuvent être assimilées au passage de la bille dans le défaut.

Etude des signaux bruts d'émission acoustique (*Figure 34*)

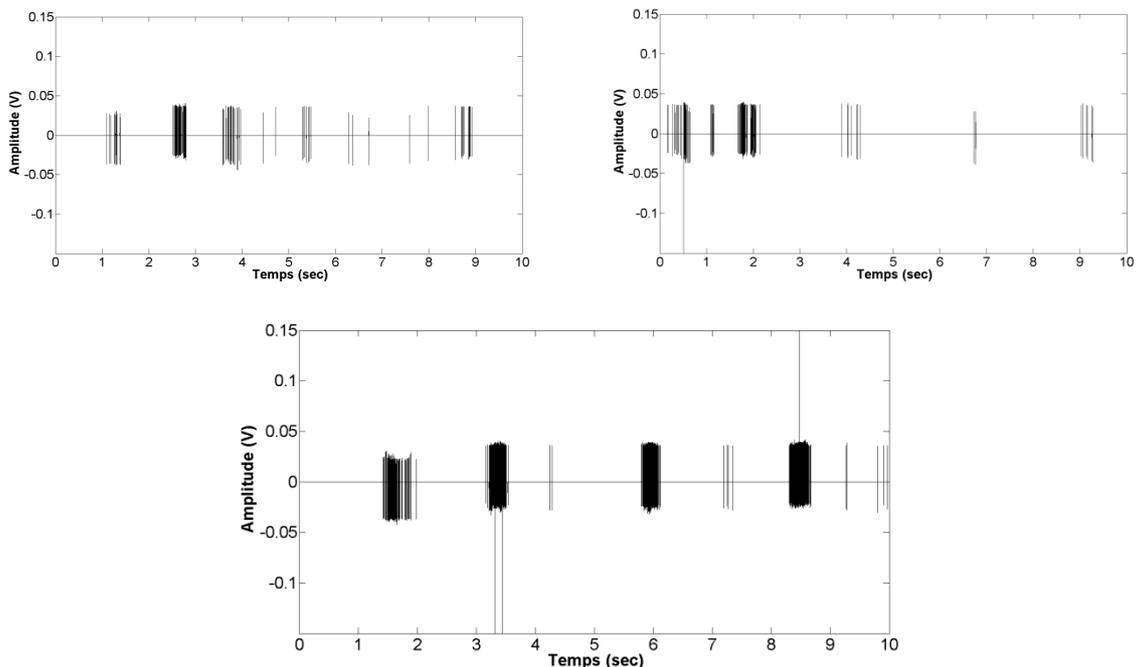


Figure 34 : Signaux bruts d'émission acoustique à 3 tr/min

Le calcul des durées théoriques de défauts en secondes à 3 tr/min donne :

Le temps de passage de la bille, dans le défaut de 5 mm de longueur, est de 0.65 sec.

L'intervalle entre chaque passage de bille est de 1.81 sec.

Après étude de chaque signal, la moyenne des longueurs de défaut est d'environ 0.41 sec et la moyenne des intervalles est d'environ 1.43 sec.

La sensibilité de l'émission acoustique fait apparaître un écart de quelques dixièmes de secondes qui peut provenir d'un défaut : de l'exactitude de la fréquence de rotation, de la charge, ou de la cinématique du banc.

FFT [0-1MHz] (Figure 35)

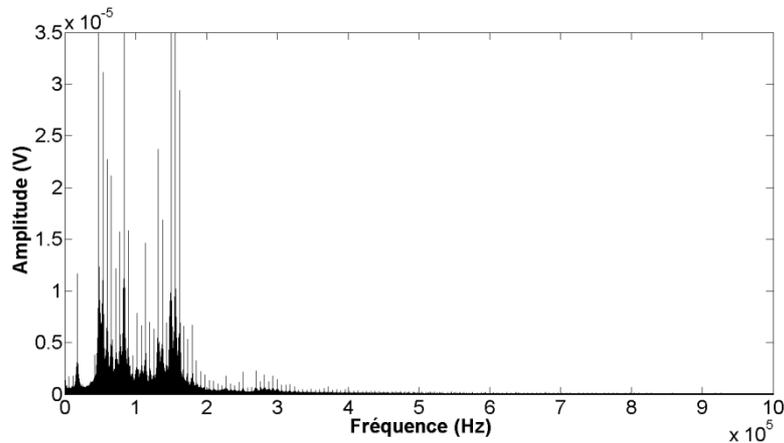


Figure 35 : FFT [0-1M Hz] d'un signal d'émission acoustique à 3 tr/min

Spectre enveloppe [0-20 Hz] (Figure 36)

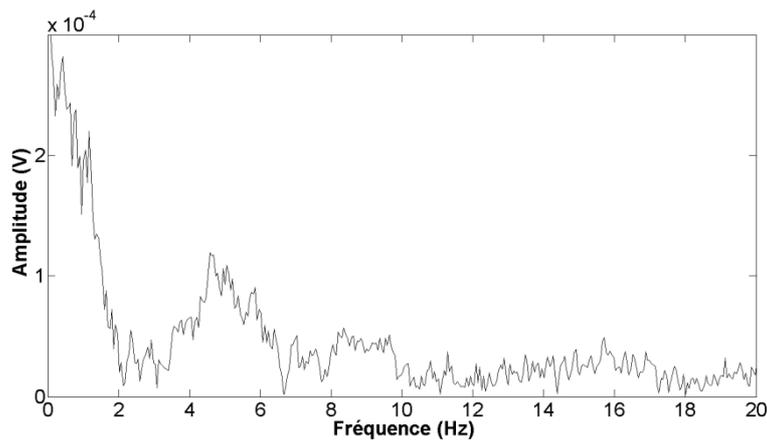


Figure 36 : Spectre enveloppe [0-20 Hz] d'un signal d'émission acoustique à 3 tr/min

L'étude des signaux à 3tr/min par l'intermédiaire de l'analyse spectrale (Figure 36) est impossible à réaliser.

La détection de défaut à basse vitesse avec la méthode de l'analyse par **émission acoustique est envisageable**. Cette méthode est très sensible et permet de faire apparaître les évènements liés au défaut. Elle permet de détecter et de quantifier la taille du défaut. Sur le signal brut, des évènements regroupés sont assimilables à la taille du défaut et ont une répétition qui équivaut au temps de passage de chaque bille dans le défaut. Cependant, il n'est pas possible d'exploiter les spectres enveloppe (*Figure 36*), car aucune raie ni harmonique n'apparaît aux fréquences caractéristiques de défaut.

2.6.2. Analyse vibratoire

L'analyse vibratoire à 3 tr/min donne les signaux bruts suivants :

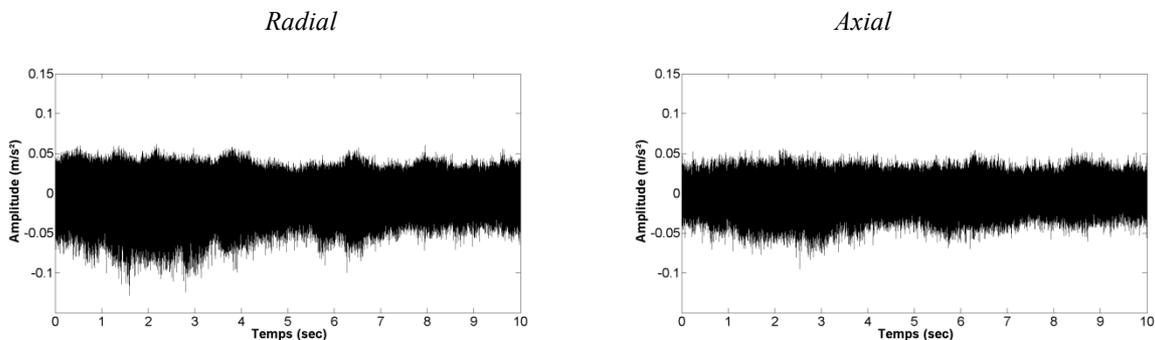


Figure 37 : Signaux bruts d'analyse vibratoire à 3 tr/min

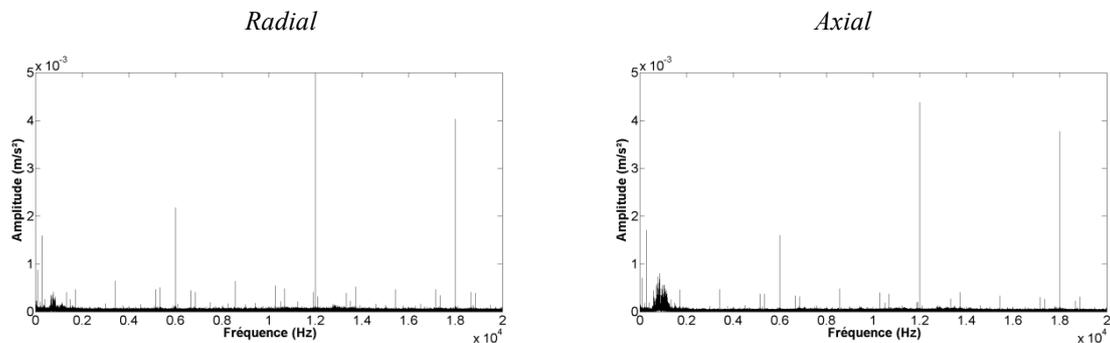


Figure 38 : FFT [0-20 kHz] d'un signal d'analyse vibratoire à 3 tr/min

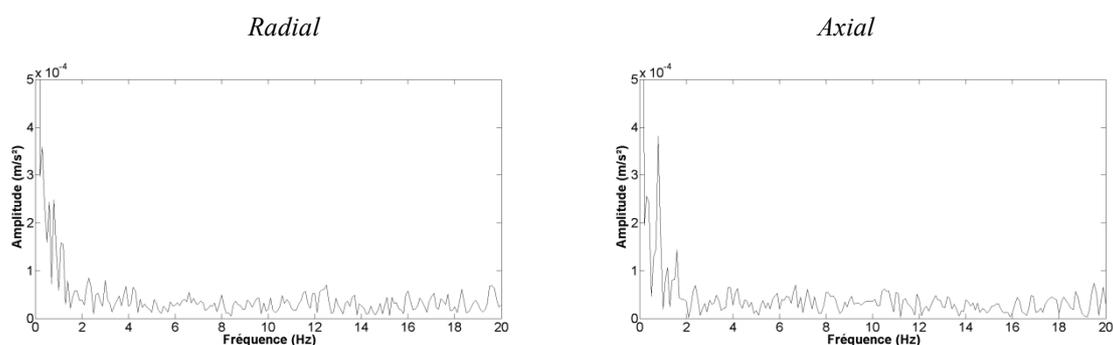


Figure 39 : Spectre enveloppe [0-20 Hz] d'un signal d'analyse vibratoire à 3 tr/min

Cette étude à 3 tr/min fait apparaître la non-efficacité de l'analyse vibratoire à faible vitesse. La fréquence de rotation est si faible qu'elle ne génère pas d'accélération provenant du passage de la bille dans le défaut. Cela est très visible dans les signaux bruts (*Figure 37*). L'analyse fréquentielle (*Figure 38* et *Figure 39*) n'est par conséquent pas concluante pour le diagnostic à faible vitesse en analyse vibratoire et en émission acoustique.

2.6.3. Résultats

Le premier résultat important réside sur la détection à faible vitesse. La meilleure technique est **l'émission acoustique**, cette technique permet de détecter les ondes acoustiques se propageant dans le roulement.

Les signaux bruts en émission acoustique font apparaître des zones de détection d'évènements. Ces évènements peuvent être rapprochés de la durée de passage de la bille dans le défaut (*Figure 40*).

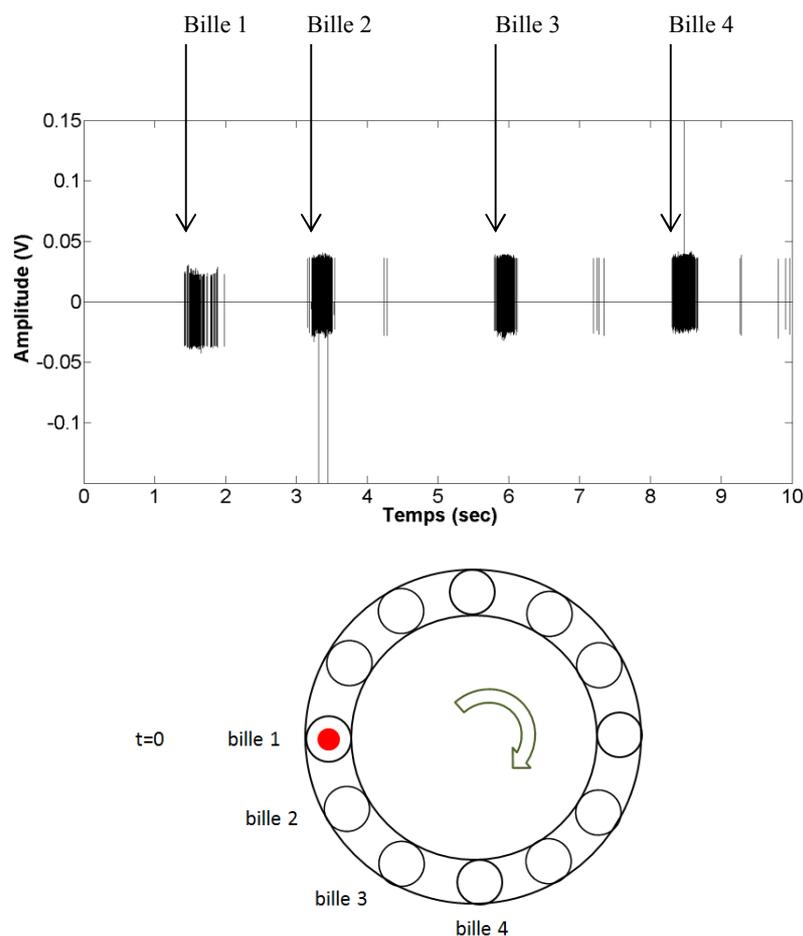


Figure 40 : Interprétation d'un signal d'émission acoustique à 3 tr/min

Après étude de chaque signal (*Figure 40*),

La moyenne des longueurs de défaut est d'environ 0.41 sec.

La moyenne des intervalles est d'environ 1.43 sec.

L'inconvénient de cette méthode est la difficulté de reconstruire le signal complet d'environ 10 secondes. A 3 tr/min, la durée pour la réalisation d'un tour complet est de 20 secondes.

Les essais en émission acoustique ont tous été réalisés à une fréquence d'échantillonnage de 2 MHz, ce qui donne pour un tour de 20 sec, un nombre de points de 40 000 000 points. Le signal ci-dessus contient environ 20 000 000 points. Cette caractéristique devient un souci car elle s'approche des limites du système de traitement informatique et donc l'information devient incomplète.

En ce qui concerne la méthode **d'analyse vibratoire**, elle n'est pas adaptée pour les faibles vitesses. Le signal brut donne uniquement un bruit de fond, aucun évènement ne ressort de ce signal et surtout aucune périodicité n'est retrouvée dans celui-ci.

L'analyse vibratoire fonctionne sur la détection des vibrations engendrées par le défaut du roulement. La fréquence de rotation étant très faible, elle ne permet pas de générer des accélérations, de ce fait, cette méthode n'est pas adaptée. Dans ce type de mesure, même avec une charge plus élevée, le résultat n'aurait pas permis de montrer le défaut.

Dans le cas d'un diagnostic de défaut d'une étude des fréquences caractéristiques, l'analyse spectrale pour l'émission acoustique et l'analyse vibratoire n'est pas concluante à faible vitesse.

2.7. Etude à 2000 tr/min

L'étude à 2000 tr/min a pour objectif de faire apparaître la meilleure méthode de diagnostic de défaut. Le choix de cette vitesse est la plus appropriée car la fréquence de rotation de banc maximale est de 3000 tr/min. La fréquence de rotation doit se trouver sur une plage de 500 tr/min à 2500 tr/min pour éviter les échauffements aux vitesses maximales.

2.7.1. Emission acoustique

Etude des signaux bruts d'émission acoustique (*Figure 41*)

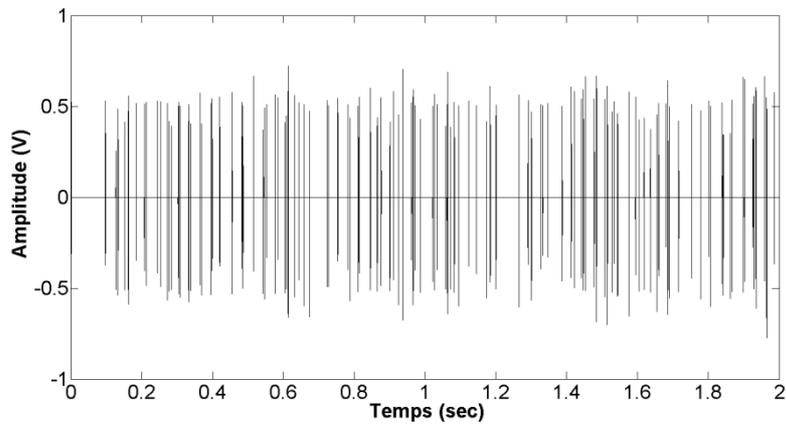


Figure 41 : Signal brut d'émission acoustique à 2000 tr/min

FFT [0 - 1 MHz] (*Figure 42*)

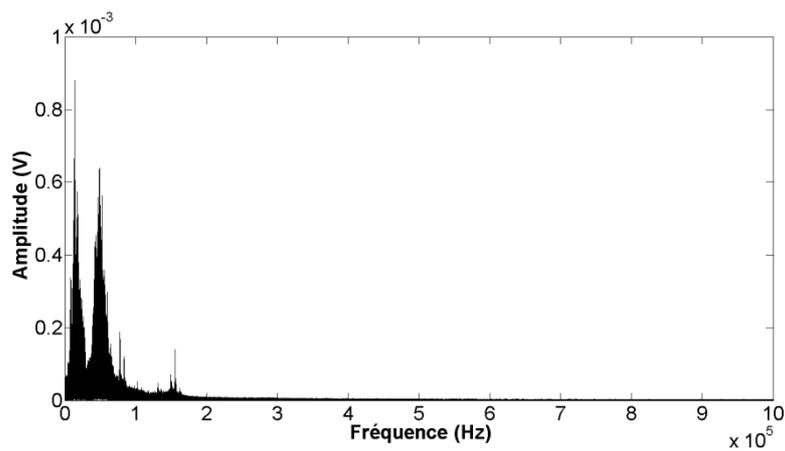


Figure 42 : FFT [0 - 1MHz] d'un signal d'émission acoustique à 2000 tr/min

Le spectre fait apparaître la fréquence de résonance du capteur proche de 75 kHz.

Spectre enveloppe [0 - 1000 Hz]

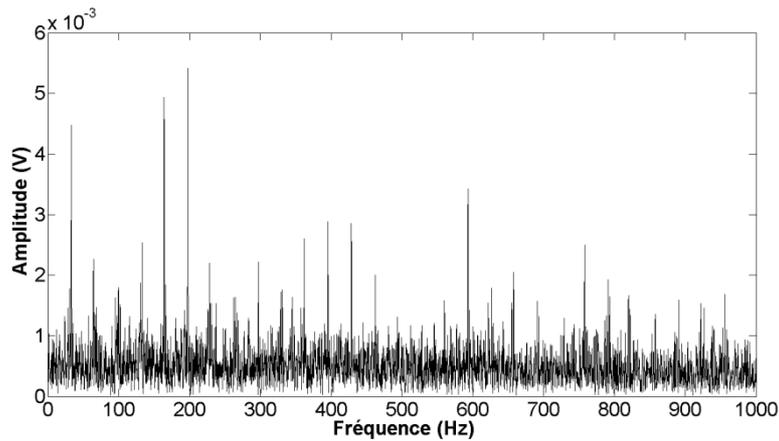


Figure 43 : Spectre enveloppe [0 - 1000 Hz] d'un signal d'émission acoustique à 2000 tr/min

Le spectre (Figure 43) fait apparaître les fréquences caractéristiques de défaut à la fréquence de rotation de 2000 tr/min ainsi que la fréquence de rotation de défaut.

2.7.2. Analyse vibratoire

L'analyse vibratoire à 2000 tr/min donne les signaux bruts suivants :

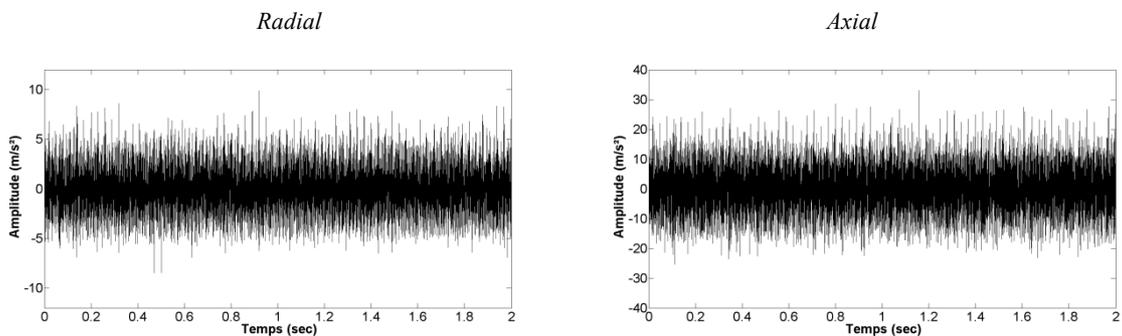


Figure 44 : Signaux bruts d'analyse vibratoire à 2000 tr/min

Les signaux bruts (Figure 44) ne font pas ressortir des événements énergétiques dus au défaut du roulement.

FFT [0-20 kHz] (Figure 45)

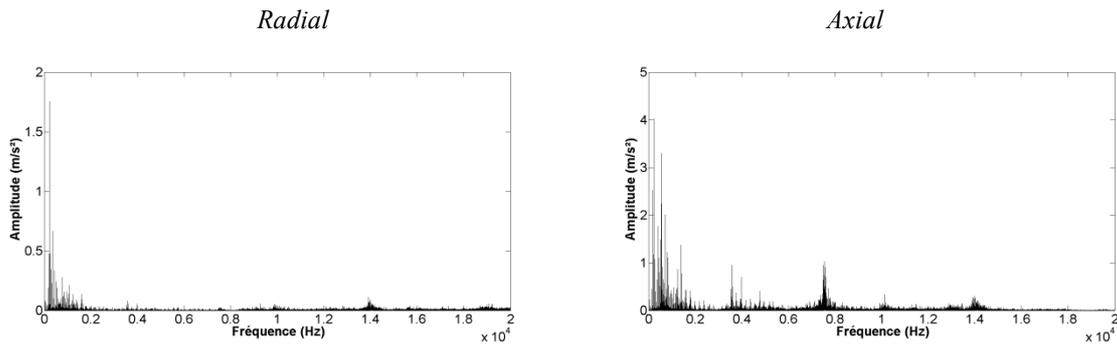


Figure 45 : FFT [0 - 20 kHz] des signaux d'analyse vibratoire à 2000 tr/min

Spectre enveloppe [0-1000 Hz] (Figure 46)

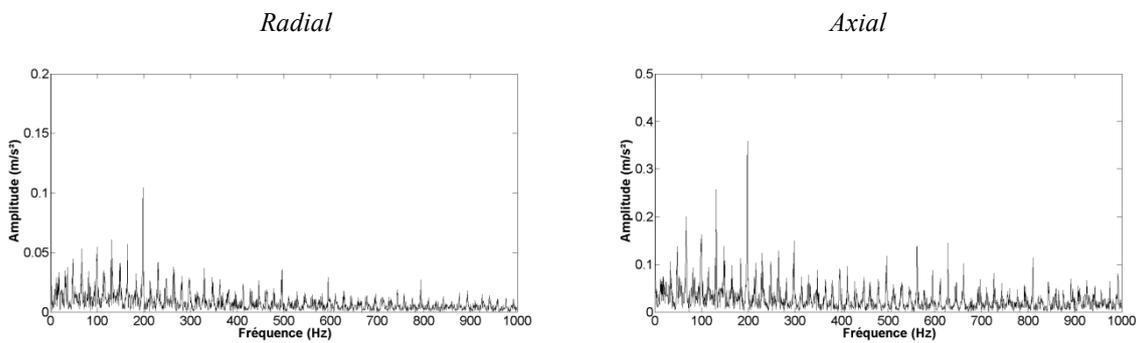


Figure 46 : Spectre enveloppe [0 - 1000 Hz] des signaux d'analyse vibratoire à 2000 tr/min

Le spectre (Figure 46) fait apparaître les fréquences caractéristiques de défaut pour les deux capteurs à la fréquence de rotation de 2000 tr/min ainsi que la fréquence de rotation de défaut.

