République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Yahia Fares Médéa

Faculté de technologie

Département Génie mécanique



Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme Master

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Mécatronique

Application du filtrage des signaux vibratoires pour le suivi des défauts de roulements

---

Présenté par :

- SLIMANI Bilal

-BABA ALI Mohamed Amine

Dirigé par :

Dr.BOUMAHDI Mouloud

2016/2017

Remerciements

Nous remercions le dieu tout puissant de nous avoir donné le savoir etl'école l'opportunité de pouvoir poursuivre nos études et de choisir un métieraussi noble.

Nous exprimons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à Dr. BOUMAHDI Mouloud pour l'aide précieuse qu'il nous apporté tout au long dela préparation de ce mémoire aussi pour les conseils qu'il n'a pas cessé de nousprodiguer.

Nous adressons également nos vifs remerciements et notre profonde gratitude :
Au président et aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font, en acceptant d'évaluer notre travail.

Nous remercions aussi tous les professeurs et les membres d'encadrement qui nous ont soutenu durant notre formation et tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail
À mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu

À ma grande famille

À ma très chère mère.

À mes Chères sœurs.

À tous mes amis

À mon collègue et binôme Bilal et sa famille
À tous mes enseignants depuis mon premier pas dans l'école

À tous ceux et celles que j'aime.

À tous mes camarades de la promotion 2017

Mohamed Amine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail
À mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu

À ma grande famille

À ma très chère mère.

À mon cher frère : Abdelghani

À mes Chères sœurs.

À tous mes amis en particulier : Ibrahim, Tariq, Ahmed, Khaled, Ali, Ben mouloud, ...

À mon collègue et binôme Amine et sa famille
À tous mes enseignants depuis mon premier pas dans l'école

À tous ceux et celles que j'aime.

À tous mes camarades de la promotion 2017

Bilal

Table des matières

Remerciements I

Dédicace II

Table des matières IV

List des figures VII

List des tableaux XI

Introduction générale1

1. Chapitre I : Traitement du signal2

1.1 Introduction…….3
1.2 Filtrage des signaux……..……..3
1.2.1 Généralités sur le filtrage……....3
1.2.2 Filtres analogique……....4
1.2.3 Filtres numérique……4
1.2.3.1 Réponse impulsionnelle numérique……4
1.2.4 Filtres idéaux……..5
1.2.4.1 Filtre passe-bande……...5
1.2.4.2 Filtre passe-bas……...6
1.2.4.3 Filtre passe-haut…….……6
1.2.5 Réalisabilité du filtre……...6
1.2.5.1 Invariance dans le temps……6
1.2.5.1.2 Causalité……6
1.2.5.1.3 Stabilité……..……6
1.2.6 Différents types de filtre numérique……..…..7
1.2.6.1 Les filtres à réponse impulsionnellefinie (ou filtre RIF)……...……7
1.2.6.1.1 Caractéristique des filtres RIF……....7
1.2.6.2 Les filtres à réponse impulsionnelle infinie (ou filtre RII)……8
1.2.6.2.1 Caractéristique des filtres RII……...……..8
1.2.7 Les types de filtres des filtres RII……...……8
1.2.7.1 Filtres Butterworth……..9
1.2.7.2 Filtres Chebycheff……..9
1.2.7.3 Filtres elliptiques……..10
1.3 Spectre……..12
1.3.1 Calcul du spectre……...……12
1.3.2 Série de Fourier…….……13
1.3.3 Transformée de Fourier……14
1.3.4 Analyseurs de spectres…….…15
1.3.5 Numérisation des signaux……...……..16

1.3.6 Echantillonnage……17
1.3.7 Théorème de Shannon……..……18
1.3.8 Filtre anti-repliement……...…18
1.3.9 Fenêtrage du signal……..…19
1.3.9.1 Fenêtre d'apodisation ……...……19
1.3.10 Zoom FFT……..…22
1.3.11 Elaboration du spectre moyenné……..…….23
1.3.12 Dualité résolution (temps/fréquence)……...……24
1.3.13 Représentation graphique d'un spectre…….25
1.4 Conclusion……...…….27