2.7.3. Résultats

Les résultats portent sur la corrélation entre les 2 méthodes.

Les essais ont été réalisés à partir d'un roulement avec un écaillage naturellement sur une bague.

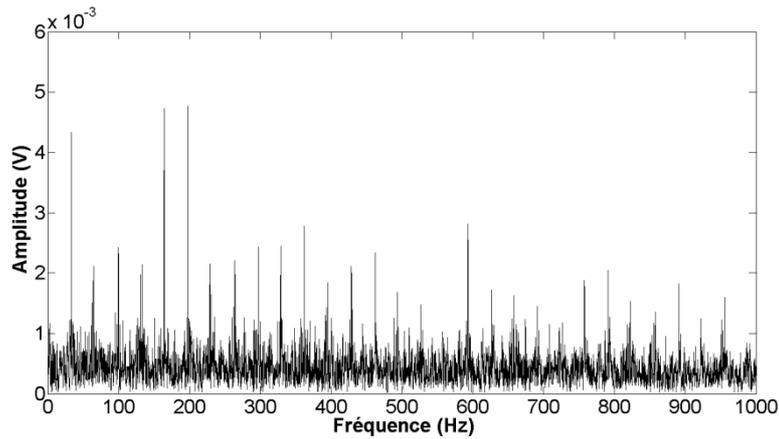


Figure 47 : Spectre enveloppe d'un signal en émission acoustique à 2000 tr/min

Les fréquences caractéristiques de défaut à 200 Hz ainsi que de rotation à 33 Hz sont visibles (Figure 47).

Des harmoniques sont visibles autour des fréquences caractéristiques de défaut de bague à 200 Hz, 600 Hz et 800 Hz.

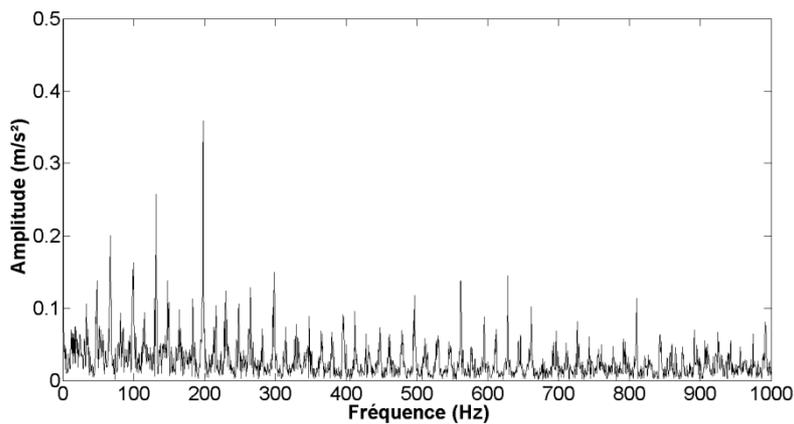


Figure 48 : Spectre enveloppe d'un signal en analyse vibratoire (axial) à 2000 tr/min

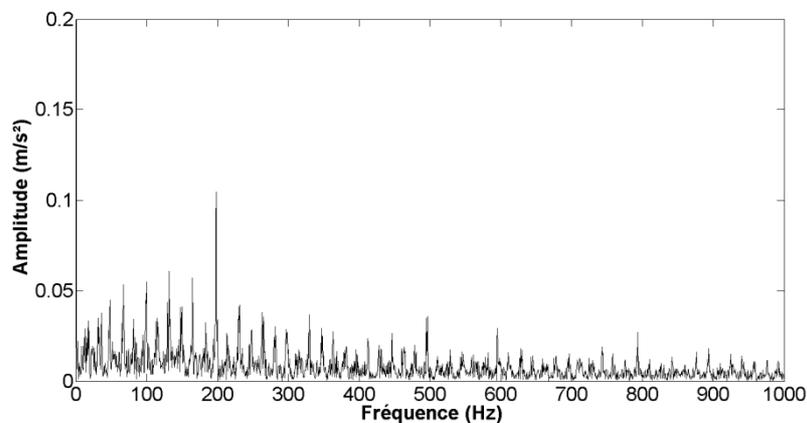


Figure 49 : Spectre enveloppe d'un signal en analyse vibratoire (radial) à 2000 tr/min

Sur les graphes d'analyse vibratoire (*Figure 48* et *Figure 49*), une seule harmonique est visible à 200 Hz, les autres ne sont pas distinctes. Des raies sont représentées aux fréquences caractéristiques (*Tableau 8*) de rotation à 33 Hz.

Vitesse (tr/min)	2000
Vitesse (Hz) =	33.33
f_r	
f_{be}	200
f_{bi}	200
$f_{ér}$	229.17
f_c	16.67

Tableau 8 : Rappel des fréquences caractéristiques de défaut à 2000 tr/min pour une butée à billes 51207

Cette analyse à 2000 tr/min permet de montrer la similitude entre les deux méthodes. Elles permettent de faire apparaître les fréquences caractéristiques du défaut sur une bague à 200 Hz à partir des spectres enveloppes. Après lecture de ces spectres réalisés via les deux méthodes, des harmoniques sont visibles aux fréquences de 200 Hz, ainsi que des raies aux fréquences de 33 Hz qui correspondent à la fréquence de rotation du banc.

Cependant, **la méthode d'analyse par émission acoustique est plus précise** dans l'analyse des fréquences de défaut **que l'analyse par analyse vibratoire.**

2.8. Conclusion

L'étude présentée dans ce chapitre est très intéressante sur plusieurs points.

Premièrement, l'étude vibratoire et acoustique des signaux avec la méthode d'analyse temporelle, plus exactement avec les facteurs RMS, Kurtosis et Facteur Crête, fait apparaître un manque de fiabilité pour le Kurtosis et le Facteur Crête en émission acoustique. Le fait de réaliser une reconstruction de formes d'onde fait apparaître des zones nulles entre chaque évènement. Cette reconstruction de signal fait apparaître une incohérence à la basse vitesse de ces signaux. La limite de cohérence de ces facteurs est aux environs des 100 tr/min. Ces facteurs sont acceptables en analyse vibratoire et montrent un pic à 1000 tr/min.

Deuxièmement, **à la faible vitesse de rotation**, l'émission acoustique révèle, à partir des signaux bruts, des zones de détection de défauts, de décharges dues à la charge axiale exercée sur le roulement et dues aussi à la fréquence de rotation.

Ces zones sont quasiment semblables aux zones de passage des billes dans le défaut. La durée de passage d'une bille dans ce défaut de 5 mm doit être théoriquement de 0.65 sec à 3 tr/min. Cependant, la moyenne des longueurs de défauts sur les 3 signaux est d'environ de 0.41 sec. Cette moyenne est calculée sur les zones caractéristiques car sur les signaux apparaissent des évènements courts et brefs qui sont dus à du picage sur les bagues ou billes du roulement. L'intervalle théorique entre chaque zone est de 1.81 sec. L'étude des signaux bruts donne un intervalle moyen de 1.43 sec.

La différence entre la théorie et la moyenne des durées mesurées à partir des signaux bruts est d'environ 30%. Cette erreur peut être due à plusieurs phénomènes qui sont :

- La fréquence de rotation en dessous de 0.5 Hz (30 tr/min) n'est pas certifiée.
- Le défaut étant sur la bague tournante, les ondes acoustiques se propagent dans les billes jusqu'à la bague fixe. Le capteur se trouvant au niveau de la bague fixe peut être perturbé par des ondes dont la propagation passe par plusieurs éléments.
- Durant la phase d'essais, la fréquence de rotation n'est pas toujours constante, la broche tourne en saccade à très faible vitesse.

Une autre interrogation pourrait être la cause de ce décalage. Sur le banc, le phénomène d'un déversement de bague (*Figure 50*) semble être fortement présent. C'est-à-

dire qu'il y aurait, éventuellement, un défaut de placage de la bague fixe de la butée à billes sur le chemin de billes.

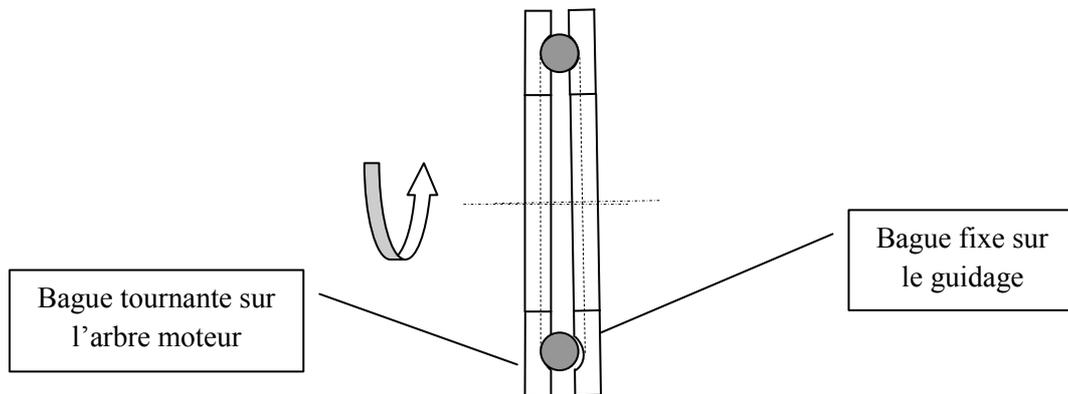


Figure 50 : Phénomène de déversement de bague

Pour finir à **moyenne vitesse**, les résultats sont similaires, aussi bien en analyse vibratoire qu'en émission acoustique, les spectres enveloppes dévoilent les fréquences caractéristiques de rotation (33 Hz) et les fréquences caractéristiques de défaut sur une bague (200 Hz).

Dans le cas du diagnostic à 2000 tr/min, la méthode qui paraît être la plus pertinente est l'émission acoustique.

L'étude vibratoire et acoustique du banc à chaque vitesse permet de définir les limites de détection des deux méthodes. **La limite d'analyse pour réaliser un diagnostic des spectres fréquentiels pour l'analyse vibratoire est d'environ 400 tr/min.** En dessous de cette vitesse, il est difficile de réaliser un diagnostic précis de l'état du roulement. **Dans le cas de l'émission acoustique, la limite se trouve à environ 50 tr/min.** En dessous de celle-ci le diagnostic est très difficile.

3. Conditioning monitoring vue par l'Université de Cranfield

3.1. Introduction

3.1.1. Intérêts

L'étude réalisée à l'Université de Cranfield a pour objectif de montrer les limites des deux méthodes sur 3 types différents de roulement. La théorie de l'émission acoustique consiste à mesurer la propagation des ondes acoustiques dans un matériau. Il est intéressant d'étudier le phénomène de propagation des ondes à travers les roulements. De ce fait, l'étude va porter sur un roulement sain, un roulement avec un défaut en bague intérieure et un roulement avec un défaut en bague extérieure.

La première étude permet de définir la corrélation entre l'analyse vibratoire et l'émission acoustique (*Annexe 4*). L'Université de Cranfield étant à la pointe au niveau de l'émission acoustique, elle est énormément sollicitée pour le test de nouveaux appareils de Contrôle Non Destructif en émission acoustique. L'appareil mis à disposition est un appareil industriel qui fonctionne sur le principe de l'émission acoustique, il a pour avantage de donner une information rapide d'un élément.

La seconde étude réalisée, en fonction des signaux mesurés, porte sur les indicateurs en émission acoustique (*Annexe 5*). Les appareils d'acquisition en émission acoustique donnent l'évolution de plusieurs facteurs typiques de cette méthode. Ces facteurs correspondent à la forme du signal et à l'énergie de celui-ci.

Ce travail a pour but de réaliser une classification des facteurs les plus pertinents dans l'optique d'effectuer des mesures selon les défauts de roulement.

3.1.2. Protocole de mesure

L'Université de Cranfield a mis à disposition 3 types de roulements :

- Un roulement avec un défaut sur la bague externe nommé B1 pour la suite du rapport.
- Un roulement sain nommé B2.

- Un roulement avec un défaut sur la bague interne nommé B3.

Les charges radiales exercées sur le roulement et les fréquences de rotation ont été définies avec le Professeur Mba.

Les fréquences de rotation définies sont 1000 tr/min et 2000 tr/min. Le banc sur lequel les essais ont été réalisés ne permet pas de réaliser des mesures précises à faibles vitesses.

Les charges définies sont 0 daN, 394 daN et 788 daN.

Chacun des roulements a un défaut de largeur 4 mm et ce défaut a été réalisé manuellement.

Pour le protocole de mesure, il a été décidé de réaliser 4 conditions différentes en accord avec le Professeur Mba. Ces conditions sont décrites ci-dessous avec la position des capteurs de chaque appareil de contrôle.

La nomination des capteurs est la suivante (*Figure 51*) :

V : capteur d'analyse vibratoire.

EA : capteur d'émission acoustique.

H : capteur de l'appareil industriel d'émission acoustique.



Figure 51 : Position des capteurs sur le bloc roulement

Condition B1 :

La condition 1 (*Figure 52*) est réalisée avec le roulement B1, roulement disposant d'un défaut sur la bague externe. Cette bague est fixe, le défaut a été positionné en haut du roulement, proche des capteurs V et EA.

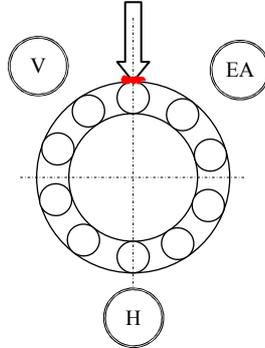


Figure 52 : Schéma de la condition B1 avec la disposition des capteurs V, EA et H

Condition B1B :

La condition B1B (*Figure 53*) est toujours réalisée avec le roulement B1. Cependant, dans cette condition, le défaut a été positionné en bas du roulement, proche du capteur H.

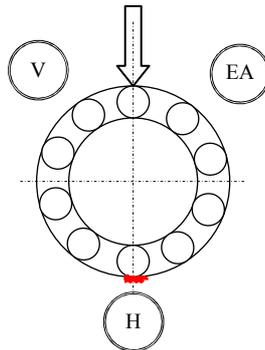


Figure 53 : Schéma de la condition B1B avec la disposition des capteurs V, EA et H

Condition B2

La condition B2 (*Figure 54*) est réalisée avec le roulement B2, roulement sans défaut.

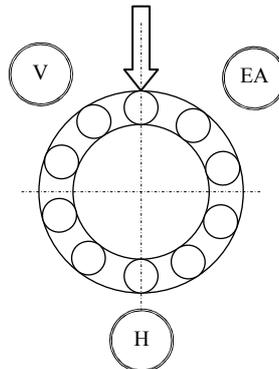


Figure 54 : Schéma de la condition B2 avec la disposition des capteurs V, EA et H

Condition B3

La condition B3 (*Figure 55*) est réalisée avec le roulement B3, roulement disposant d'un défaut sur la bague interne.

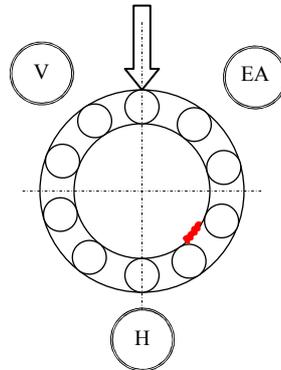


Figure 55 : Schéma de la condition B3 avec la disposition des capteurs V, EA et H

Le choix de l'ordre des essais s'est fait avec le Professeur Mba. Lors des premiers essais, quelques problèmes ont été rencontrés sur le banc à forte vitesse et à forte charge. Ainsi, il a été décidé de réaliser les mesures en réduisant les charges puis la vitesse.

Ordre des mesures (condition 1,2, 3 et 4) :

Vitesse 2000 tr/min	>	Charge 788 daN
Vitesse 2000 tr/min	>	Charge 394 daN
Vitesse 2000 tr/min	>	Charge 0 daN
Vitesse 1000 tr/min	>	Charge 788 daN
Vitesse 1000 tr/min	>	Charge 394 daN
Vitesse 1000 tr/min	>	Charge 0 daN

Pour chacune des mesures, il a été décidé de réaliser 6 enregistrements de signaux pour chaque appareil.

3.2. Présentation du banc ainsi que des roulements

3.2.1. Présentation du banc

Le banc (*Figure 56*) permet de tester des roulements de type COOPER SPLIT 01C/40GR. Il permet de réaliser des essais à charge variable et vitesse variable. La charge radiale maximale qui peut être exercée sur le roulement est de 3940 daN [MORH 03].



Figure 56 : Présentation du banc (Université de Cranfield)

3.2.2. Présentation des roulements avec calculs des fréquences caractéristiques

Ce type de roulement est fréquemment rencontré dans le domaine de l'aéronautique et de l'énergie. Il est beaucoup utilisé pour la rotation d'arbres très volumineux comme des turbines. Il a l'avantage d'accepter de fortes charges et surtout de permettre des démontages et remontages sans démonter l'arbre complet.

Caractéristiques du roulement :

Nombre d'éléments roulants	$Z = 10$
Diamètre de l'élément roulant (rouleau)	$d = 12 \text{ mm}$
Diamètre moyen	$D = 72 \text{ mm}$
Angle de contact	$\alpha = 0^\circ$

Le roulement est constitué de plusieurs éléments :

- La bague interne est composée de 2 pièces principales qui correspondent à la piste de roulement des rouleaux. Les 4 autres pièces permettent de brider les 2 pièces précédentes sur l'arbre (*Figure 58*).
- La cage de rouleaux est composée de 4 éléments, 2 demi-cages qui sont liées entre-elles par 2 unions à clipser au montage (*Figure 58*).
- La bague externe est composée de 2 pièces principales qui correspondent à la piste de roulement des rouleaux. Le tout est introduit dans un bloc roulement en fonte. Ce bloc permet de faire la liaison entre le vérin qui exerce la force radiale et le roulement (*Figure 57*).



Figure 57 : Eclaté d'un roulement COOPER SPLIT 01C/40GR



Figure 58 : Défaut artificiel réalisé sur la bague interne

Calcul des fréquences caractéristiques de défauts pour les vitesses de 1000 et 2000 tr/min (*Tableau 9*).

Vitesse (tr/min)	1000	2000
Vitesse (Hz) = f_r	16.67	33.33
f_{be}	69.44	138.89
f_{bi}	97.22	194.44
$f_{\dot{e}r}$	97.22	194.44
f_c	6.94	13.89

Tableau 9 : Fréquences caractéristiques de défaut pour roulement 01C/40GR

3.3. Instrumentation

3.3.1. Emission acoustique

L'Université de Cranfield réalise des études en émission acoustique avec un appareil de la gamme Physical Acoustic. L'appareillage fonctionne sur le principe de l'enregistrement d'ondes acoustiques en continu, c'est-à-dire, lors du paramétrage, il ne nécessite d'aucun seuil. Cependant, les paramètres HDT, PDT et HLT ont une plus grande importance pour l'enregistrement des formes d'onde.

Le préamplificateur (*Figure 59*) utilisé pour les essais est réglé sur 40 dB, il permet d'améliorer le signal voulu tout en prenant en compte les conditions environnementales (bruit ambiant, matériau).

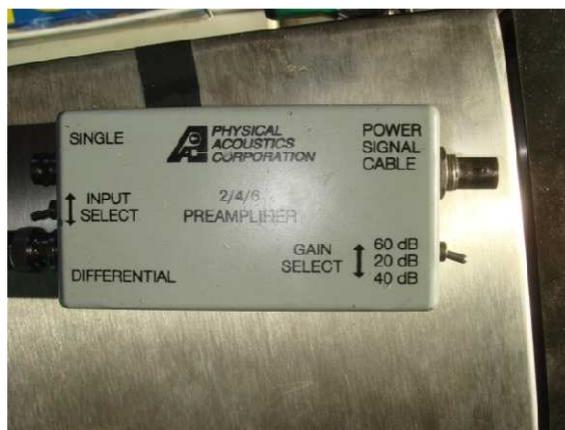


Figure 59 : Préamplificateur EA

Les mesures ont été prises avec un capteur large bande, la gamme de fréquence est de 100 kHz à 1 MHz.

L'acquisition des informations se fait avec le logiciel AE WIN, elles sont exploitables à partir de 2 types de fichiers (.dat) et (.fws).

La première méthode, privilégiée par l'Université de Cranfield, est d'extraire à partir des fichiers (.dat), les différents facteurs en émission acoustique qui sont : COUNTS, RMS, ASL, ABSOLUTE ENERGY et AMPLITUDE. Cette méthode permet de donner les informations sur l'évolution du défaut dans le temps et elle est surtout plus simple à traiter et à analyser.

La seconde méthode consiste à travailler à partir des fichiers (.fws), elle permet d'acquérir des formes d'onde et de réaliser des fichiers en (.txt) dans le but de les exploiter par la suite avec Matlab. Cette méthode est peu utilisée par l'Université de Cranfield.

3.3.2. Analyse vibratoire

L'appareil en analyse vibratoire utilisé pour la phase d'essais est le Picoscope 4424 (Figure 60). C'est un appareil généraliste, il permet de réaliser des mesures en émission acoustique, en analyse vibratoire et en température. Cet appareillage est énormément utilisé dans le domaine automobile.

La partie essentielle de cet appareil est le capteur, il définit la forme du signal voulu et surtout le type de mesure escompté. Le paramétrage du logiciel d'acquisition est assez simple d'utilisation. Les paramètres importants sont le nombre d'échantillons désiré et la durée d'acquisition du signal. Ces deux paramètres ont une incidence sur la résolution du signal et surtout sur la gamme de fréquence voulue.

Le nombre d'échantillons peut être paramétré de quelques échantillons à quelques Méga échantillons ainsi que la durée d'acquisition qui peut aller de quelques secondes à quelques millisecondes.

Le capteur utilisé est un accéléromètre réf 623C01. La gamme de fréquences est de 0.8 kHz à 15 kHz.

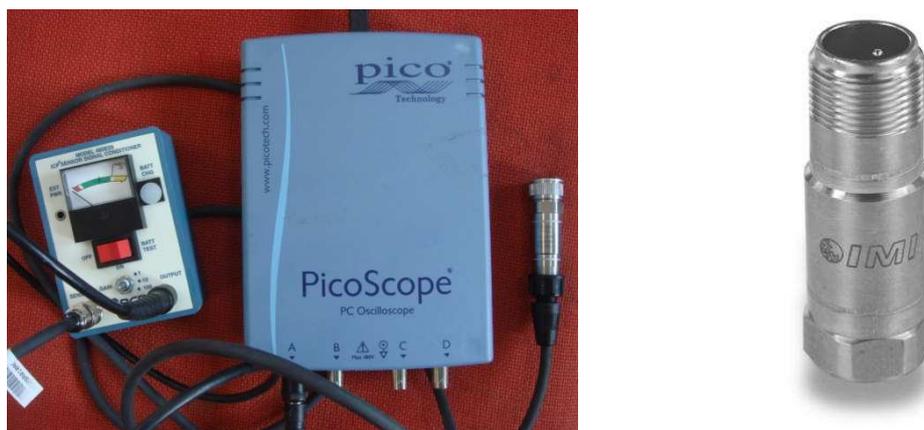


Figure 60 : Système d'acquisition PicoScope 4424 avec le capteur réf 623C01

3.3.3. Horlroyd Instrument

L'appareil Holroyd Instrument (*Figure 61*) fonctionne sur le principe de l'émission acoustique. Son intérêt est totalement différent car il ne permet pas de réaliser un diagnostic précis de l'état de la machine, il donne uniquement l'information de 2 indicateurs, le Distress et le Décibel.



Figure 61 : Système d'acquisition Holroyd

Le Distress

Le niveau de Distress correspond à un niveau de relâchement de contrainte. Cet indicateur a été développé par l'entreprise Horoyd, il permet de donner une indication rapide de l'état du roulement. Lorsque que cet indicateur est supérieur à 10, le roulement est défectueux. Lorsqu'il est inférieur à 10, le roulement est en bonne santé.

Le Décibel

La mesure du Décibel donne une évolution du niveau de bruit dans l'organe mesuré. Cet indicateur est très intéressant pour réaliser de la surveillance périodique et donc, surveiller une évolution de ce niveau de bruit.

3.4. Résultats

3.4.1. Méthode de l'émission acoustique

En émission acoustique, l'Université de Cranfield travaille principalement sur l'exploitation des facteurs en émission acoustique (RMS, ASL, ABSOLUTE ENERGY, ...), l'étude est portée sur l'évolution de chacun des indicateurs. Cette méthode apporte une bonne indication de l'évolution du signal dans le temps ou suivant les conditions.

Ces facteurs sont exploités à partir des fichiers (.dat) extraits à partir du signal mesuré.

Les facteurs travaillés pour l'étude sont :

- RMS (volts).
- ABS Energy (Joules).
- Counts.
- ASL (Décibel).
- Amplitude (Volts).

Les fichiers (.dat) ne permettent pas d'obtenir le signal brut. Ce fichier permet d'obtenir le récapitulatif de tous les indicateurs cités ci-dessus suivant le temps. Cependant, à partir du logiciel d'acquisition, il est possible d'obtenir le signal brut d'une forme d'onde en (.txt) à partir des fichiers (.fws). Une fois obtenu, il est possible de traiter chaque signal dans le domaine fréquentiel et temporel.

Cette partie montre l'évolution de chaque facteur, obtenu en émission acoustique. Les tracés représentés (*Figure 62, Figure 63, Figure 64, Figure 65 et Figure 66*) sont ceux des facteurs cités ci-dessus,

RMS

Le RMS, comme cité préalablement, est une indication de l'énergie du signal émis par la source acoustique. Le tableau (*Tableau 10*) donne l'évolution de cette énergie en fonction du type de roulement et des conditions de mesures.

	B1	B1B	B2	B3
S1L1	0.00648	0.00744	0.00551	0.00518
S1L2	0.00826	0.00897	0.00643	0.00549
S1L3	0.00961	0.00969	0.00675	0.00605
S2L1	0.02807	0.01389	0.01513	0.01778
S2L2	0.02950	0.02001	0.01874	0.02717
S2L3	0.03196	0.02182	0.01774	0.02928

Tableau 10 : Evolution du facteur RMS à partir des fichiers dat

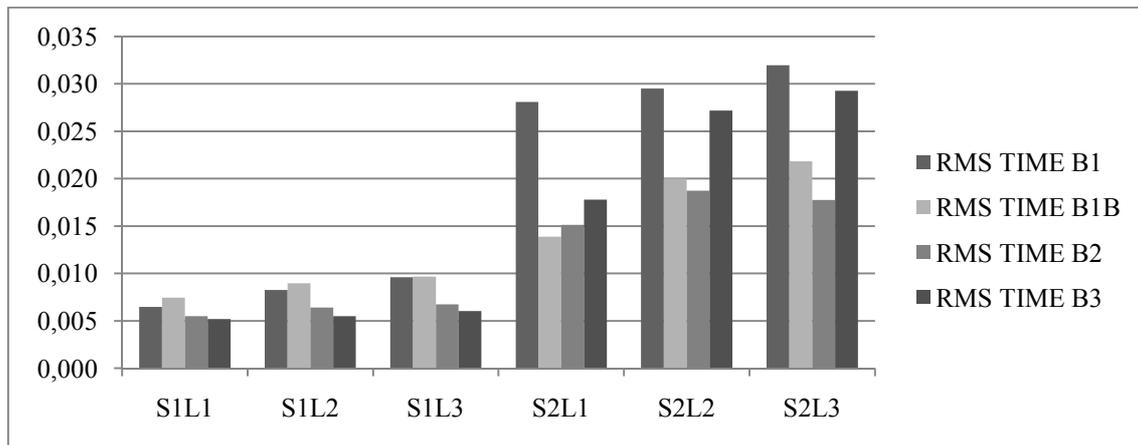


Figure 62 : Evolution du facteur RMS à partir des fichiers dat

Le facteur RMS réagit bien dans le cas d'un roulement avec un défaut sur la bague externe en position haute, donc proche du capteur, et d'un défaut sur la bague interne du roulement. Le facteur ne réagit pas dans le cas du défaut externe en position basse du roulement.

Il réagit mieux à la variation de vitesse qu'à la variation de charge. Il a une grande réactivité en fonction de la proximité du défaut générant les ondes acoustiques par rapport au capteur.

ABS Energy

L'ABS ENERGY est aussi un paramètre associé à l'énergie du signal. Le tableau (*Tableau 11*) donne son évolution suivant chaque condition.

	B1	B1B	B2	B3
S1L1	45936.8	61978.0	63278.7	35144.8
S1L2	72515.2	89996.9	43898.9	33148.8
S1L3	96784.6	100301.9	48164.0	41143.53
S2L1	838286.	212708.4	296244.8	423635.5
S2L2	935194.5	428934.2	385902.5	847372.6
S2L3	1072835.4	506134.4	333824.5	971763.3

Tableau 11 : Evolution du facteur ABS ENERGY à partir des fichiers dat

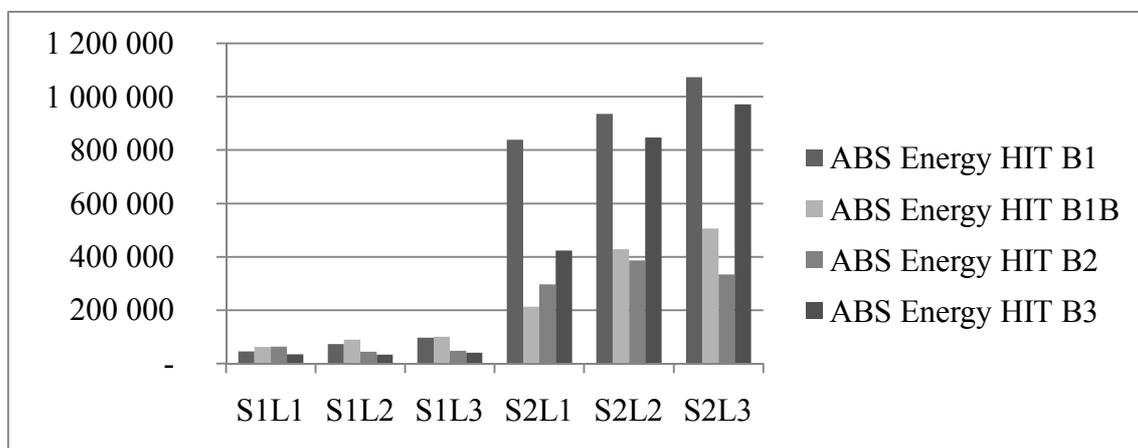


Figure 63 : Evolution du facteur ABS ENERGY à partir des fichiers dat

Le facteur ABS ENERGY est typique à l'analyse par émission acoustique, il correspond à l'énergie du signal en Joule. Le graphe (*Figure 63*) a une représentation équivalente au graphe résultant de la valeur RMS (*Figure 62*). Cependant, ce facteur est très dépendant de la fréquence de rotation.

Counts

Le COUNTS est un facteur qui provient du nombre de coups du signal. Le tableau (*Tableau 12*) donne son évolution suivant chaque condition.

	B1	B1B	B2	B3
S1L1	17571	19048	24239	24929
S1L2	18626	20165	22393	23853
S1L3	19260	21173	22167	23431
S2L1	19131	20345	19998	19914
S2L2	19178	21463	19658	19411
S2L3	19263	21750	20266	19776

Tableau 12 : Evolution du facteur COUNTS à partir des fichiers dat

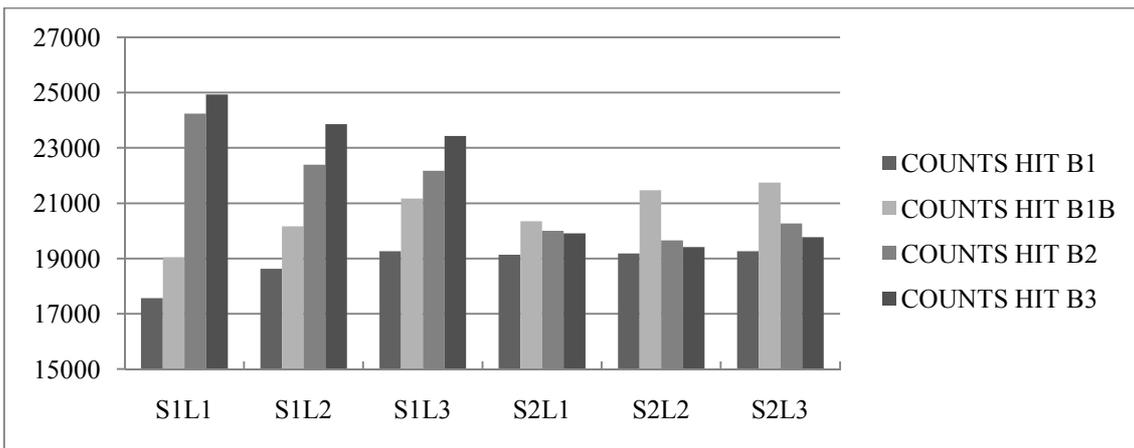


Figure 64 : Evolution du facteur COUNTS à partir des fichiers dat

Les valeurs du facteur COUNTS paraissent incohérentes surtout pour les essais à 1000 tr/min. Cependant, sur les roulements avec le défaut externe (B1 et B1B), une évolution est visible en fonction de la charge et de la vitesse (*Figure 64*). Dans les autres conditions, sur les roulements B2 et B3, aucune conclusion ne peut être faite sur l'évolution de ce facteur car il semble mal réagir dans le cas d'un défaut sur la bague interne.

ASL

Le facteur ASL, lié au facteur RMS, permet d'avoir les résultats en décibel. Le tableau (Tableau 13) donne son évolution suivant chaque condition.

	B1	B1B	B2	B3
S1L1	38.7	39.8	36.7	36.5
S1L2	40.8	41.4	38.6	37.3
S1L3	42.2	42.3	39.3	38.0
S2L1	51.5	45.4	45.7	47.2
S2L2	51.8	48.5	47.8	51.2
S2L3	52.4	49.1	47.5	51.5

Tableau 13 : Evolution du facteur ASL à partir des fichiers dat

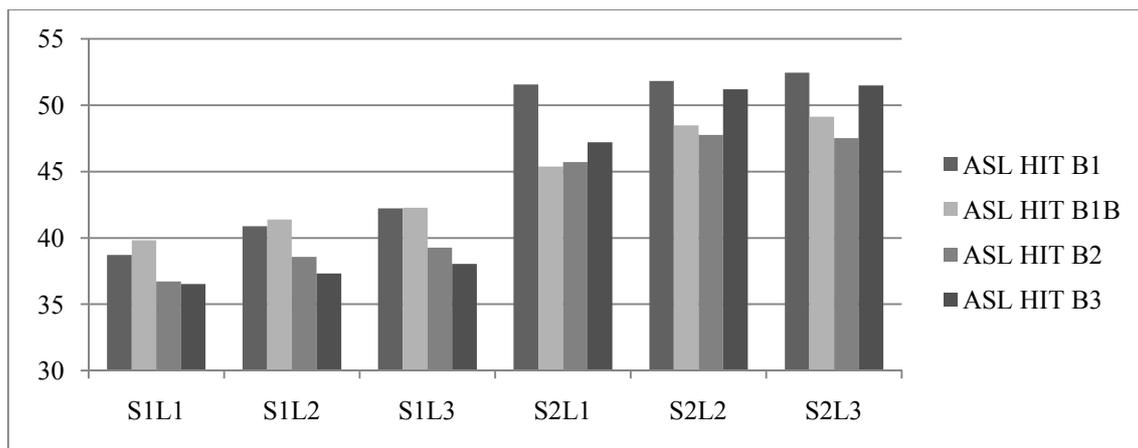


Figure 65 : Evolution du facteur ASL à partir des fichiers dat

Le facteur ASL (Figure 65), comme prévu, a une évolution semblable au facteur RMS. Il évolue en fonction de la charge et de la fréquence de rotation. Il est bien adapté dans le cas d'un défaut sur la bague interne du roulement et sur la bague externe du roulement mais à proximité du capteur.

Amp

Le facteur AMP représente l'amplitude du signal. Le tableau (*Tableau 14*) donne son évolution suivant chaque condition.

	B1	B1B	B2	B3
S1L1	60.33	61.55	63.19	61.76
S1L2	59.82	62.11	59.39	58.83
S1L3	60.33	60.73	58.81	58.94
S2L1	72.93	66.16	72.21	75.35
S2L2	73.89	70.00	69.33	75.99
S2L3	72.81	70.60	68.77	77.28

Tableau 14 : Evolution du facteur AMP à partir des fichiers dat

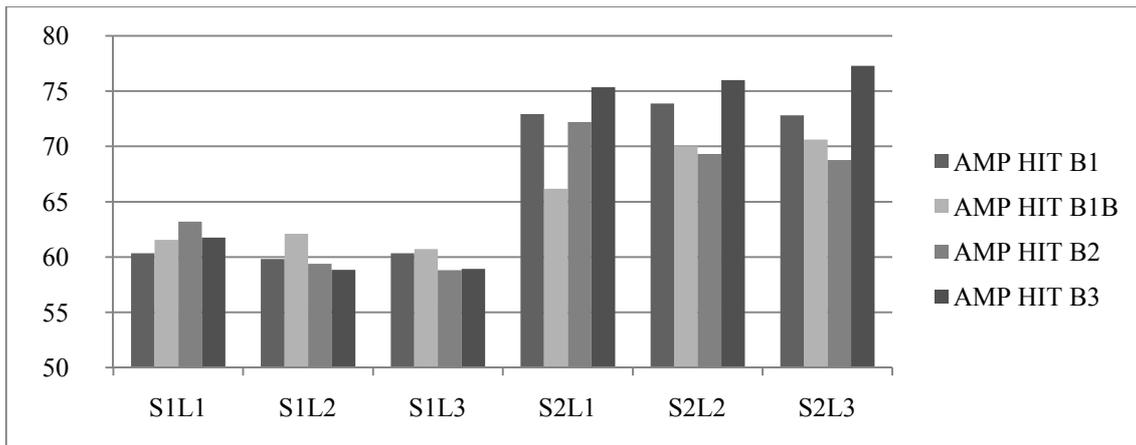


Figure 66 : Evolution du facteur AMP à partir des fichiers dat

Le facteur AMP est variable en fonction de la vitesse (*Figure 66*). Il réagit bien dans le cas du défaut sur la bague externe, en position haute du roulement, et aussi dans le cas d'un défaut sur la bague interne du roulement. Il est dépendant de la proximité du défaut par rapport au capteur.

3.4.2. Etude fréquentielle des signaux d'émission acoustique

La seconde étude est l'étude fréquentielle des signaux acoustiques (*Annexe 2*). Elle est nécessaire pour le diagnostic du défaut de roulement. Ce travail se fait à l'aide de Matlab et à partir des fichiers (.fws) qui correspondent à l'enregistrement de forme d'onde.

Les signaux représentés correspondent au roulement B1 pour une fréquence de rotation de 2000 tr/min et une charge de 788 daN.

Roulement B1

B1S2L3V5 – Signal brut (*Figure 67*)

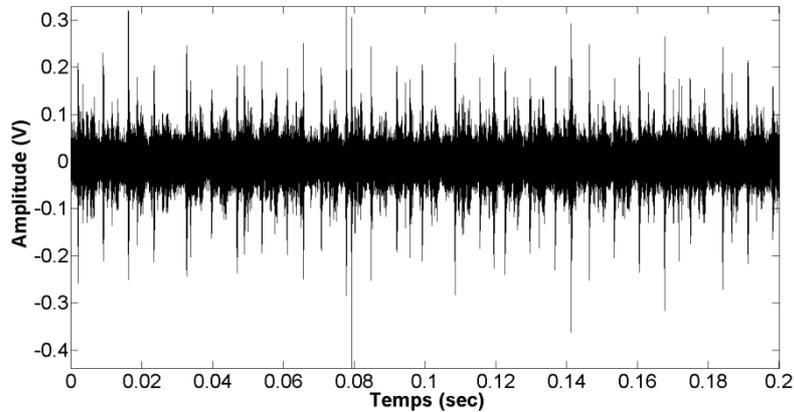


Figure 67 : Signal brut d'analyse par émission acoustique à 2000 tr/min charge 788 daN

B1S2L3V5 – FFT (*Figure 68*)

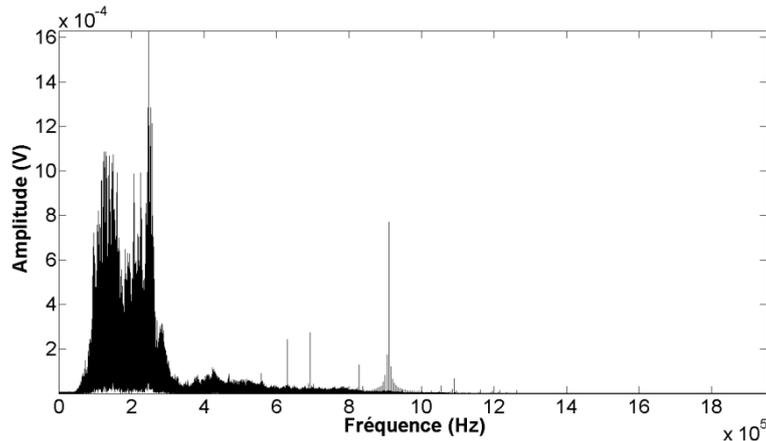


Figure 68 : FFT d'un signal d'analyse par émission acoustique à 2000 tr/min charge 788 daN

B1S2L3V5 – Spectre enveloppe (Figure 69)

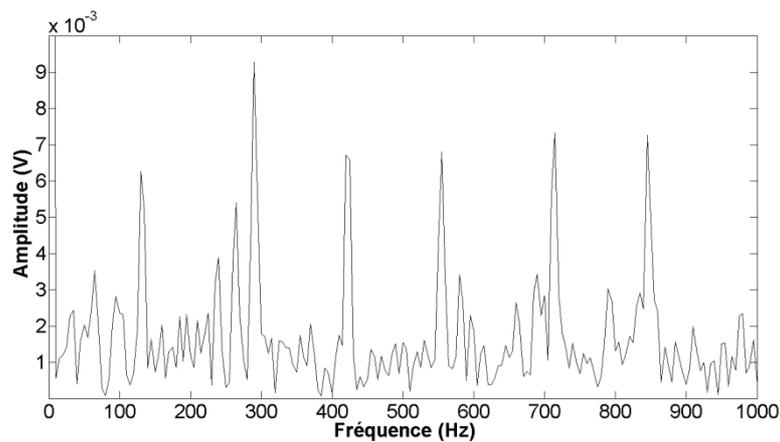


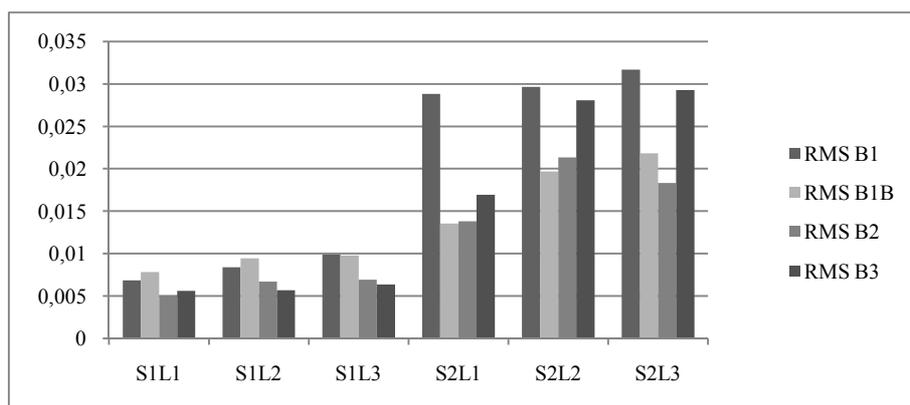
Figure 69 : Spectre enveloppe d'un signal d'analyse par émission acoustique à 2000 tr/min charge 788 daN

Le signal brut (Figure 67) ne fait pas apparaître de périodicités distinctes. Seul, le spectre enveloppe (Figure 69) permet de réaliser un diagnostic du roulement. Il rend visible les harmoniques liées au défaut de la bague externe du roulement à 138.9 Hz.

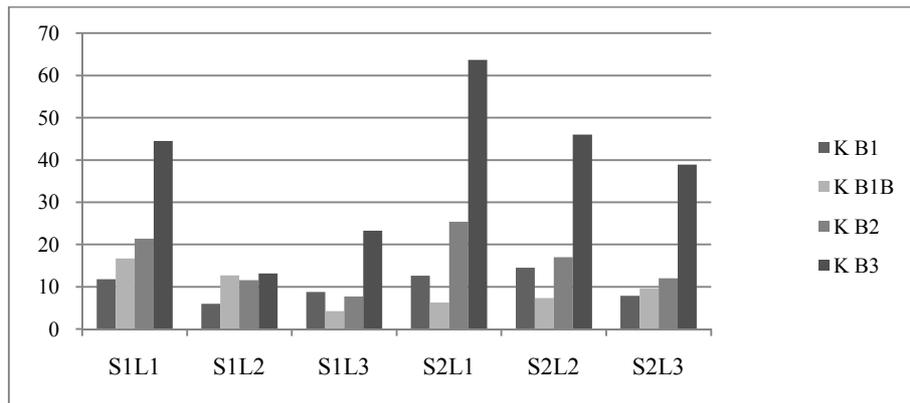
3.4.3. Etude temporelle des signaux d'émission acoustique (fws)

Pour chaque signal (fws), les facteurs temporels tels que (RMS, Kurtosis, Facteur Crête) ont été calculés dans le but de faire apparaître une évolution des facteurs en fonction de la localisation du défaut de la vitesse et de la charge.

RMS



Kurtosis



Facteur Crête

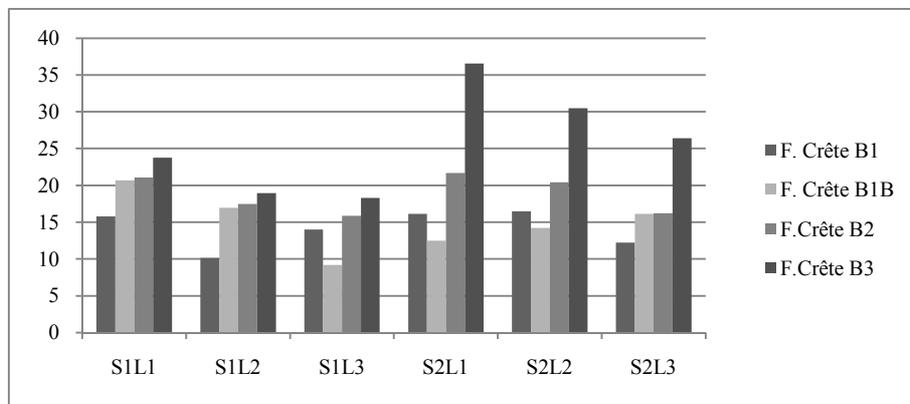


Figure 70 : Indicateurs temporels des signaux d'émission acoustique (RMS, Kurtosis et Facteur Crête)

Les résultats des facteurs temporels (*Figure 70*) ne sont pas pertinents. Seul le facteur RMS réagit en fonction de la charge et de la vitesse. **Le facteur RMS** réagit très bien dans le cas d'un défaut sur la bague externe positionné en haut du roulement et dans le cas du roulement avec le défaut interne. **Les facteurs Kurtosis et Facteur Crête** ne sont pas appropriés pour de l'analyse par émission acoustique.

3.4.4. Analyse vibratoire

L'analyse vibratoire des signaux est une analyse fréquentielle puis temporelle avec les indicateurs RMS, Kurtosis et Facteur Crête (*Annexe 3*).