2. Chapitre II : Maintenance par analyse des signaux vibratoires28
2.1 Introduction……..……29
2.2 La maintenance par analyse vibratoire…….……29
2.2.1 Les différents types de maintenance ……...…….30
2.2.2 Les stratégies de maintenance ……..…30
2.2.3 La surveillance et le diagnostic…….31
2.2.3.1 La surveillance……..31
2.2.3.2 Le diagnostic……..…32
2.3 Vibration mécanique…….33
2.3.1 Définition d'une vibration ……..…….33
2.3.2 Caractéristique d'une vibration…….……33
2.3.3 Types des signaux vibratoires……...……34
2.3.3.1 Signaux déterministes……...…35
2.3.3.1.1 Signaux périodiques……..……35
2.3.3.1.2 Signaux non périodiques……..….36
2.3.3.1.3 Signaux aléatoires…….……36
2.3.2.2 Représentation temporelle des vibrations en fonction de leur nature...……37
2.3.4 Les grandeurs de mesures d'une vibration……...……37
2.3.5 Choix des grandeurs de mesure……...….38
2.3.6 Capteurs de vibrations……..…39
2.3.6.1 Capteur de déplacement……40
2.3.6.2 Capteur de vitesse……40
2.3.6.3 Capteur d'accélération……...…41
2.3.6.4 Comparaison des différents types de capteurs……..42
2.4 Les outils de surveillance vibratoire…….……42
2.5 Défauts des machines électriques tournantes……...……43
2.5.1 Défauts de roulements……..……45
2.5.2 Techniques et méthodes de surveillance de l'état des roulements…...……46
2.5.3 Fréquence caractéristiques pour les défauts d'un roulement……49
2.5.3.1 Défaut sur la bague extérieure……..…49
2.5.3.2 Défaut sur la bague intérieure……..…..50
2.5.3.3 Défaut sur l'élément roulant……51
2.5.3.4 Défaut sur la cage……...…..51

2.5.4 Rupture de la cage……..…..51
2.5.5 Déversement de bague…….…52
2.5.6 Jeux de paliers……..……53
2.5.7 Altération due au passage de courants de fuite…….……53
2.5.8 Les étapes d'identification des anomalies……..……..54
2.6 Conclusion……55

3. Chapitre III : Analyse des défauts de roulement 56
3.1 Introduction…….…..……57
3.2 Développement d'une interface graphique ……..57
3.3 Objectifs de l'application …….……58
3.4 Outils de développement de l'application ……...……59
3.5 Présentation de l'interface graphique…….……..60
3.6 Procédure d'utilisation de l'application……65
3.7 Présentation du banc d'essai…….66
3.8 Caractéristiques cinématique ……...……66
3.9 Analyse vibratoire des signaux ……..……..67
3.9.1 Analyse temporel……..……67
3.9.2 Analyse spectrale……..73
3.10 Conclusion…….…..96
Conclusion générale……97
Références…..……..98

Liste des figures

Figure 1.1 Opération de filtrage4

Figure 1.2Filtrage idéal d'une composante fréquentielle.5

Figure 1.3 Les 4 catégories de filtres idéaux5

Figure 1.4 Illustration d'un filtre passe-bas de type Butterworth d'ordre 6 9

Figure 1.5 Illustration d'un filtre passe-bas de type Chepycheff 1 d'ordre 610

Figure 1.6Illustration d'un filtre passe-bas de type Elliptique d'ordre 6 11

Figure 1.7Obtention du spectre à partir du signal temporel 14

Figure 1.8 Schéma de principe d'un analyseur FFT16

Figure 1.9 Numérisation d'un signal 16

Figure 1.10 Echantillonnage d'un signal 17

Figure 1.11 Le domaine temporel et le domaine fréquentiel 18

Figure 1.12 Filtre anti-repliement19

Figure 1.13 Observation d'un signal accélération à travers la fenêtre de HANN20

Figure 1.14Spectre en amplitude de la fenêtre rectangle et erreur maximale commise21