Analyse fréquentielle d'un signal d'analyse vibratoire

Roulement B1

B1S2L3V5 – Signal brut

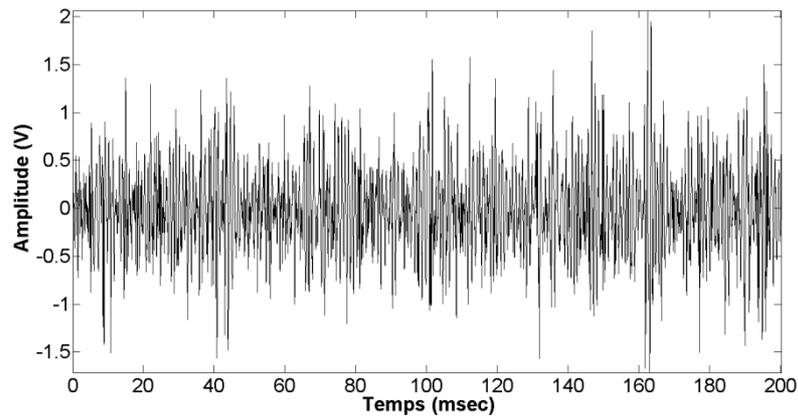


Figure 71 : Signal brut d'analyse vibratoire à 2000 tr/min charge 788 daN

B1S2L3V5 - FFT

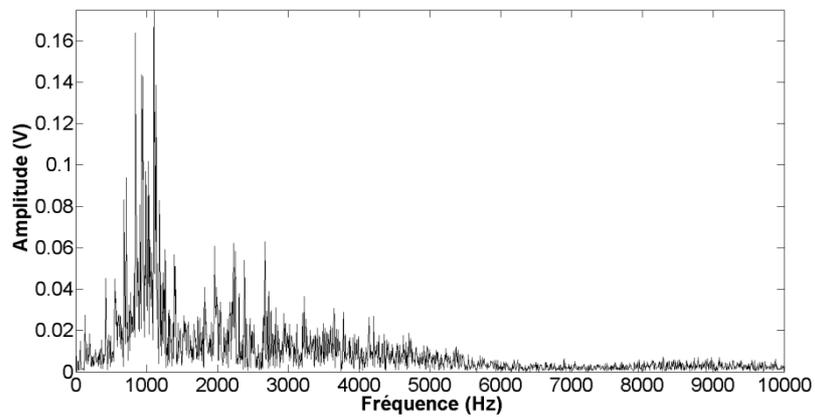


Figure 72 : FFT d'un signal d'analyse vibratoire à 2000 tr/min charge 788 daN

B1S2L3V5 – Spectre enveloppe

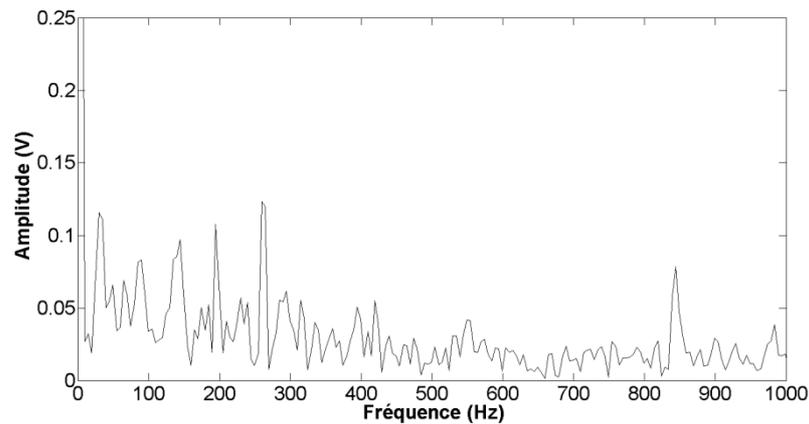
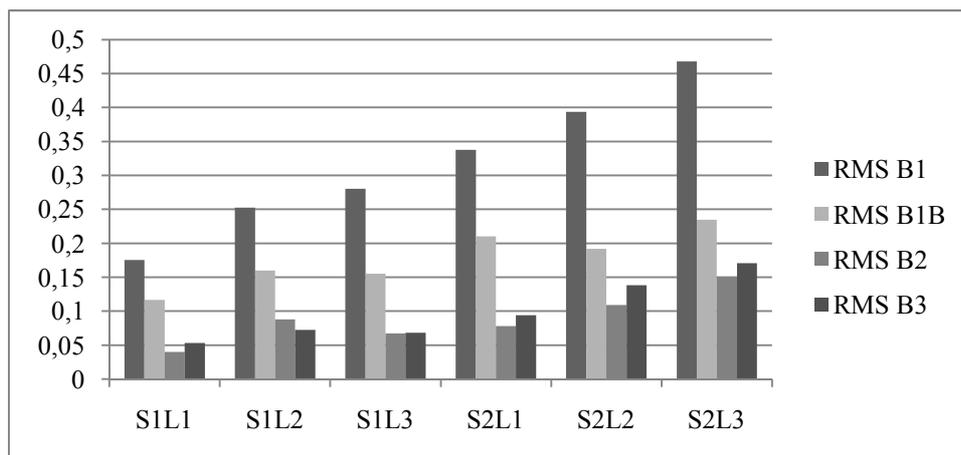


Figure 73 : Spectre enveloppe d'un signal d'analyse par analyse vibratoire à 2000 tr/min charge 788 daN

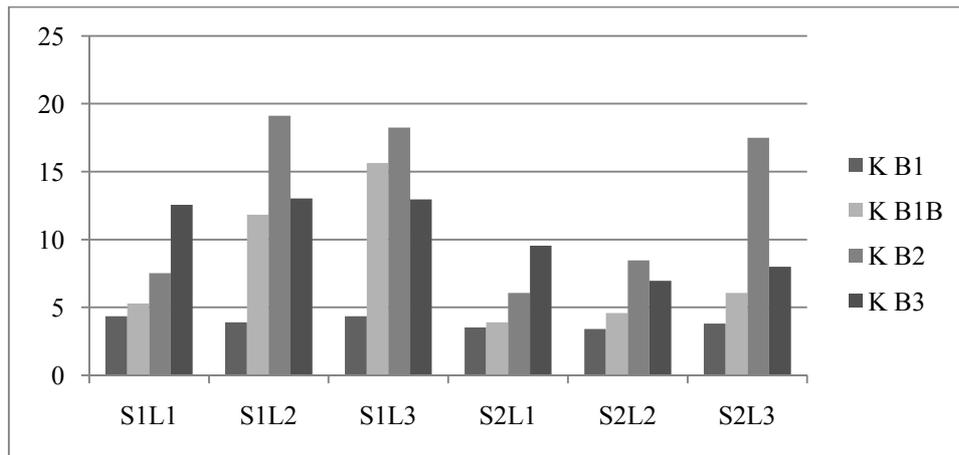
Les résultats de l'analyse vibratoire sont difficiles à exploiter. Le signal brut (*Figure 71*), pour le roulement B1 à la fréquence de rotation de 2000 tr/min et à la charge de 788 daN, ne permet pas de faire apparaître de périodicités. Le spectre FFT (*Figure 72*) n'est pas plus exploitable. Seul le spectre enveloppe (*Figure 73*) montre un pic aux environ de 138.9 Hz et de 277.8 Hz.

Indicateurs temporels (RMS, Kurtosis, Facteur Crête)

RMS



Kurtosis



Facteur Crête

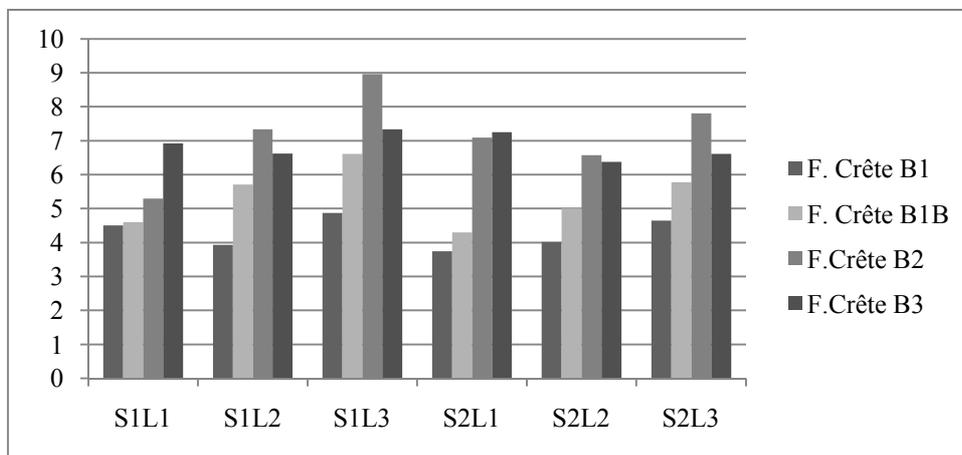


Figure 74 : Etude temporelle (RMS, Kurtosis et Facteur Crête) des signaux d'analyse vibratoire

Le facteur RMS (*Figure 74*) est le seul facteur concluant, il évolue avec la charge et la fréquence de rotation. Le facteur Kurtosis et Facteur Crête n'ont pas d'évolution logique. Ces résultats peuvent être dus au type de capteur et surtout à la position de celui-ci.

3.4.5. Horlroyd Instrument

Niveau de Distress

Le Distress doit théoriquement faire apparaître un roulement sain avec un niveau inférieur à 10. Le tableau (*Tableau 15*) donne l'évolution du Distress suivant chaque condition.

	B1	B1B	B2	B3
S1L1	22	26	22	23
S1L2	25	28	21	18
S1L3	23	29	18	16
S2L1	26	27	18	20
S2L2	24	26	12	18
S2L3	25	26	15	16

Tableau 15 : Tableau du niveau de Distress

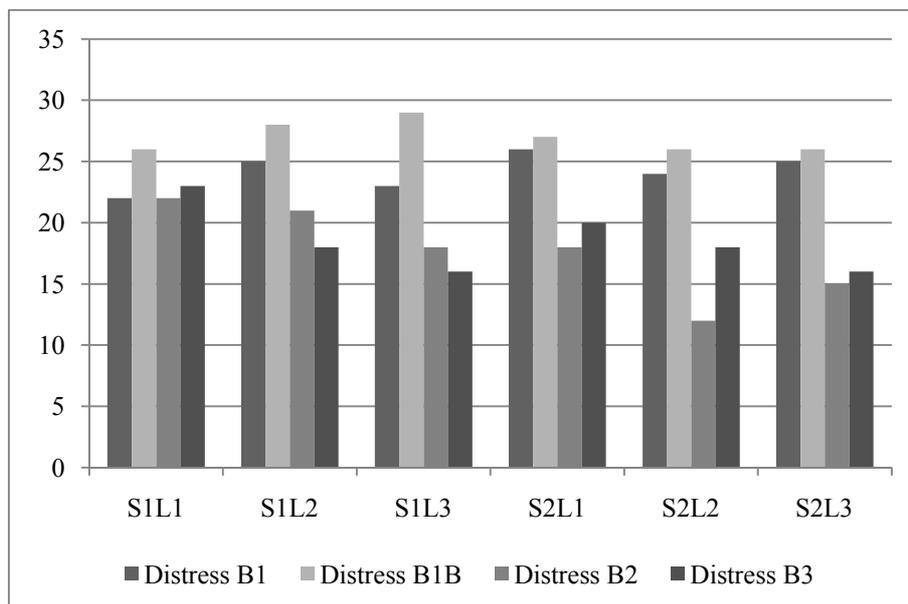


Figure 75 : Evolution du niveau de Distress en fonction des 6 conditions

Les mesures montrent un Distress supérieur à 10 dans toutes les conditions (*Figure 75*). Il n'est pas concluant, car les valeurs ne varient pas en fonction de la charge et de la vitesse comme escompté. C'est plutôt un indicateur permettant de contrôler un élément dans le temps.

Niveau de Décibel

Le niveau de Décibel correspond au niveau du bruit généré par le mécanisme, le roulement à billes. Le tableau (*Tableau 16*) donne son évolution suivant chaque condition.

	B1	B1B	B2	B3
S1L1	35	33	24	29
S1L2	37	34	28	31
S1L3	37	33	27	31
S2L1	47	41	33	42
S2L2	48	44	35	42
S2L3	49	43	36	45

Tableau 16 : Tableau du niveau de Décibel

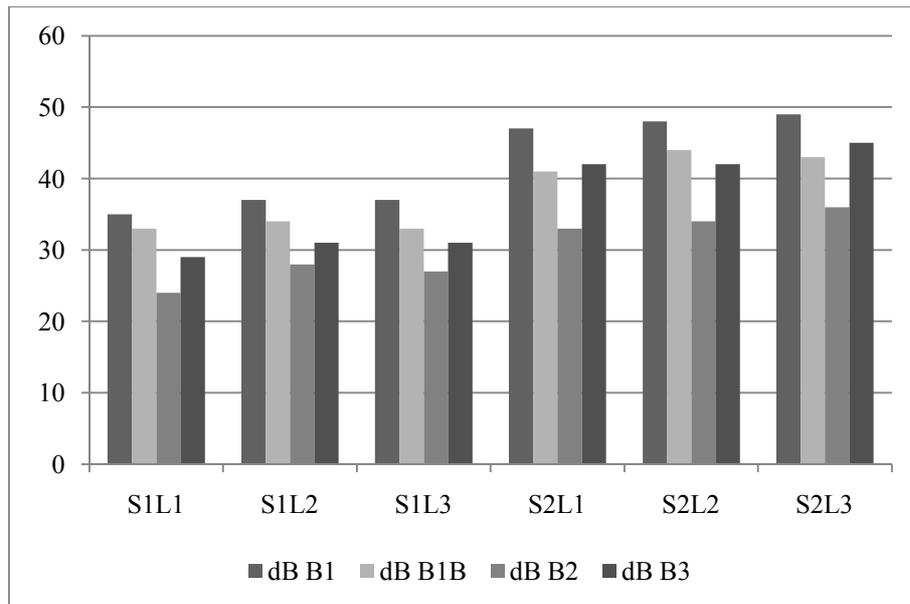


Figure 76 : Evolution du niveau de Décibel en fonction des 6 conditions

Cette valeur fait apparaître des niveaux de bruit supérieur avec défaut externe et interne. Le niveau de décibel varie peu avec la charge (*Figure 76*).

3.5. Perspective à une classification

L'analyse des résultats en émission acoustique à l'Université de Cranfield consiste à étudier l'évolution des facteurs d'émission acoustique tels que : RMS, ASL, ABS ENERGY, AMPLITUDE, COUNTS.

Ces facteurs, détaillés chapitre 1.2.3.1, sont variables dans le temps et donnent une indication sur l'énergie, l'amplitude et la durée du signal.

L'étude fait apparaître plusieurs points dont dépendent ces facteurs :

- La charge exercée sur le roulement.
- La fréquence de rotation.
- Le type de défaut (bague interne, bague externe).

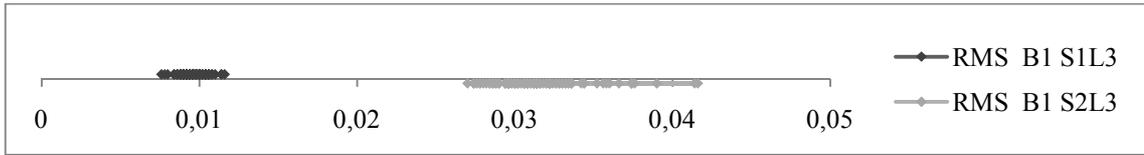
L'étude suivante permet de réaliser un classement selon l'importance des facteurs car ils ne réagissent pas tous aux critères cités ci-dessus.

Le travail consiste à déterminer les erreurs de chaque facteur en fonction de la charge puis en fonction de la vitesse (*Annexe 5*). Plus exactement, il s'agit de vérifier la dispersion de point d'un même facteur pour 2 vitesses et de définir le pourcentage d'erreur. C'est-à-dire, plus les points sont distincts, plus le pourcentage d'erreur s'approche des 0%. Dans le cas contraire, cela signifie que le facteur ne réagit pas, soit à la vitesse ou à la charge, et donc son pourcentage d'erreur est plus important. Cela est la base de la classification.

Les valeurs des facteurs proviennent du calcul de chaque forme d'onde sur la durée enregistrée.

Les exemples suivants permettent de comprendre l'instauration du pourcentage sur le comparatif des facteurs.

Exemple 1:



	<i>C1</i>	<i>C2</i>
<i>C1</i>	110	0
<i>C2</i>	0	110

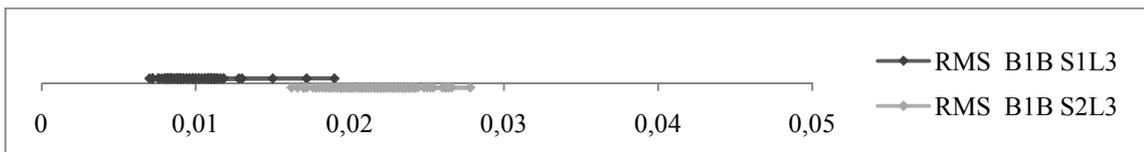
Erreur 0% (*)

La Classe 1 "C1" correspond à la base de données pour la valeur RMS dans les conditions du roulement B1 à la vitesse de 1000 tr/min et de 788 daN. Toutes ces valeurs représentent le RMS pour une salve à un temps bien précis.

La Classe 2 "C2" correspond à la base de données pour la valeur RMS dans les conditions du roulement B1 à la vitesse de 2000 tr/min et de 788 daN.

Il s'agit d'un comparatif de facteur en fonction de la vitesse.

Exemple 2:



	<i>C1</i>	<i>C2</i>
<i>C1</i>	108	18
<i>C2</i>	2	92

Erreur 9.09% (*)

La Classe 2 "C1" correspond à la base de données pour la valeur RMS dans les conditions du roulement B1B à la vitesse de 1000 tr/min et de 788 daN.

La Classe 2 "C2" correspond à la base de données pour la valeur RMS dans les conditions du roulement B1B à la vitesse de 2000 tr/min et de 788 daN.

Il s'agit d'un comparatif de facteur en fonction de la vitesse.

(): Pourcentage réalisé à partir des moyennes des erreurs.*

C1-C1 est le nombre de points de la première base de données séparés de la seconde base de données.

C2-C2 est le nombre de points de la seconde base de données séparés de la première base de données.

C1-C2 représente l'erreur de premier ordre, c'est à dire le nombre de points de la première base de données qui se retrouvent dans la plage de la seconde base de données.

C2-C1 représente l'erreur de second ordre, c'est à dire le nombre de points de la seconde base de données qui se retrouvent dans la plage de la première base de données.

Analyse uni-variable

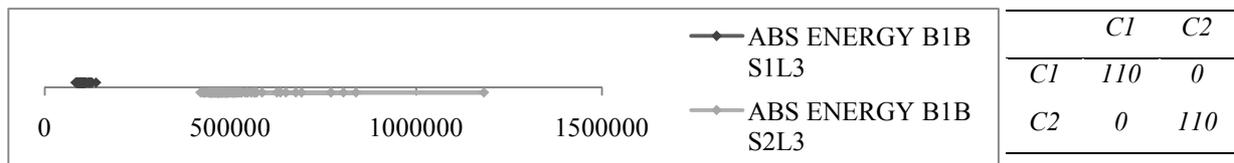
Liste des comparatifs en fonction des vitesses :

- 788 daN à 1000 tr/min / 788 daN à 2000 tr/min (Annexe 5 - A)
 394 daN à 1000 tr/min / 394 daN à 2000 tr/min (Annexe 5 - B)
 0 daN à 1000 tr/min / 0 daN à 2000 tr/min (Annexe 5 - C)

Comparatif des vitesses (788 daN - 1000 tr/min / 788 daN - 2000 tr/min) Annexe 5 - A :

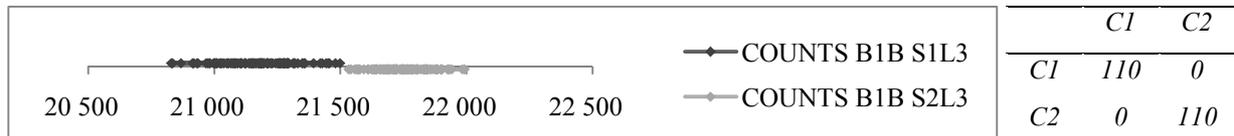
Ce comparatif est basé sur l'analyse des facteurs dans le cas du roulement pour un défaut externe avec le défaut en bas du roulement. C'est le type de roulement qui donne les meilleurs résultats.

ABS ENERGY



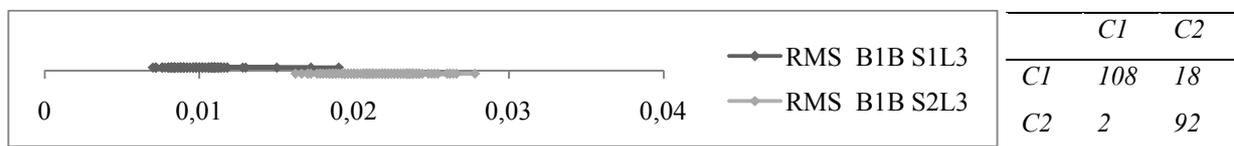
Erreur 0%

COUNTS



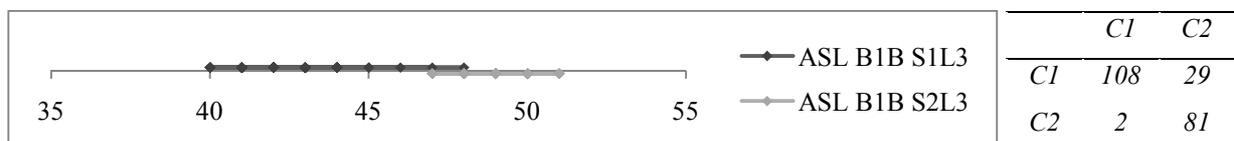
Erreur 0%

RMS



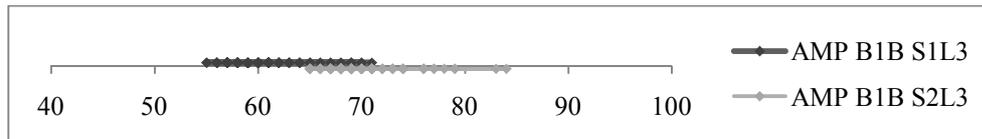
Erreur 9.09%

ASL



Erreur 14.09%

AMP



	C1	C2
C1	94	87
C2	16	23

Erreur 46.82%

Liste des comparatif en fonction des charges :

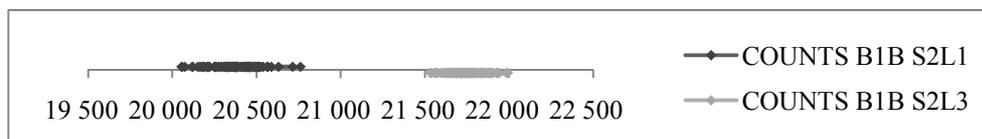
- 0 daN à 2000 tr/min / 788 daN à 2000 tr/min (Annexe 5 - D)
- 0 daN à 1000 tr/min / 788 daN à 1000 tr/min (Annexe 5 - E)
- 394 daN à 2000 tr/min / 788 daN à 2000 tr/min (Annexe 5 - F)
- 0 daN à 1000 tr/min / 394 daN à 1000 tr/min
- 0 daN à 2000 tr/min / 394 daN à 2000 tr/min
- 394 daN à 1000 tr/min / 788 daN à 1000 tr/min

Pour le comparatif des facteurs en fonction des variations de la charge, il a été choisi de réaliser l'étude sur les 3 premiers comparatifs de la liste ci-dessus, car c'est dans ces comparatifs que les résultats sont les meilleurs.

Comparatif des charges (0 - 2000 tr/min / 788 daN - 2000 tr/min) Annexe D :

Ce comparatif est basé sur l'analyse des facteurs dans le cas du roulement pour un défaut externe avec le défaut en bas du roulement.

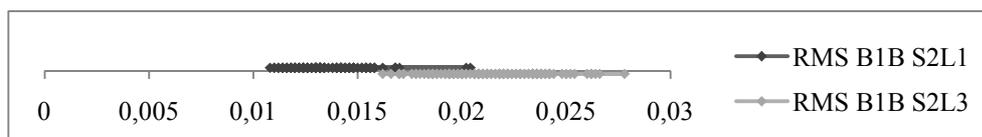
COUNTS



	C1	C2
C1	110	0
C2	0	110

Erreur 0%

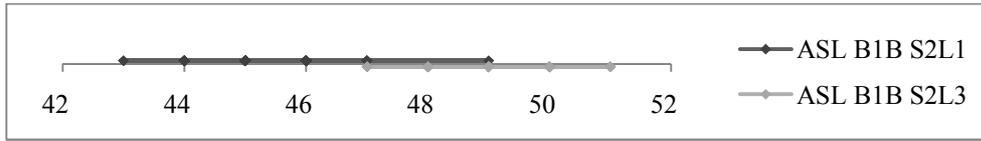
RMS



	C1	C2
C1	103	36
C2	7	74

Erreur 19.55%

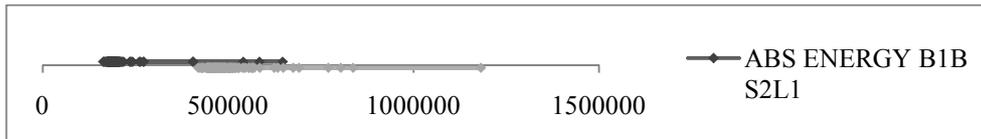
ASL



	<i>C1</i>	<i>C2</i>
<i>C1</i>	101	68
<i>C2</i>	9	42

Erreur 35%

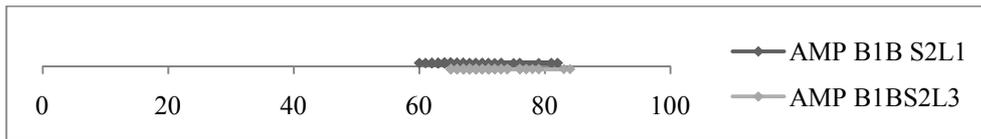
ABS ENERGY



	<i>C1</i>	<i>C2</i>
<i>C1</i>	107	103
<i>C2</i>	3	7

Erreur 48.18%

AMP



	<i>C1</i>	<i>C2</i>
<i>C1</i>	50	108
<i>C2</i>	60	2

Erreur 76.36%

Analyse bidimensionnelle en fonction de la vitesse

L'analyse bidimensionnelle a pour intérêt de faire apparaître la complémentarité entre deux facteurs et de regarder l'évolution des nuages de ces facteurs l'un par rapport à l'autre.

Les graphiques suivants représentent deux cas possibles pour des comparatifs entre facteurs.

Le premier cas correspond au meilleur rapport entre facteurs, le graphique montre deux nuages distincts. Ces facteurs ont été choisis en fonction de l'analyse uni-variable ayant les plus faibles taux d'erreur. Les facteurs choisis sont ABSOLUTE ENERGY et RMS.

Le second cas correspond au plus mauvais rapport entre facteurs. Cela se résulte par la superposition des nuages de points. Les facteurs choisis sont AMPLITUDE et COUNTS.

Le comparatif des facteurs en fonction de la vitesse entre ABSOLUTE ENERGY ET RMS.

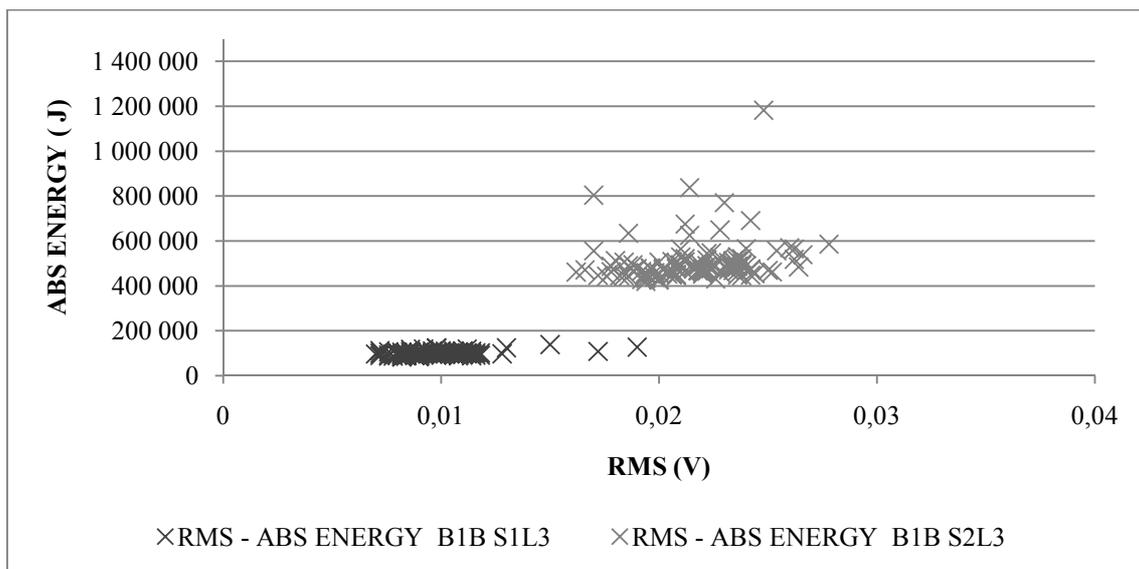


Figure 77 : Tracé de l'Absolute Energy en fonction de la valeur RMS dans le cas du roulement B1B à vitesse variable (de 1000 à 2000 tr / min) et la charge fixée à 788 daN(L3).

L'analyse bidimensionnelle permet de réduire l'erreur de diagnostic. Le graphique (Figure 77) fait apparaître deux nuages distincts et l'erreur de lecture est de 0%, alors que si l'observation est portée séparément sur chacun des deux paramètres, RMS et ABS ENERGY, l'erreur est de 9,09% pour le RMS et 0% pour l'Absolute Energy.

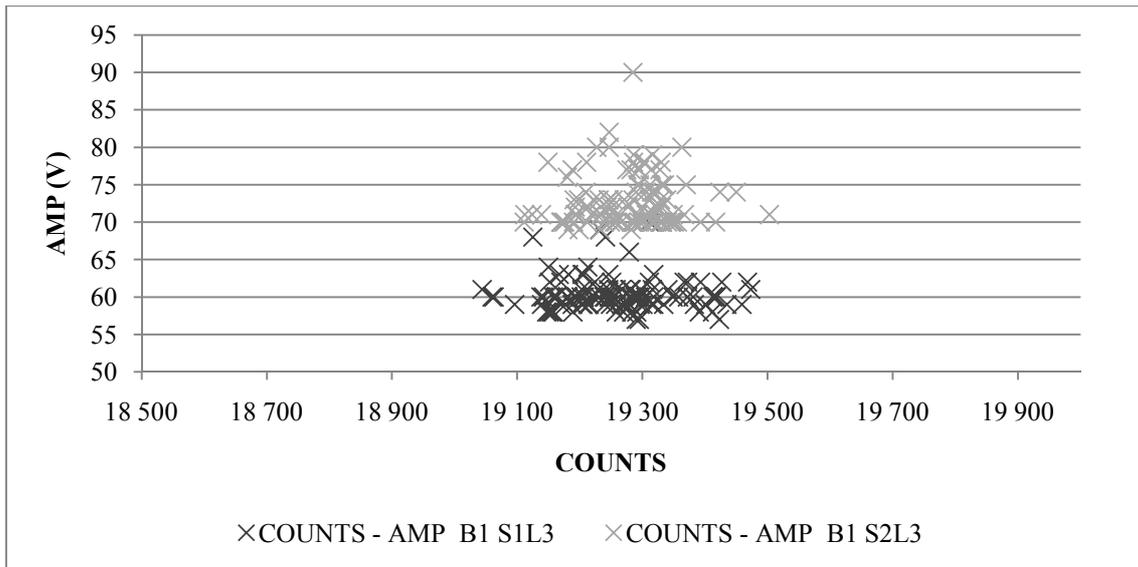


Figure 78 : Tracé de l'AMP en fonction de COUNTS dans le cas du roulement B1 à vitesse variable (de 1000 à 2000 tr / min) et la charge fixée à 788 daN (L3).

Le graphique (Figure 78) fait apparaître également deux nuages distincts mais l'information donnée par le COUNTS est quasi-nulle car les deux nuages sont alignés verticalement. L'information est donc surjective.

Analyse bidimensionnelle en fonction de la charge

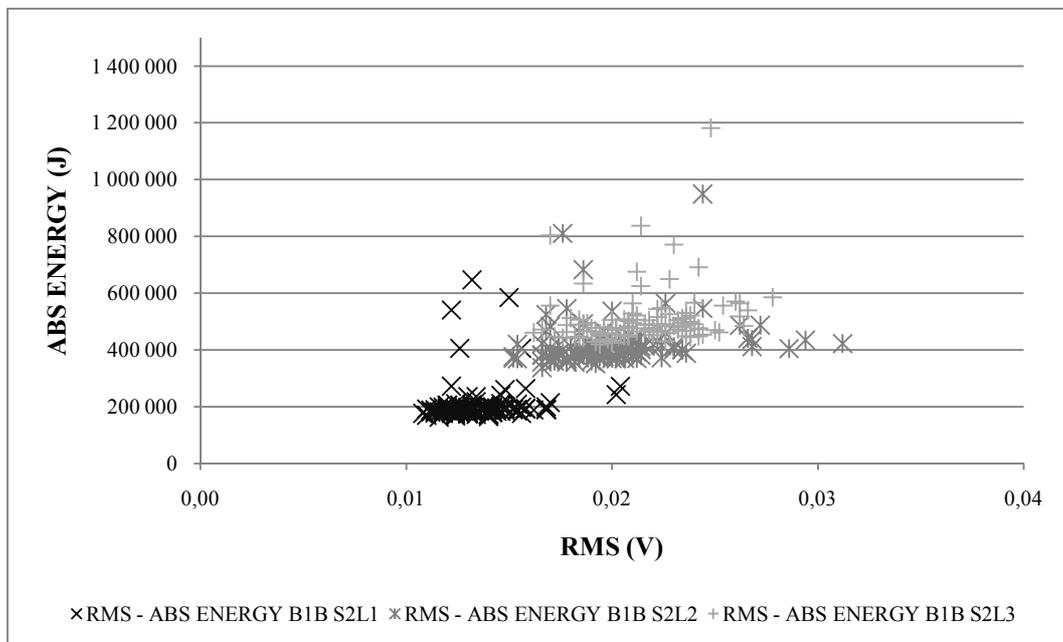


Figure 79 : Comparaison des facteurs Absolute Energy en fonction de RMS pour les 3 cas de charge.

Dans le cas de l'évolution des nuages en fonction de la charge (*Figure 79*), les résultats ne sont pas convaincants car il est difficile de séparer les nuages de points même si les centres d'inertie de chaque nuage sont éloignés. Le choix des paramètres ne semble pas approprié ici. Le taux d'erreur est donc d'environ 50%.

Conclusion sur les facteurs d'émission acoustique

Cette analyse permet de réaliser un classement sur la pertinence des facteurs d'émission acoustique.

La première conclusion concerne le chargement du roulement lors de l'expérimentation sur le banc. La conception du banc d'essai provoque une vibration de l'arbre lorsque le palier n'est pas chargé. Le pourcentage d'erreur est plus élevé lors des essais sans chargement (5 - C), que lors des essais avec chargement (5 - A et 5 - B).

La deuxième comparaison met l'accent sur la vitesse. Il est constaté que la plupart des facteurs réagissent assez bien aux variations de vitesse.

- Sur un défaut de bague extérieure, les facteurs à prendre en compte sont COUNTS, RMS, ABS ENERGY.
- Dans le cas d'un défaut dans la bague intérieure, les résultats montrent des informations très intéressantes. Le facteur COUNTS n'est pas du tout adapté pour ce type d'étude, cela peut provenir du transfert des ondes à travers les roulements.
- Les facteurs AMP et le facteur ASL semblent les moins appropriés.

La troisième comparaison est la variation de la charge. Bien que les résultats donnent un pourcentage élevé d'erreurs, il est possible de réaliser un classement des paramètres en fonction de leur pertinence (annexes 5 - D, 5 - E et 5 - F). Les facteurs qui semblent les plus appropriés sont RMS, ABS ENERGY et COUNTS cependant COUNTS est pertinent seulement dans le cas de défaut de roulement avec bague extérieure.

Suite à cette analyse, il est possible d'obtenir un classement des facteurs à prendre en compte :

- Dans le cas d'un défaut sur la bague extérieure :
 - ABS ENERGY.

- RMS.
- COUNTS.
- Dans le cas d'un défaut sur la bague intérieure :
 - ABS ENERGY.
 - RMS.
- Les paramètres, les moins appropriés, dans le cas d'une vitesse variable et de la charge variable et portant un défaut sont les suivants :
 - ASL.
 - AMP.

Perspectives

Dans le cas de l'étude des facteurs et dans l'optique de réaliser une publication, il sera intéressant de travailler sur plusieurs points permettant d'améliorer cette classification :

Quantifier les inerties inter et intra-classes

Calcul (intra) dans un cluster (variance de points dans un cluster) (*Equation III.1*).

$$J_{\omega} = \sum_g \sum_{i \in C_g} d^2(x_i, \mu_g) \quad (III.1)$$

Calcul (inter) (variance des centres de classe) (*Equation III.2*).

$$J_b = \sum_c N_g d^2(\mu_g, \bar{x}) \quad (III.2)$$

Le couple de paramètres est le plus efficace lorsque les points de moyenne de deux nuages sont sur la bissectrice et dont l'intra-classe d'inertie est plus grande que l'inertie interclasse (*Figure 80*).

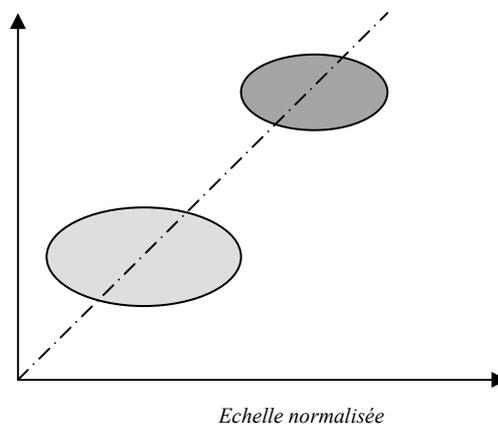


Figure 80 : Schéma de la meilleure disposition des nuages de points

L'efficacité de la classification est quantifiée grâce à l'inertie intra et inter-clusters. Cela consiste à **minimiser l'inertie intra-cluster et maximiser l'inertie inter-clusters**.

Définir la paire de paramètres la plus efficace pour tout type de dérives de la machine (vitesse, la charge, le défaut) et de quantifier la vitesse et la direction du nuage en temps réel.

Intégrer ce principe dans un arbre de décision.

3.6. Conclusion

L'étude menée à l'Université de Cranfield a permis de réaliser un comparatif entre l'analyse par émission acoustique et l'analyse vibratoire sur 3 types de roulement. Cette étude a pour intérêt d'exposer la complémentarité mais surtout les avantages et inconvénients de chacune des méthodes.

Le premier résultat qui peut être fait est sur l'analyse spectrale des signaux. Aussi bien l'émission acoustique que l'analyse vibratoire permettent de révéler les fréquences caractéristiques de défaut externe de roulement à 138.89 Hz. Cependant, l'émission acoustique n'est fiable que lorsque le défaut du roulement est sur la bague externe (*Figure 81*).

Dans le cas contraire (*Figure 82*), le signal est brouillé par un bruit de fond.

Plus précisément, la propriété de l'émission acoustique résulte de la propagation des ondes acoustiques dans un matériau, ainsi, la célérité de l'onde est un paramètre très important. Etant donné que les ondes doivent se propager du défaut de la bague interne aux billes puis au bloc roulement, elles tendent à s'atténuer avec la multiplication des éléments et elles peuvent ensuite être assimilées à un bruit de fond. Les résultats font apparaître l'avantage de l'émission acoustique dans le cas seulement d'un défaut en bague externe.

B1S2L3V5 – Spectre enveloppe – Emission acoustique

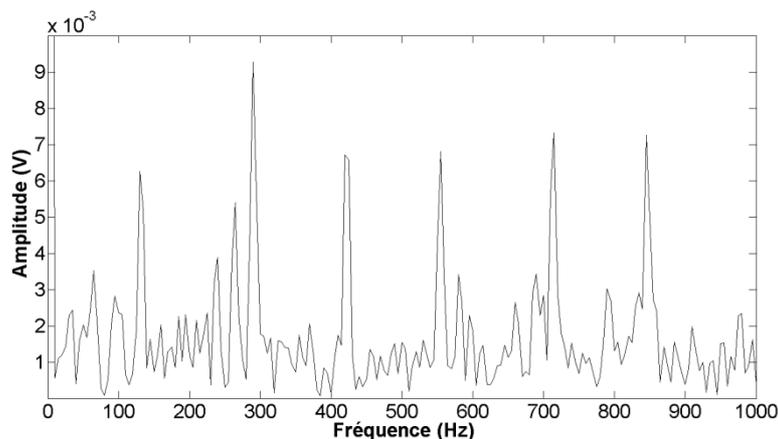


Figure 81 : Spectre en émission acoustique pour un défaut sur la bague externe à 2000 tr/min

B3S2L3V5 - Spectre enveloppe – Emission acoustique (Annexe II p118)

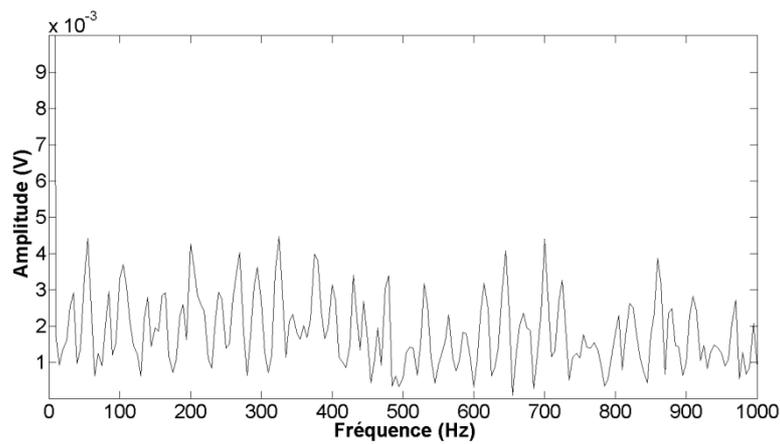


Figure 82 : Spectre en émission acoustique pour un défaut sur la bague interne à 2000 tr/min

Dans le cas de l'analyse vibratoire, les fréquences caractéristiques sont peu visibles et extractibles, cela peut être dû au système d'acquisition. Le capteur étant positionné en axial, il n'était pas dans les meilleures conditions.

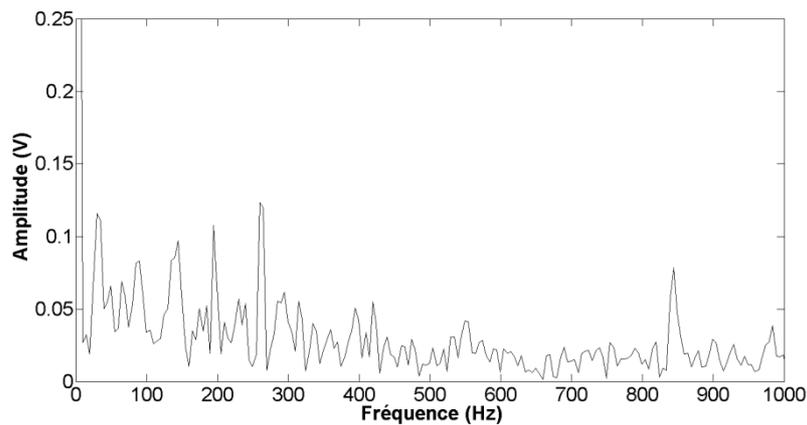


Figure 83 : Spectre en analyse vibratoire pour un défaut sur la bague externe à 2000 tr/min

Rappel des fréquences caractéristiques de défaut à 2000 tr/min (Tableau 9).

Vitesse (tr/min)	2000
Vitesse (Hz) = f_r	33.33
f_{be}	138.89
f_{bi}	194.44
$f_{ér}$	194.44
f_c	13.89

Le second résultat porte sur l'analyse des indicateurs en émission acoustique donnés par le logiciel d'acquisition.

Cette étude a permis de réaliser un classement de ces facteurs en fonction des conditions d'essais.

Dans le cas d'une variation de la vitesse, les facteurs à prendre en compte sont :

- Dans le cas d'un défaut sur la bague extérieure :
 - COUNTS.
 - RMS.
 - ABS ENERGY.
- Dans le cas d'un défaut sur la bague intérieure :
 - ABS ENERGY.
 - ASL.
 - RMS.

Dans le cas d'une variation de la charge, les facteurs à prendre en compte sont :

- Dans le cas d'un défaut sur la bague extérieure :
 - ABS ENERGY.
 - RMS.
 - COUNTS.
- Dans le cas d'un défaut sur la bague intérieure :
 - ABS ENERGY.
 - ASL.
 - RMS.

Les paramètres les moins appropriés dans le cas d'une vitesse variable et de la charge variable et pour n'importe quel défaut sont les suivants :

- AMP.
- ASL.

Conclusion générale

Ce travail a été très instructif, il m'a permis de découvrir une nouvelle technique de contrôle non destructif. Cette technique est différente de l'analyse vibratoire. L'origine du signal lors de l'acquisition provient de la création d'ondes élastiques, générées par le défaut, qui se propagent dans le matériau et qui sont captées par le capteur. Dans le cas de l'analyse vibratoire, le défaut génère des accélérations dans le système, ces accélérations sont perçues par le capteur. Ce travail a permis de montrer les caractéristiques de chacune des techniques mais surtout de présenter le traitement et l'analyse des signaux. Ces deux phases sont importantes dans le cas de la maintenance conditionnelle. Car de plus en plus d'industries optimisent les phases de maintenance dans un souci de rentabilité. Cela se fait à l'aide de ces techniques qui permettent de détecter et de quantifier un défaut ou une rupture sur une chaîne de fabrication.

Les avantages de l'émission acoustique qui ont été révélés dans ce travail sont les suivants :

Premièrement, **à faible vitesse, c'est la seule technique qui permet la détection de défaut sur roulement à billes.** Ce point a été travaillé à la fréquence de rotation de 3 tr/min et les conclusions nous permettent même de travailler sur la taille et sur la périodicité du défaut. Cependant, un approfondissement serait nécessaire afin d'étudier les incidences de la charge à cette vitesse, puis les incidences avec la lubrification et surtout équiper le banc d'un appareillage permettant de confirmer la fréquence de rotation.

Deuxièmement, dans le cas de la détection à vitesse moyenne, après analyse visuelle des spectres enveloppes, il a été noté que sur le banc de fatigue, en analyse vibratoire, la détection du défaut est à environ 400 tr/min. Dans le cas de l'émission acoustique, la détection du défaut est à environ 50 tr/min. Il est possible de dire que **la technique de l'émission acoustique dans le cas de la détection à vitesse moyenne du défaut est plus favorable que l'analyse vibratoire** seulement dans le cas d'un défaut sur la bague externe, dans le cas du banc de fatigue sur la bague proche du capteur. Cependant, il faut tenir compte des conditions de mesures. L'émission acoustique est très sensible au bruit ambiant, aux sources sonores générées par d'autres appareils qui pourraient se trouver à proximité, et cette technique dépend énormément des conditions et de la constitution de la machine à contrôler (proximité de capteur, type de matériaux, ...).

Dans le cas du diagnostic, la méthode qui est actuellement la plus utilisée au niveau industriel est l'analyse vibratoire. L'émission acoustique est trop sensible et trop difficile à mettre en place pour du monitoring en industrie dans le cas des machines tournantes.

Cependant, la détection avec l'émission acoustique est très intéressante, elle apporte une meilleure définition des fréquences caractéristiques dans les spectres. Par contre, cette méthode est uniquement valable pour un défaut sur la bague externe. **Dans le cas d'un défaut sur la bague interne, le signal est brouillé et les fréquences caractéristiques sont difficilement extractibles du bruit de fond (Annexe 2 et Annexe 3).**

Au niveau de l'analyse vibratoire, cette méthode a fait ses preuves depuis plusieurs décennies. Elle permet un diagnostic des défauts aussi bien sur des roulements avec des défauts de bague interne, de bague externe, de cage ou même de l'élément roulant.

Le tableau ci-dessous rappelle les avantages et inconvénients de chaque méthode en fonction des conditions d'essai.

	Emission acoustique	Analyse vibratoire
<i>Comparatif en fonction des vitesses (Reims)</i>		
Détection : Basse vitesse (3tr/min)	+ (analyse des signaux bruts)	0
Diagnostic : Basse vitesse (3tr/min)	+ (analyse des signaux bruts)	0
Détection : Moyenne vitesse (2000 tr/min)	++ Plus sensible, limite de détection à 50 tr/min (analyse des spectres)	+ Moins sensible, limite de détection à 400 tr/min (analyse des spectres)
Diagnostic : Moyenne vitesse (2000 tr/min)	++ Analyse spectrale des signaux	+ Analyse spectrale des signaux
<i>Analyse temporelle des signaux (Reims)</i>		
RMS	+	+
Kurtosis	0 Non pertinent à faibles vitesses	+
Facteur crête	0 Non pertinent à faibles vitesses	+

<i>Analyse des indicateurs d'émission acoustique (Cranfield)</i>		
	Défaut bague interne	
ABS ENERGY	++	
RMS	+	
ASL	+	
COUNTS	-	
AMP	-	
	Défaut bague externe	
ABS ENERGY	++	
RMS	+	
ASL	-	
COUNTS	+	
AMP	--	
<i>Comparatif en fonction du type de défaut (Annexe 2 et Annexe 3)</i>		
Défaut de roulement sur la bague interne	0	+
Défaut de roulement sur la bague externe	++	+
<i>Avantages et inconvénients</i>		
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Grande sensibilité. - Détection et diagnostic sur des défauts de roulement sur bague externe. 	<ul style="list-style-type: none"> - Répétabilité des mesures. - Détection et diagnostic sur tous types de défauts de roulement.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Répétabilité des mesures. - Sensible au bruit de fond. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne permet pas d'analyse à faibles vitesses.

Tableau 17 : Tableau comparatif réalisé à partir des études effectuées sur le banc de Reims et celui de Cranfield

Lors de mon étude à l'Université de Cranfield, j'ai beaucoup appris sur leurs méthodes d'études en émission acoustique ainsi que sur l'acquisition en émission acoustique et sur l'analyse des résultats. L'Université de Cranfield travaille beaucoup à partir des indicateurs d'émission acoustique qui permettent de donner une indication sur l'énergie du signal, l'amplitude, et la durée. Ces indicateurs sont nombreux et ont des interactions. J'ai réalisé une petite étude sur l'importance des indicateurs suivant les conditions d'essais finalisée par un classement de ceux-ci pour permettre une lecture plus facile et plus rapide des résultats.

Ce travail m'a beaucoup intéressé, j'ai énormément appris sur l'émission acoustique. Je remercie Mr CHIEMENTIN et Mr DRON pour m'avoir permis de réaliser une étude à

l'Université de Cranfield et aussi le Professeur MBA, professeur de renommée européenne en émission acoustique, pour m'avoir accueilli. Cette période m'a permis de m'affirmer, de dialoguer avec des personnes d'horizons différents, et d'améliorer mon anglais aussi bien au niveau du parlé qu'au niveau de l'écrit avec la rédaction de 2 rapports pour le Professeur MBA (*Annexe 4 et Annexe 5*). J'ai rencontré quelques difficultés sur la recherche d'informations pour l'émission acoustique dans le cadre de la machine tournante car peu de travaux français ont été publiés, la plupart des écrits sont d'origine anglaise avec l'Université de Cranfield, grecques, chinoises, américaine et canadiennes.

Annexe 1. Exercices ludiques pour une meilleure compréhension

Exercice 1

Nous enregistrons une forme d'onde sur 21 pts avec 1 fréquence d'échantillonnage de 1 MHz. Le seuil d'étude est fixé à 1.5 mV. L'amplitude est exprimée en mV.

0	1	-1	2	-2	4	-3	5	-4	3	-1	2	-1	1	-1	3	-2	2	-1	1	0
---	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	---

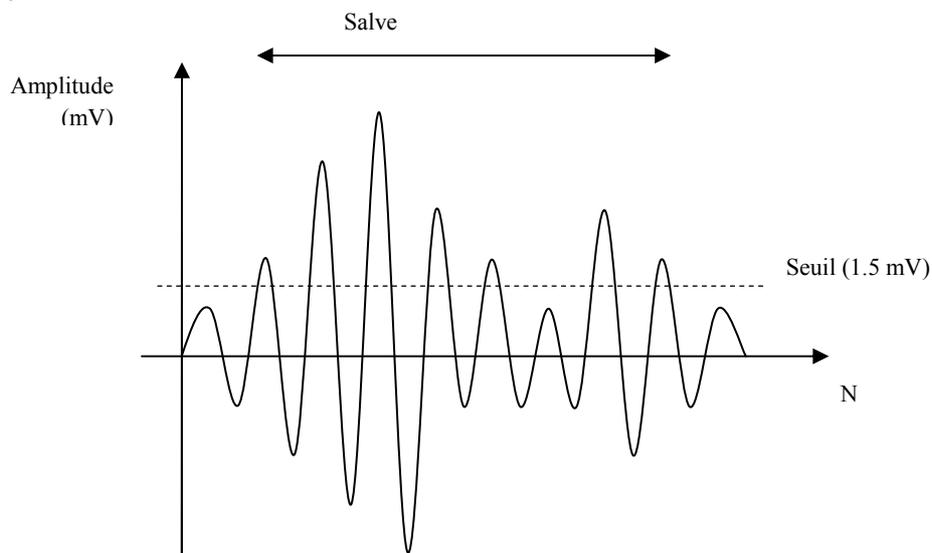
1. Expliquer le lien entre salve et forme d'onde.

La salve est un évènement mesuré. Cet évènement est identifié à partir du moment où il dépasse le seuil préréglé. Dans notre cas, chaque salve débute à partir du moment où l'amplitude dépasse le seuil de 1.5 mV.

La forme d'onde est un signal d'émission acoustique débutant à un instant $t=0$ et se terminant à un instant $t=t$. Il ne dépend pas du seuil, il dépend uniquement de la durée de l'enregistrement choisi.

2. Faire un graphe représentant cette forme d'onde

Salve



Les paramètres pour une salve :

Le seuil : 1.5 mV

3. Calculer

Données :

$$\text{Fréquence d'échantillonnage} = 1\text{MHz}$$

$$\text{Nombre de points} = 9$$

$$\text{Seuil} = 1.5\text{ mV}$$

- a. Le pas de temps

$$T = 1/F_e$$
$$T = \frac{1}{1\,000\,000} = 1.10^{-6}\text{sec}$$

- b. La durée de la salve (duration salve 1)

$$DURATION = N \times T$$
$$DURATION = 8.10^{-6}\text{sec}$$

- c. Le nombre de coups

$$COUNTS (\text{salve } 1) = 7$$

- d. La fréquence moyenne (Average Frequency)

$$AF = \frac{AE\ COUNTS}{DURATION} = \frac{7}{8.10^{-6}} = 875\text{ kHz}$$

- e. La valeur RMS (V)

$$V_{efficace} = V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{n=1}^N [x(n)]^2}$$

$$V_{RMS} = 0.0023\text{ V}$$

- f. Le temps de montée

$$\text{Rise Time} = 2.10^{-6}\text{ sec}$$

Exercice 2

Calculer la vitesse des ondes

1. volumiques transversales

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}}$$

avec :

ρ est la densité

λ et μ sont les constantes de Lamé

E est le module d'Young

σ est le coefficient de Poisson

$$V_T = 6131 \text{ m/s}$$

2. volumiques longitudinales

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

$$V_L = 12172 \text{ m/s}$$

3. de surface

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} \sqrt{\frac{E}{2(1 + \rho)}} = \frac{0.72 - (V_T/V_L)^2}{0.75 - (V_T/V_L)^2} \cong 0.9V_T$$

$$V_R = 5518 \text{ m/s}$$

Dans un acier ($E=270\text{GPa}$, $\sigma=0.33$, $\rho=2700\text{kg/m}^3$, $\mu=0.4$, $\lambda=0.6$).

4. Quelle est l'onde qui sera préférentiellement enregistrée par le capteur.

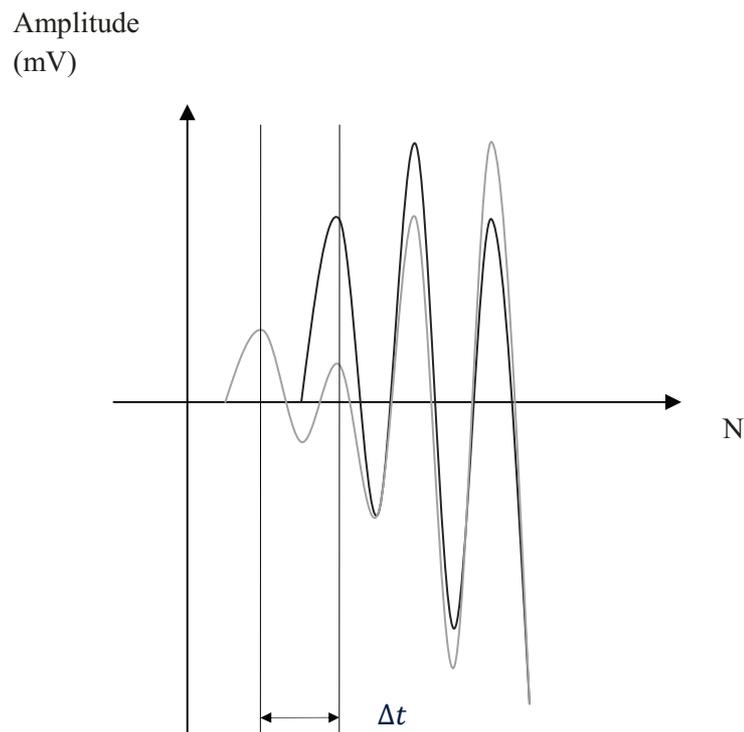
L'onde qui sera la plus intéressante est celle qui sera la plus élevée.

Exercice 3 - localisation

Nous souhaitons localiser une fissure dans une poutre 1D, en acier ($E=270\text{GPa}$, $\sigma=0.33$, $\rho=2700\text{kg/m}^3$, $\mu=0.4$, $\lambda=0.6$). Nous positionnons donc 2 accéléromètres sur chaque extrémité de la poutre (soit espacée de 20cm). Les signaux AE sont enregistrés avec une fréquence d'échantillonnage de 1 MHz. Voici les 10 premiers points enregistrés par chaque capteur [WEB 02].

Capteur 1	0	0	0	0.5	-0.3	0.7	-0.6	0.5	-0.8
Capteur 2	0	0.2	-0.1	0.1	-0.3	0.5	-0.7	0.7	-0.8

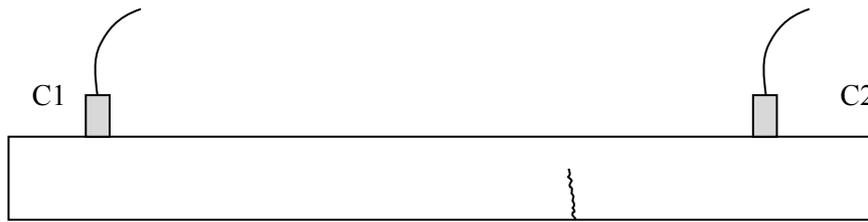
1. Où se trouve le défaut ?



$$V_T = 6131 \text{ m/s}$$

$$V_L = 12172 \text{ m/s}$$

$$V_R = 5518 \text{ m/s}$$



Le pas de temps

$$T = \frac{1}{1\,000\,000} = 1.10^{-6} \text{ sec}$$

Début de la salve capteur 1:

$$t_{0 \text{ capteur } 1} = 2.10^{-6} \text{ sec}$$

Début de la salve capteur 2:

$$t_{0 \text{ capteur } 2} = 1.10^{-6} \text{ sec}$$

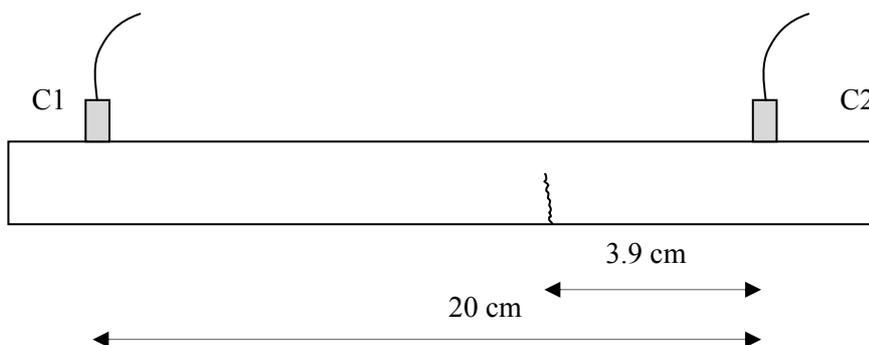
Distance d2 :

$$d = \frac{1}{2} (D - \Delta T \times V)$$

$$d = \frac{1}{2} (0.02 - 1.10^{-6} \times 12172)$$

$$d = 3.9 \text{ cm}$$

Le capteur qui reçoit le signal le plus tôt est le capteur N°2.

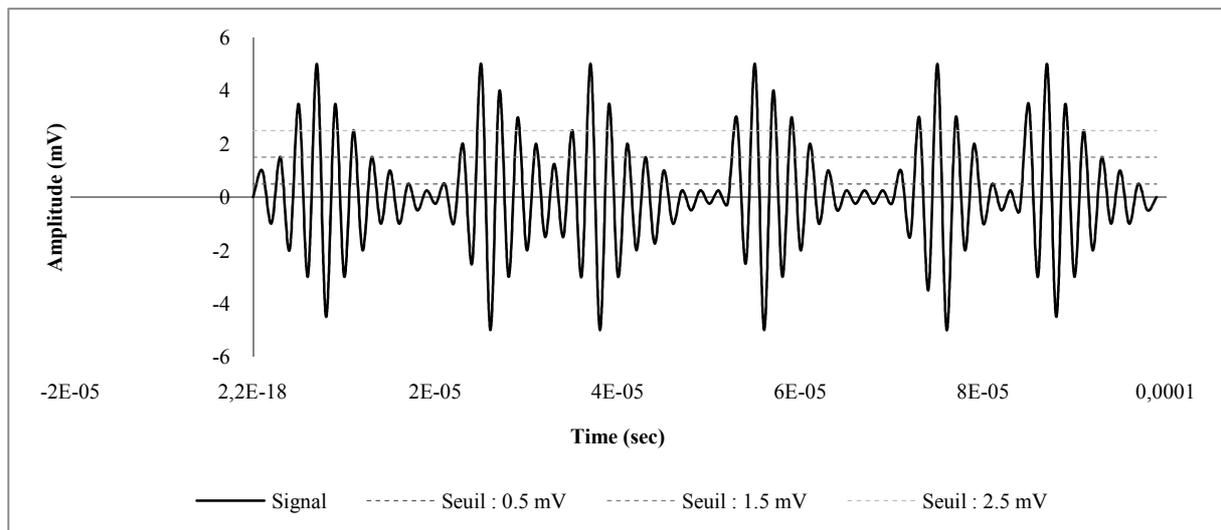


Exercice 4

Nous enregistrons une forme d'onde sur 100 points avec 1 fréquence d'échantillonnage de 1 MHz. L'amplitude est exprimée en mV et les données sont dans les fichiers « Onde_brute.txt ».

Nous allons étudier l'influence du paramétrage des systèmes d'acquisition des appareils utilisés en émission acoustique. On distingue deux types d'appareils, un système de mesures en continu et un système de mesures discrètes.

1. Nous admettons dans un premier temps que la forme d'onde a été enregistrée de manière continue avec une carte d'acquisition dédiée. [TAND 99] [KIM 03].



- a. Avec un seuil de 1.5 mV, combien de salves comportent cette forme d'onde ?
Nombre de salves pour un seuil de 1.5 mV = 6
- b. Même question pour un seuil de 0.5mV ? et 2.5mv ?
Nombre de salves pour un seuil de 0.5 mV = 5
Nombre de salves pour un seuil de 2.5 mV = 6
- c. Avec un seuil de 0.5 mV, 1.5 mV et 2.5 mV. Faire un graphique du « nombre de coups » en fonction du temps.
Nombre de coups avec les seuils de 0.5 mV :

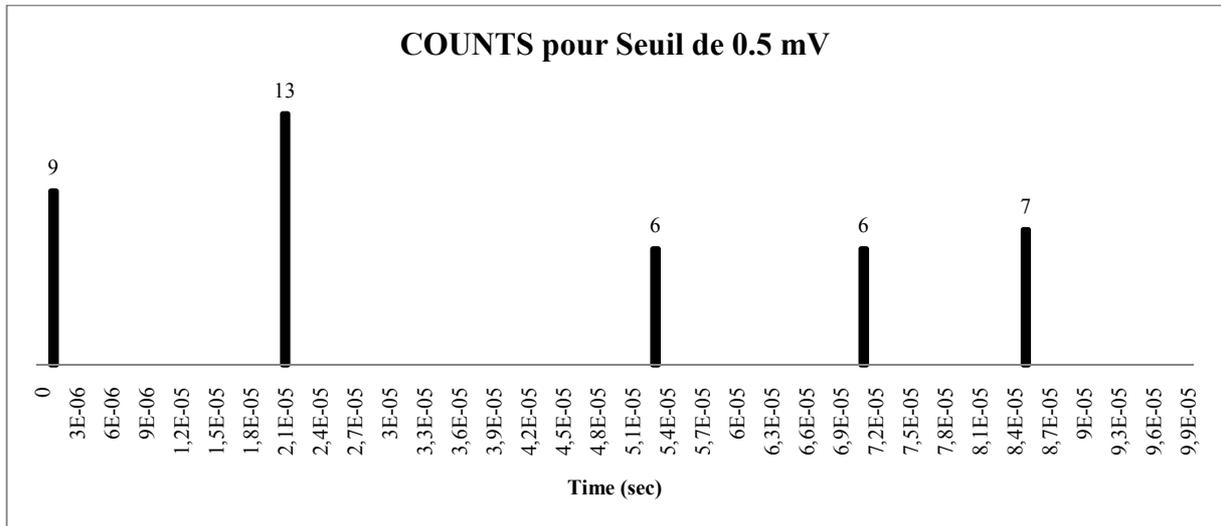
Salve 1 > 9 Counts

Salve 2 > 13 Counts

Salve 3 > 6 Counts

Salve 4 > 6 Counts

Salve 5 > 7 Counts



Nombre de coups avec les seuils de 1.5 mV :

Salve 1 > 6 Counts

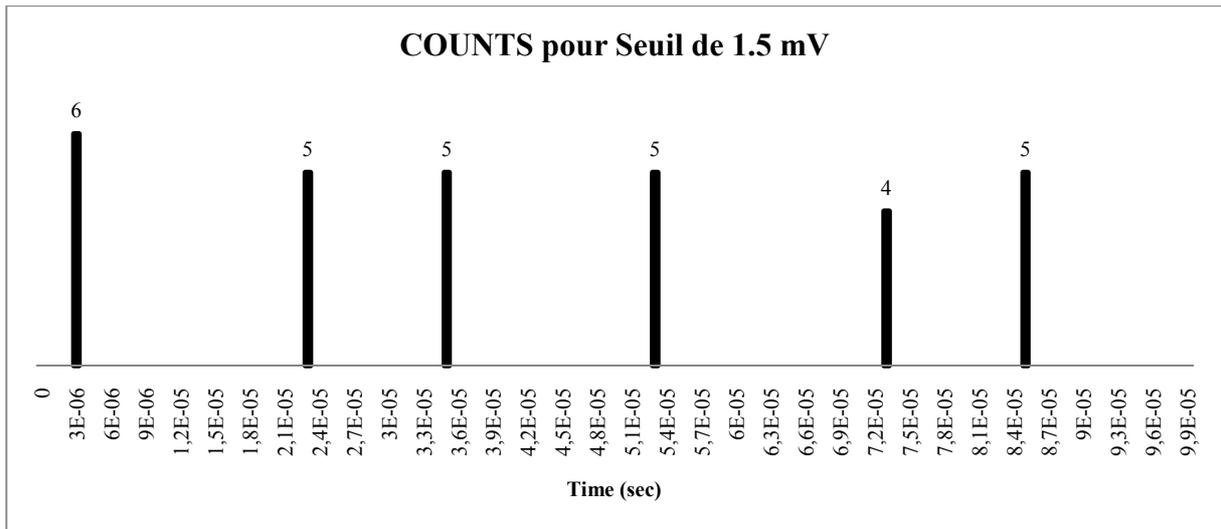
Salve 2 > 5 Counts

Salve 3 > 5 Counts

Salve 4 > 5 Counts

Salve 5 > 4 Counts

Salve 6 > 5 Counts



Nombre de coups avec les seuils de 2.5 mV :

Salve 1 > 4 Counts

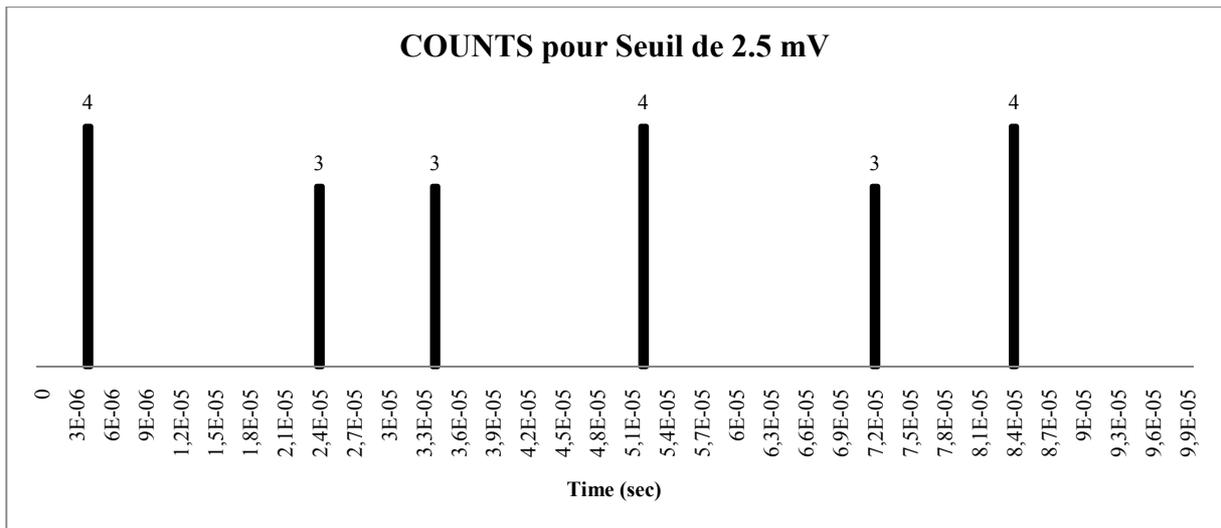
Salve 2 > 3 Counts

Salve 3 > 3 Counts

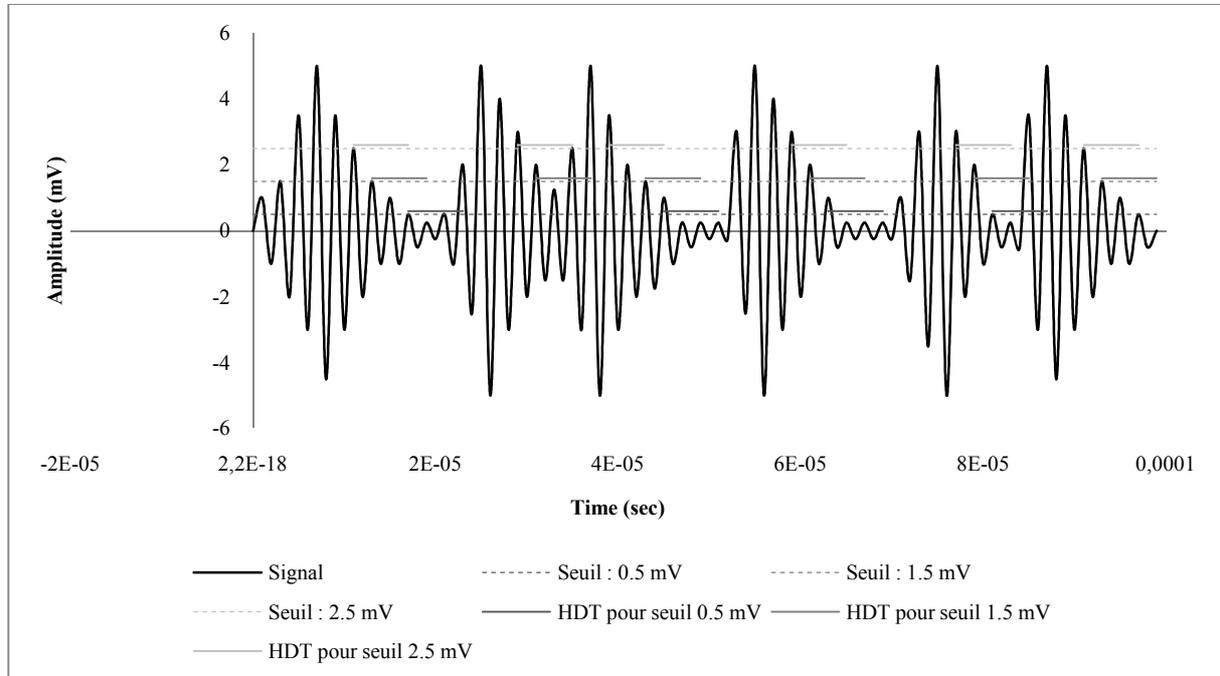
Salve 4 > 4 Counts

Salve 5 > 3 Counts

Salve 6 > 4 Counts



2. Nous admettons dans un premier temps que la forme d'onde a été enregistrée de manière continue avec une carte d'acquisition dédiée. Les paramètres d'acquisition sont : HDT de 5 μ sec



- a. Avec un seuil de 1.5 mV, combien de salves comportent cette forme d'onde ?

Nombre de salves pour un seuil de 1.5 mV = 4

- b. Même question pour un seuil de 0.5mV ? et 2.5mv ?

Nombre de salves pour un seuil de 0.5 mV = 3

Nombre de salves pour un seuil de 2.5 mV = 5

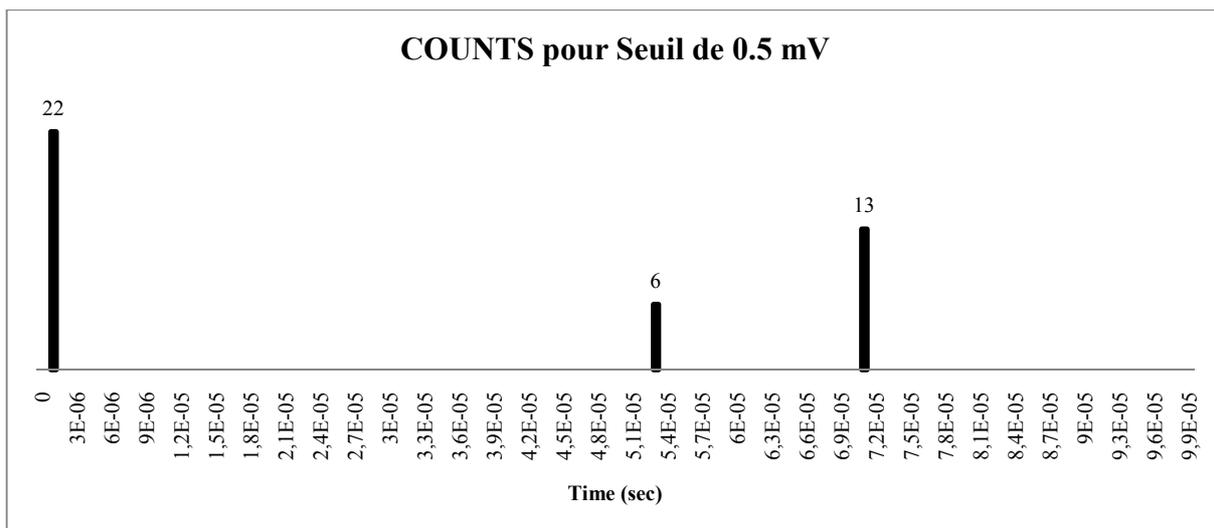
- c. Avec un seuil de 0.5 mV, 1.5 mV et 2.5 mV. Faire un graphique du « nombre de coups » en fonction du nombre des points.

Nombre de coups avec les seuils de 0.5 mV :

Salve 1 > 22 Counts

Salve 2 > 6 Counts

Salve 3 > 13 Counts



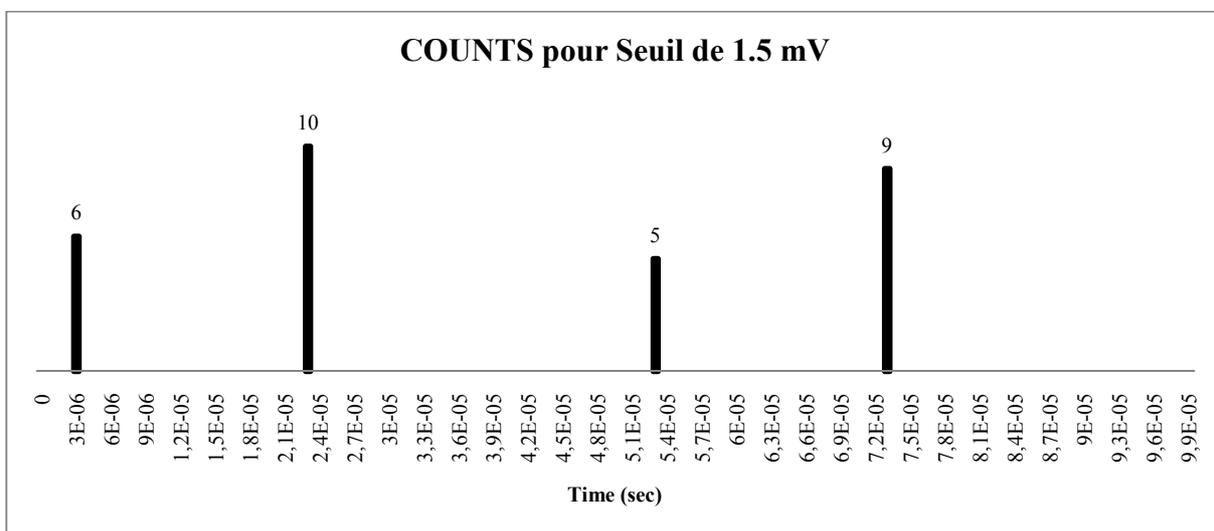
Nombre de coups avec les seuils de 1.5 mV :

Salve 1 > 6 Counts

Salve 2 > 10 Counts

Salve 3 > 5 Counts

Salve 4 > 9 Counts.



Nombre de coups avec les seuils de 2.5 mV :

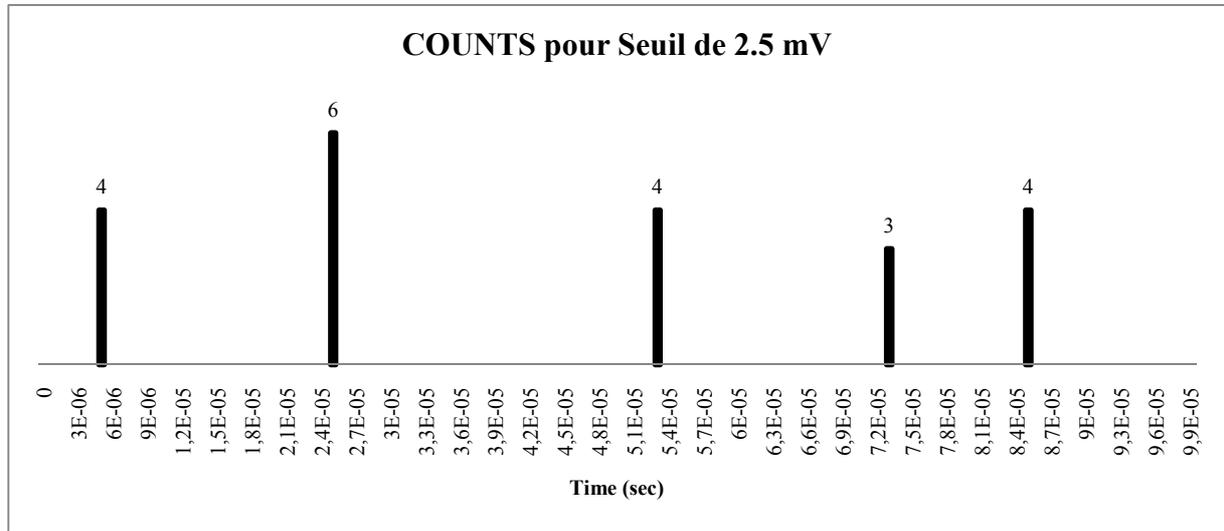
Salve 1 > 4 Counts

Salve 2 > 6 Counts

Salve 3 > 4 Counts

Salve 4 > 3 Counts

Salve 5 > 4 Counts



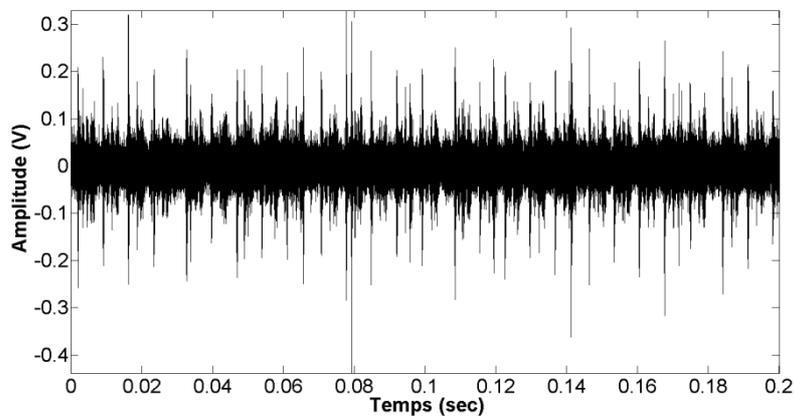
Annexe 2. Signaux en émission acoustique

L'annexe 2 contient le travail réalisé sur les signaux acoustiques acquis sur le banc de l'Université de Cranfield. Les signaux représentés sont ceux des roulements en position B1, B1B, B2 et B3, pour la vitesse 2000 tr/min et la charge de 788 daN.

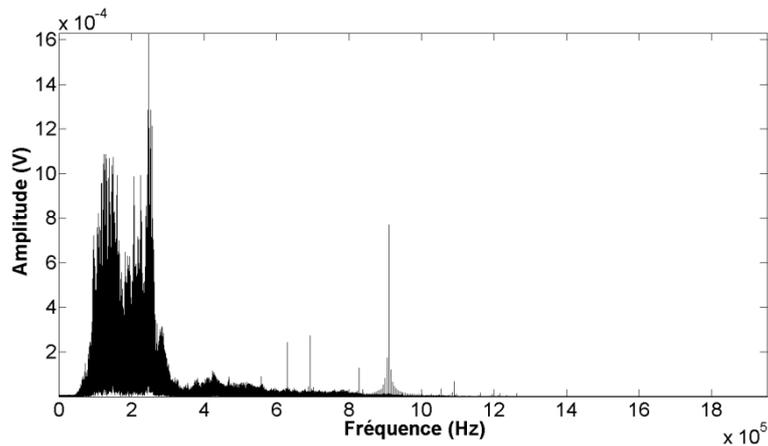
Cette annexe permet de réaliser un comparatif des signaux selon les roulements au niveau fréquentiel.

Roulement B1

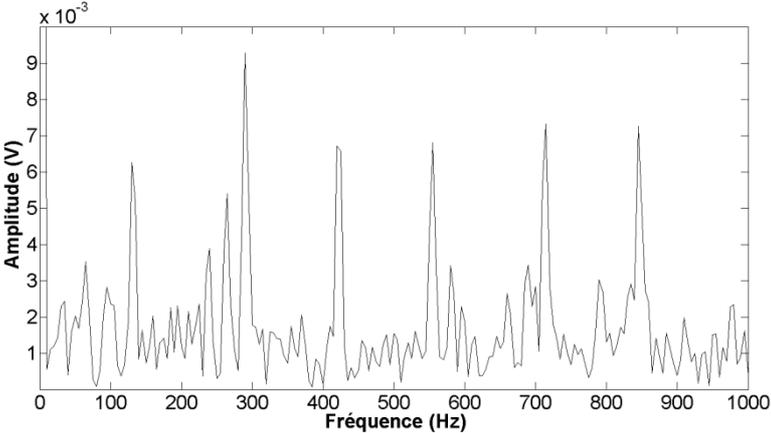
B1S2L3V5 – Signal brut



B1S2L3V5 - FFT

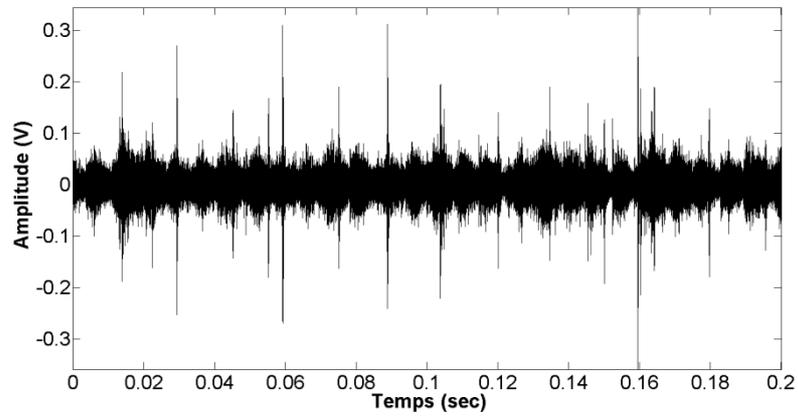


B1S2L3V5 - Spectre enveloppe

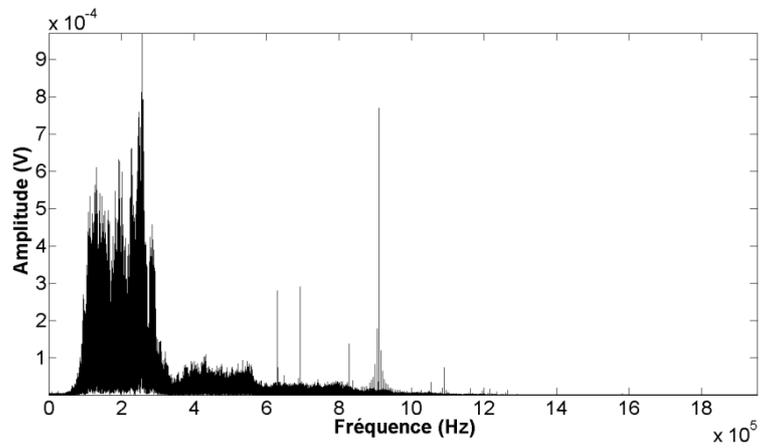


Roulement B1B

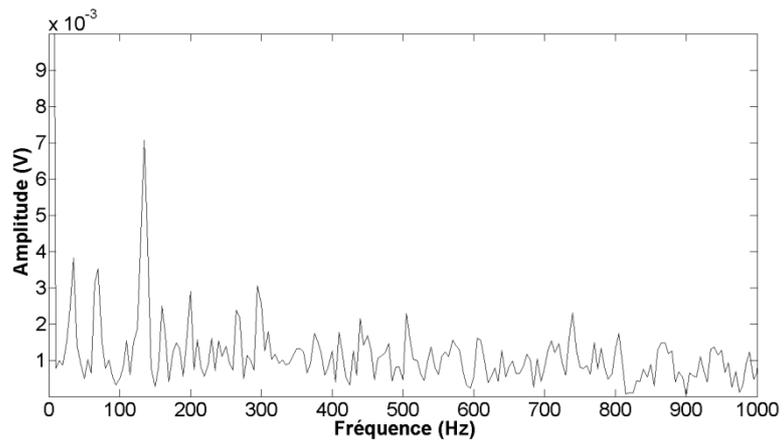
B1BS2L3V5 - Signal brut



B1BS2L3V5 - FFT

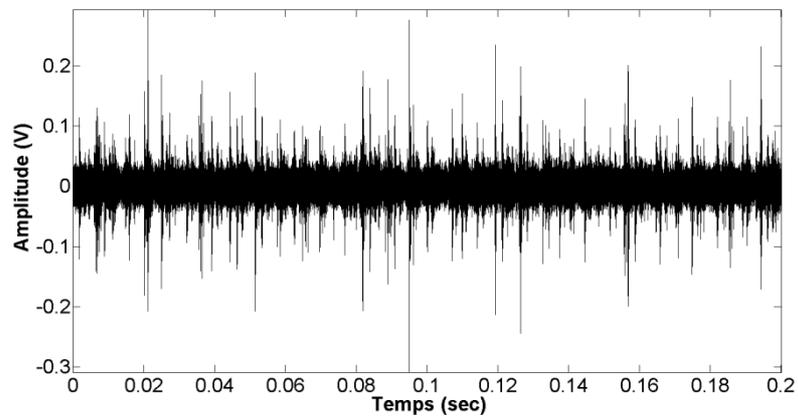


B1BS2L3V5 - Spectre enveloppe

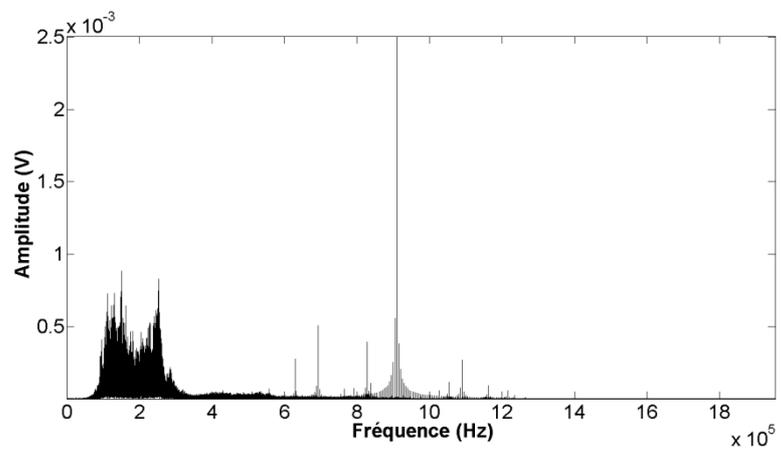


Roulement B2

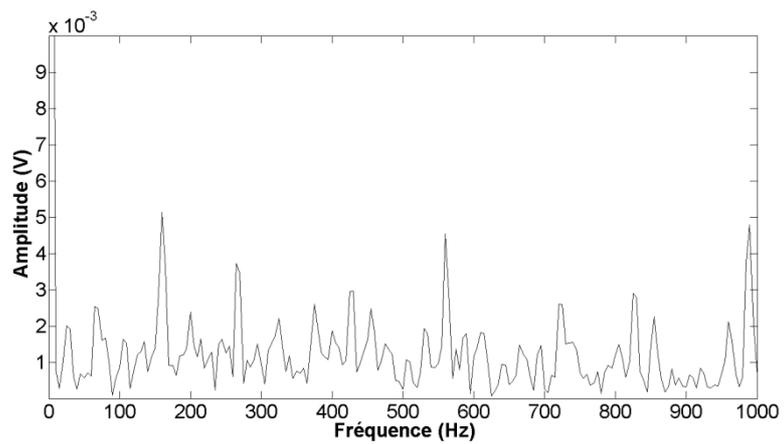
B2S2L3V5 - Signal brut



B2S2L3V5 - FFT

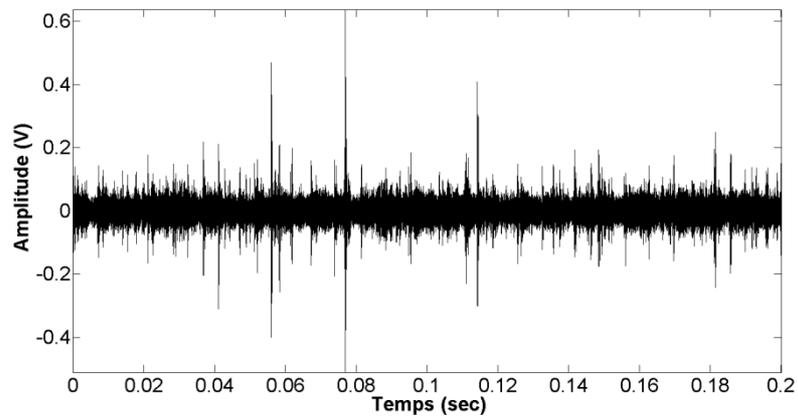


B2S2L3V5 - Spectre enveloppe

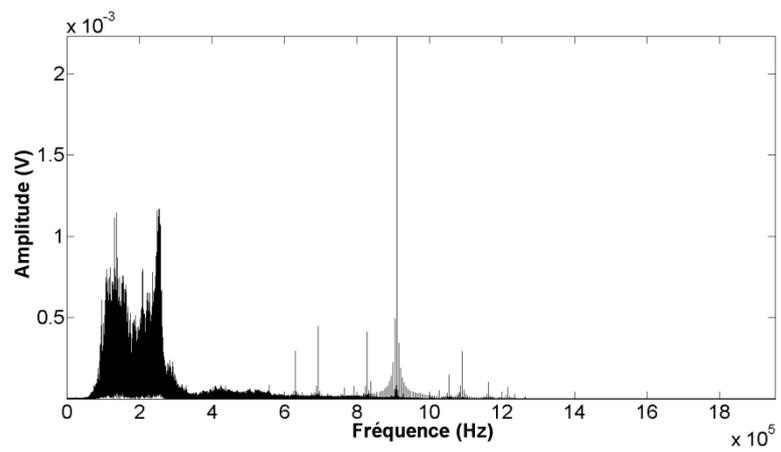


Roulement B3

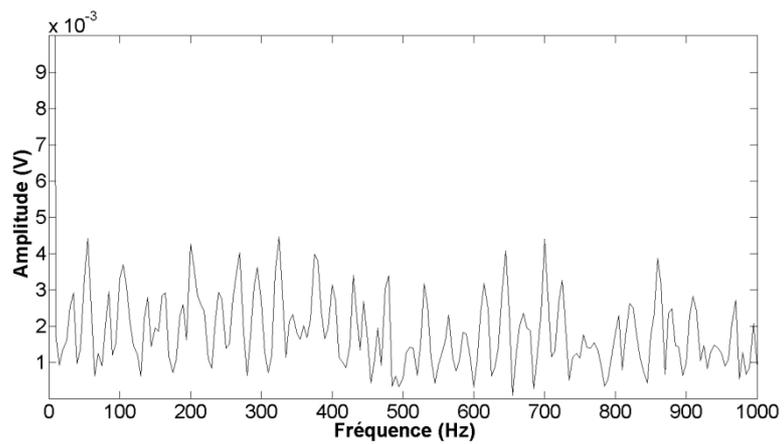
B3S2L3V5 - Signal brut



B3S2L3V5 - FFT



B3S2L3V5 - Spectre enveloppe



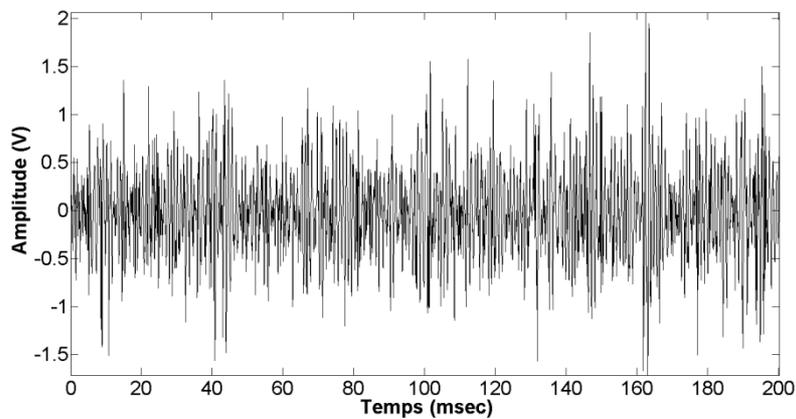
Annexe 3. Signaux en analyse vibratoire

L'annexe 3 contient le travail réalisé sur les signaux vibratoires acquis sur le banc de l'Université de Cranfield. Les signaux représentés sont ceux des roulements en position B1, B1B, B2 et B3, pour la vitesse 2000 tr/min et la charge de 788 daN.

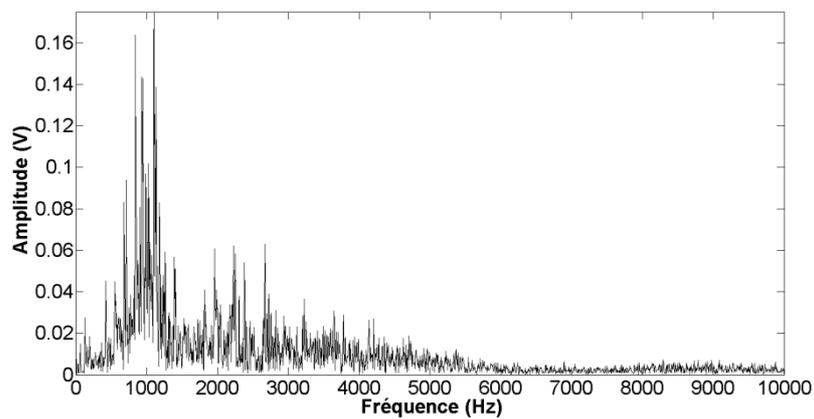
Cette annexe permet de réaliser un comparatif des signaux selon les roulements au niveau fréquentiel.

Roulement B1

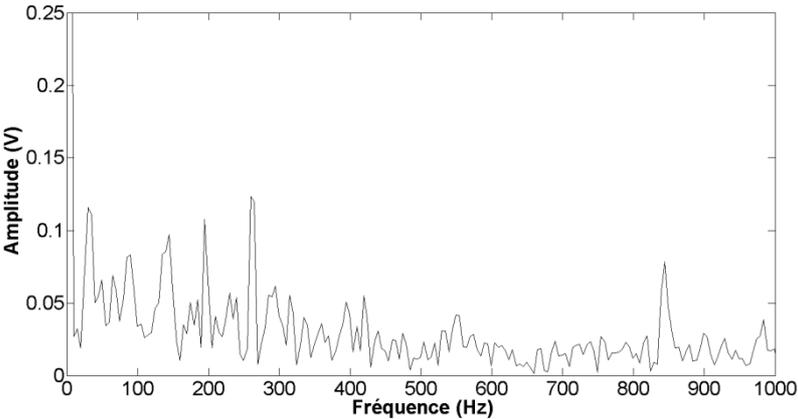
B1S2L3V5 - Signal brut



B1S2L3V5 - FFT

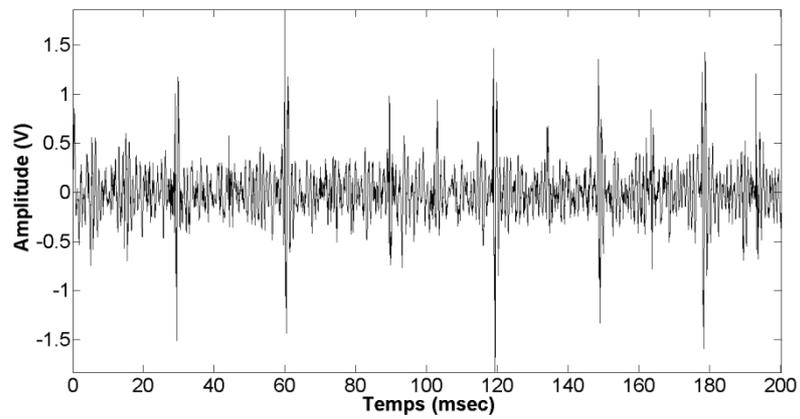


B1S2L3V5 - Spectre enveloppe

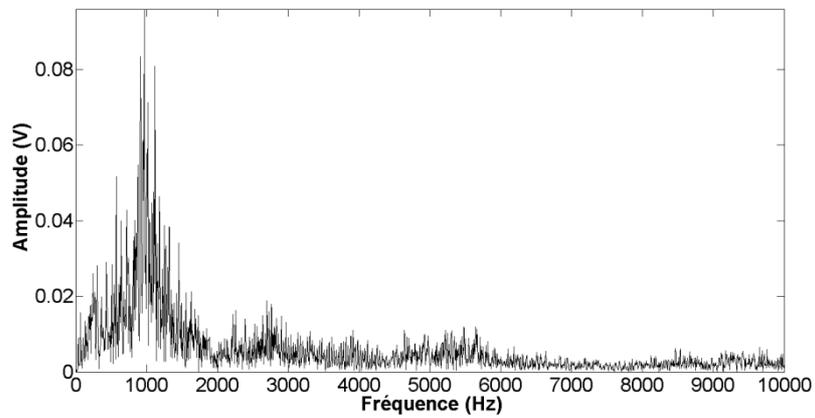


Roulement B1B

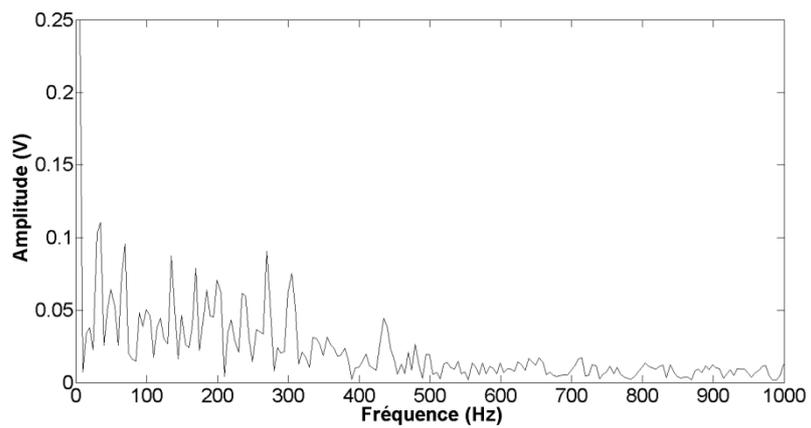
B1BS2L3V5 - Signal brut



B1BS2L3V5 - FFT

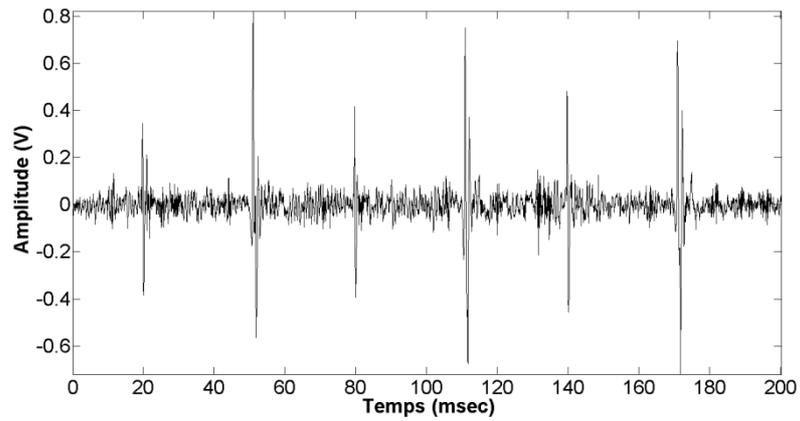


B1BS2L3V5 - Spectre enveloppe

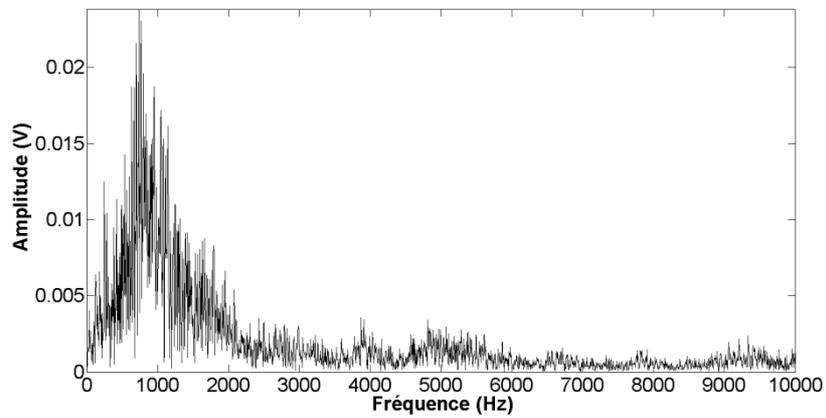


Roulement B2

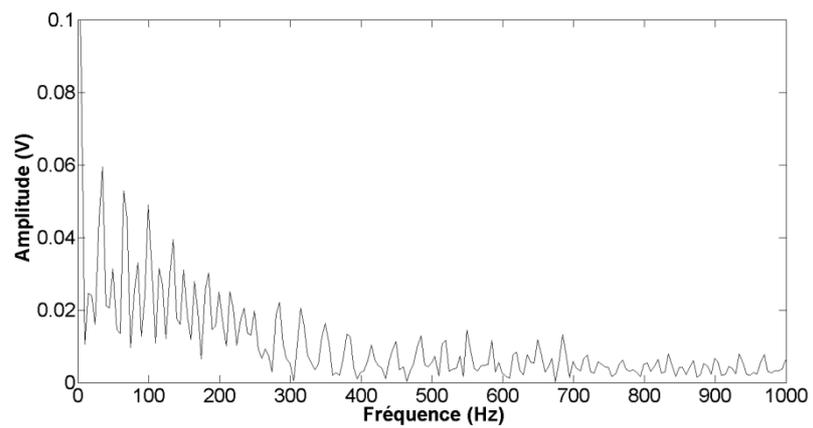
B2S2L3V5 - Signal brut



B2S2L3V5 – FFT

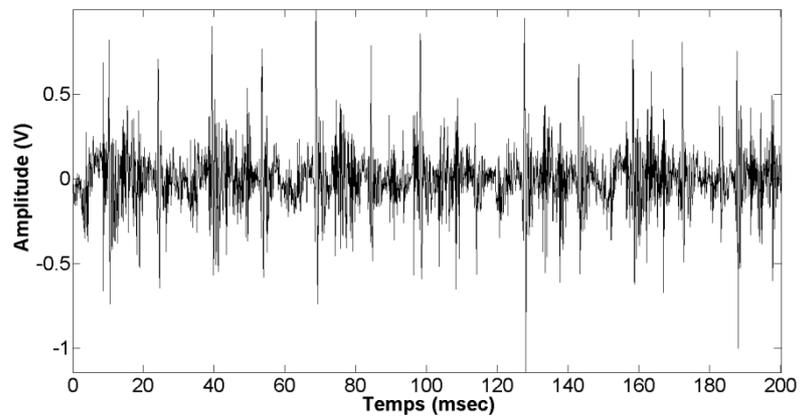


B2S2L3V5 – Spectre enveloppe

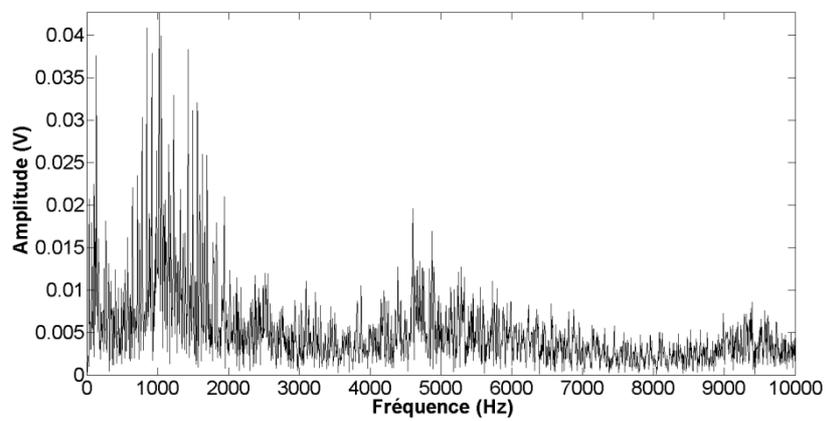


Roulement B3

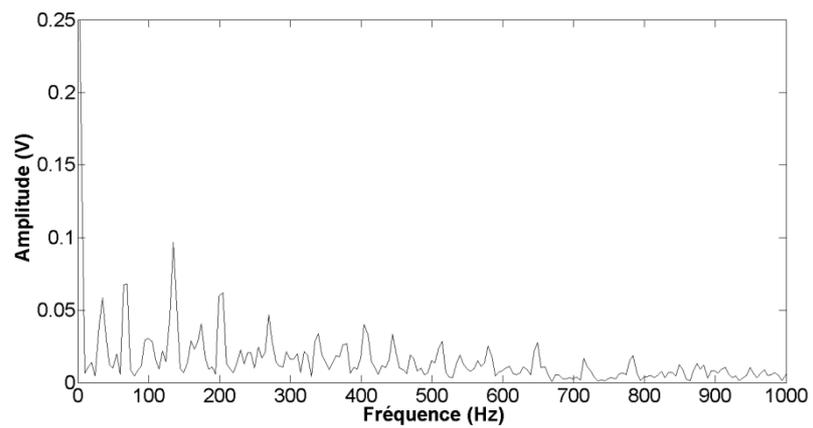
B3S2L3V5 - Signal brut



B3S2L3V5 – FFT



B3S2L3V5 – Spectre enveloppe



Annexe 4. Rapport d'essais de l'université de Cranfield (Version anglaise)

Annexe 5. Comparatif des facteurs en émission acoustique (version anglaise)

Nota : Les ANNEXES 4 et 5 représentent les rapports réalisés à l'Université de Cranfield. Tous les résultats provenant de ces rapports ont été retranscrits en partie dans ce mémoire.

Bibliographie

Ouvrages :

- [BOVA 86] BOVAGNE A., 1986. *Contrôle non destructif par émission acoustique*. Centre d'Actualisation Scientifique et Technique (CAST), chap. 4 et 5.
- [ROGE 88] ROGET J., 1988. Essais non-destructifs - l'émission acoustique, AFNOR CETIM, 14-15, 36-37, 110-113, 129-135.

Thèses, publications et cours :

- [BREN 02] BRENEUR C., 2002. *Eléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements*. Thèse, INSA de Lyon, p 13-16, p 18-21, p 24.
- [ESTO 04] ESTOCQ P., 2004. *Une approche méthodologique numérique et expérimentale d'aide à la détection et au suivi vibratoire de défauts d'écaillage de roulements à billes*. Thèse, Université de Champagne-Ardenne, p 10-21.
- [HUGE 02] HUGUET S., 2002. *Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polyester*. Thèse, INSA de Lyon, p 27, p 30-32.
- [JAMA 02-a] JAMALUDIN N., MBA D., 2002. Monitoring extremely slow rolling element bearings: Part I, NDT and E International, Vol 35. 349-358.
- [JAMA 02-b] JAMALUDIN N., MBA D., 2002. Monitoring extremely slow rolling element bearings: Part II, NDT and E International, Vol. 35, 359-366.
- [KIM 03] KIM Y-P., 2003. *Etude de la corrosion caverneuse d'un acier inoxydable austénitique : utilisation conjointe de l'émission acoustique et des techniques électrochimiques*. Thèse, INSA de Lyon, p 55-57, p 59-61.
- [M. AL 06] A. M. AL-GHAMD M., MBA D., 2006. *A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size*, Mechanical Systems and Signal Processing, 20, 1537–1571.
- [MORH 03] MORHAIN A., MBA D., 2003, *Bearing defect diagnosis and acoustic emission*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J., journal of Engineering Tribology, Vol 217, No. 4, p 275-272.

[TAND 99] TANDON N., CHOUDHURY A.,1999, A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings, Tribology international, vol. 32, n°8, pp. 469-480.

[VERV 09] VERVISCH-FORTUNE I., 2009. *Sensibilité de la technique d'émission acoustique à la corrosion des armatures dans le béton*. Thèse, Université de Toulouse, p 88-95.

Normes :

[NORM 1] AFNOR, norme NF 09-350(1984). Essais non destructifs. Vocabulaire utilisé en émission acoustique.

[NORM 2] NF EN 1330-9 (Avril 2000). Essais non destructif - Terminologie - Partie 9 : termes utilisés en contrôle par émissions acoustiques – Homologuée. *Remplace la norme AFNOR, norme NF 09-350(1984)*.

Techniques de l'ingénieur :

[MECH] MECHIN B., *Introduction aux méthodes de maintenance*. Technique de l'ingénieur (MT9280).

[MORE] MOREL J., *Surveillance vibratoire et maintenance prédictive*, Techniques de l'ingénieur (R6100).

[ROGE] ROGET J., *Emission acoustique*, Techniques de l'ingénieur(R3200).

Pour la page d'un site web :

[WEB 01] Conjuguez l'émission acoustique et la vibration. In : Mesure.[en ligne]. Disponible sur : <<http://www.mesures.com/archives/725Emissionacoustique.pdf>>. (consulté le 20/10/2010).

[WEB 02] Acoustic emission method. In.: Muravin.[en ligne]. Disponible sur : <<http://www.muravin.com/ae/>>. (consulté le 20/10/2010).

Liste des figures

Figure 1 : Optimisation de la politique de maintenance	6
Figure 2 : Planification du mémoire	7
Figure 3 : Schéma d'une courbe de traction.....	9
Figure 4 : Schéma de la chaîne d'émission acoustique, de la création de l'onde mécanique à la visualisation du signal EA.....	10
Figure 5a et 5b : Représentation d'une émission continue et d'une émission discrète	11
Figure 6 : Schéma d'une salve	12
Figure 7 : Effet Kaiser lors de deux mises en charges successives	13
Figure 8 : Plage de mesures fréquentielles de chaque méthode.....	14
Figure 9 : Représentation du déplacement d'ondes longitudinales.....	15
Figure 10 : Représentation du déplacement d'ondes transversales	16
Figure 11 : Représentation du déplacement d'ondes de surface (ondes de Rayleigh)	16
Figure 12 : Représentation du déplacement d'ondes de surface (ondes de Lamb)	17
Figure 13 : Chaîne de mesure Emission Acoustique	18
Figure 14 : Paramètres d'acquisition du signal en émission acoustique	21
Figure 15 : Coupe d'un capteur d'émission acoustique piézoélectrique.....	22
Figure 16 : Représentation d'une localisation de source acoustique avec deux capteurs	26
Figure 17 : Système à un degré de liberté	27
Figure 18 : Chaîne de mesure Analyse Vibratoire	29
Figure 20 : Schéma représentant la gamme utile du capteur	30
Figure 19 : Accéléromètre piézoélectrique	30
Figure 21 : Forme d'onde à 3 tr/min.....	39
Figure 22 : Reconstruction d'un signal à 3tr/min avec Matlab	39
Figure 23: Banc de fatigue.....	40
Figure 24 : Disposition des capteurs	40
Figure 25 : Butée à billes réf 51207	41
Figure 26 : Défaut sur le roulement de longueur 4.5 mm.....	42
Figure 27 : Système d'acquisition en Emission Acoustique (Pocket AE)	44
Figure 28 : Graphique des valeurs RMS en radial et axial en fonction des vitesses.....	46
Figure 29 : Graphique des valeurs Kurtosis en radial et axial en fonction des vitesses	46
Figure 30 : Graphique des valeurs Facteur Crête en radial et axial en fonction des vitesses	46
Figure 31 : Représentation du facteur RMS à partir des signaux d'émission acoustique	48
Figure 32 : Représentation du facteur Kurtosis à partir des signaux d'émission acoustique ..	48
Figure 33 : Représentation du facteur crête à partir des signaux d'émission acoustique	48
Figure 34 : Signaux bruts d'émission acoustique à 3 tr/min.....	49
Figure 35 : FFT [0-1M Hz] d'un signal d'émission acoustique à 3 tr/min.....	50
Figure 36 : Spectre enveloppe [0-20 Hz] d'un signal d'émission acoustique à 3 tr/min	50
Figure 37 : Signaux bruts d'analyse vibratoire à 3 tr/min.....	51
Figure 38 : FFT [0-20 kHz] d'un signal d'analyse vibratoire à 3 tr/min	51
Figure 39 : Spectre enveloppe [0-20 Hz] d'un signal d'analyse vibratoire à 3 tr/min.....	51
Figure 40 : Interprétation d'un signal d'émission acoustique à 3 tr/min	52

Figure 41 : Signal brut d'émission acoustique à 2000 tr/min.....	54
Figure 42 : FFT [0 - 1MHz] d'un signal d'émission acoustique à 2000 tr/min.....	54
Figure 43 : Spectre enveloppe [0 - 1000 Hz] d'un signal d'émission acoustique à 2000 tr/min.....	55
Figure 44 : Signaux bruts d'analyse vibratoire à 2000 tr/min.....	55
Figure 45 : FFT [0 - 20 kHz] des signaux d'analyse vibratoire à 2000 tr/min.....	56
Figure 46 : Spectre enveloppe [0 - 1000 Hz] des signaux d'analyse vibratoire à 2000 tr/min.....	56
Figure 47 : Spectre enveloppe d'un signal en émission acoustique à 2000 tr/min.....	57
Figure 48 : Spectre enveloppe d'un signal en analyse vibratoire (axial) à 2000 tr/min.....	57
Figure 49 : Spectre enveloppe d'un signal en analyse vibratoire (radial) à 2000 tr/min.....	57
Figure 50 : Phénomène de déversement de bague.....	60
Figure 51 : Position des capteurs sur le bloc roulement.....	62
Figure 52 : Schéma de la condition B1 avec la disposition des capteurs V, EA et H.....	63
Figure 53 : Schéma de la condition B1B avec la disposition des capteurs V, EA et H.....	63
Figure 54 : Schéma de la condition B2 avec la disposition des capteurs V, EA et H.....	63
Figure 55 : Schéma de la condition B3 avec la disposition des capteurs V, EA et H.....	64
Figure 56 : Présentation du banc (Université de Cranfield).....	65
Figure 57 : Eclaté d'un roulement COOPER SPLIT 01C/40GR.....	66
Figure 58 : Défaut artificiel réalisé sur la bague interne.....	66
Figure 59 : Préamplificateur EA.....	68
Figure 60 : Système d'acquisition PicoScope 4424 avec le capteur réf 623C01.....	69
Figure 61 : Système d'acquisition Holroyd.....	70
Figure 62 : Evolution du facteur RMS à partir des fichiers dat.....	72
Figure 63 : Evolution du facteur ABS ENERGY à partir des fichiers dat.....	73
Figure 64 : Evolution du facteur COUNTS à partir des fichiers dat.....	74
Figure 65 : Evolution du facteur ASL à partir des fichiers dat.....	75
Figure 66 : Evolution du facteur AMP à partir des fichiers dat.....	76
Figure 67 : Signal brut d'analyse par émission acoustique à 2000 tr/min charge 788 daN ...	77
Figure 68 : FFT d'un signal d'analyse par émission acoustique à 2000 tr/min charge 788 daN.....	77
Figure 69 : Spectre enveloppe d'un signal d'analyse par émission acoustique à 2000 tr/min charge 788 daN.....	78
Figure 70 : Indicateurs temporels des signaux d'émission acoustique (RMS, Kurtosis et Facteur Crête).....	79
Figure 71 : Signal brut d'analyse vibratoire à 2000 tr/min charge 788 daN.....	80
Figure 72 : FFT d'un signal d'analyse vibratoire à 2000 tr/min charge 788 daN.....	80
Figure 73 : Spectre enveloppe d'un signal d'analyse par analyse vibratoire à 2000 tr/min charge 788 daN.....	81
Figure 74 : Etude temporelle (RMS, Kurtosis et Facteur Crête) des signaux d'analyse vibratoire.....	82
Figure 75 : Evolution du niveau de Distress en fonction des 6 conditions.....	83
Figure 76 : Evolution du niveau de Décibel en fonction des 6 conditions.....	84

<i>Figure 77 : Tracé de l'Absolute Energy en fonction de la valeur RMS dans le cas du roulement BIB à vitesse variable (de 1000 à 2000 tr / min) et la charge fixée à 788 daN(L3).</i>	91
<i>Figure 78 : Tracé de l'AMP en fonction de COUNTS dans le cas du roulement BI à vitesse variable (de 1000 à 2000 tr / min) et la charge fixée à 788 daN (L3).</i>	92
<i>Figure 79 : Comparaison des facteurs Absolute Energy en fonction de RMS pour les 3 cas de charge.</i>	92
<i>Figure 80 : Schéma de la meilleure disposition des nuages de points</i>	94
<i>Figure 81 : Spectre en émission acoustique pour un défaut sur la bague externe à 2000 tr/min</i>	96
<i>Figure 82 : Spectre en émission acoustique pour un défaut sur la bague interne à 2000 tr/min</i>	97
<i>Figure 83 : Spectre en analyse vibratoire pour un défaut sur la bague externe à 2000 tr/min</i>	97

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Exemples de vitesses d'ondes</i>	17
<i>Tableau 2 : Tableau comparatif des deux méthodes</i>	32
<i>Tableau 3 : Protocole de mesure en analyse vibratoire</i>	37
<i>Tableau 4 : Protocole de mesure en émission acoustique</i>	38
<i>Tableau 5: Tableau récapitulatif des fréquences caractéristiques de défaut pour les butées à billes réf 51207.</i>	43
<i>Tableau 6 : Facteurs temporels pour l'analyse vibratoire en fonction des vitesses définies</i>	46
<i>Tableau 7 : Facteurs temporels pour l'émission acoustique en fonction des vitesses définies</i>	47
<i>Tableau 8 : Rappel des fréquences caractéristiques de défaut à 2000 tr/min pour une butée à billes 51207</i>	58
<i>Tableau 9 : Fréquences caractéristiques de défaut pour roulement 01C/40GR</i>	67
<i>Tableau 10 : Evolution du facteur RMS à partir des fichiers dat</i>	72
<i>Tableau 11 : Evolution du facteur ABS ENERGY à partir des fichiers dat</i>	73
<i>Tableau 12 : Evolution du facteur COUNTS à partir des fichiers dat</i>	74
<i>Tableau 13 : Evolution du facteur ASL à partir des fichiers dat</i>	75
<i>Tableau 14 : Evolution du facteur AMP à partir des fichiers dat</i>	76
<i>Tableau 15 : Tableau du niveau de Distress</i>	83
<i>Tableau 16 : Tableau du niveau de Décibel</i>	84
<i>Tableau 17 : Tableau comparatif réalisé à partir des études effectuées sur le banc de Reims et celui de Cranfield</i>	101

Emission acoustique et analyse vibratoire pour l'étude des défauts de roulements pour différents régimes moteurs.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Reims 2011.

RESUME

L'émission acoustique et l'analyse vibratoire sont deux techniques de contrôle non destructif. L'analyse vibratoire est une technique qui a fait ses preuves dans le diagnostic de défaut sur roulement à billes.

Ce travail a permis de mettre en évidence l'avantage de l'émission acoustique dans le cas d'une détection à basse vitesse (3tr/min). A vitesse moyenne, cette technique permet de détecter et de diagnostiquer le défaut sur un roulement. Cependant, sa théorie ne lui permet pas de réaliser ce type de diagnostic dès lors que le défaut se trouve sur la bague interne.

Ce travail a permis de réaliser une classification sur les facteurs d'émission acoustique (RMS, ABS ENERGY, ASL, COUNTS et AMP) suivant les conditions : charge, vitesse et type de défaut.

Mots clés : Emission acoustique, Analyse vibratoire, roulement à billes.

SUMMARY

The acoustic emission and vibration analysis are two techniques for non-destructive testing. Vibration analysis is a technique which made the evidence in the diagnosis of bearing defects.

This work allowed to bring to light the advantage of the acoustic emission in the case of detection at low speed (3rpm). At medium speed, this technique can detect and diagnose the defect on a bearing. However, his theory does not allow him to perform this type of diagnosis because the defect is located on the inner ring.

This work has allowed a classification on the resignation acoustic factors (RMS, ABS ENERGY, ASL, AMP and COUNTS) under the conditions : load, speed and type of defect.

Keywords : Acoustic emission, vibration analysis, bearing.