Figure 1.15 Principe de zoom 23

Figure 1.16.a Spectre instantané 24

Figure 1.16.b Spectre issu du moyennage 24

Figure 1.17 Représentation d'un spectre en échelle logarithmique de l'amplitude 26

Figure 1.18 Représentation d'un spectre en échelle linéaire de l'amplitude 26

Figure 2.1 Types de maintenance et évènements associé31

Figure 2.2 Déroulement d'une analyse vibratoire31

Figure 2.3 Vibration d'un oscillateur libre.33

Figure 2.4 Représentation d'une vibration sinusoïdale.34

Figure 2.5 Types de signaux vibratoires.34

Figure 2.6 Signal périodique.35

Figure 2.7 Représentation d'un signal harmonique.35

Figure 2.8 Représentation d'un signal périodique non harmonique36

Figure 2.9 Représentation d'un signal non périodique.36

Figure 2.10 Représentation d'un signal aléatoire.36

Figure 2.11 Grandeurs associées à une vibration. 38

Figure 2.12 Relation accélération, vitesse, déplacement. 38

Figure 2.13 Capteurs de vibration. 39

Figure 2.14 Principe de fonctionnement d'un capteur de déplacement.40

Figure 2.15 Principe de fonctionnement d'un capteur de vitesse.41

Figure 2.16 Principe de fonctionnement d'un capteur d'accélération. 41

Figure 2.17 Classification des défauts selon leurs origines.44

Figure 2.18 Constitution d'un roulement.46

Figure 2.19 Techniques de surveillance des roulements.46

Figure 2.20 Signature vibratoire d'un roulement : a) roulement en bon état, b) roulement dégradé.49

Figure 2.21 Caractéristiques d'un roulement. 49

Figure 2.22 Image vibratoires théorique d'un défaut de bague extérieur.50

Figure 2.23 Image vibratoires théorique d'un défaut de bague intérieure. 50

Figure 2.24 Image vibratoires théorique d'un défaut de bille. 51

Figure 2.25 Spectre de défauts de diversement. 53

Figure 2.26 spectre induit par une altération de bague de roulement par électroérosion. 54

Figure 2.27 Etapes d'identification des anomalies. 54

Figure 3.1Conception de l'application. 59

Figure 3.2Interface graphique 61

Figure 3.3Emplacement de fichier de données 62

Figure 3.4Panel d'analyse 62

Figure 3.5 Panel de zoom 63

Figure 3.6 Panel de signal brut (ou original) (SO) 63

Figure 3.7 Panel de signal filtrée (SF) 64

Figure 3.8 Panel des indicateurs des signaux brut et filtrée 64

Figure 3.9Procédure d'utilisation du programme 65

Figure 3.10 Schéma du banc d'essai 66

Figure 3.11Roulement à billes à une rangée 67

Figure 3.12Variation de RMS pour différents filtres et bandes fréquentielles 70

Figure 3.13Variation de Kurtosis pour différents filtres et bandes fréquentielles 71

Figure 3.14Variation de facteur crête pour différents filtres et bandes fréquentielles71

Figure 3.15Variation de facteur K pour différents filtres et bandes fréquentielles72

Figure 3.16Fréquences fondamentales et leurs harmoniques 75

Figure 3.17Signal temporel avec défaut sur la bague intérieure 76

Figure 3.18 Spectre fréquentiel dans la bande de 0 à 600 76

Figure 3.19Le signal filtrée, bande [0 5000] Hz, filtre butterworth 78

Figure 3.20Spectre du signal filtré, bande [0 5000] Hz, filtre butterworth 78

Figure 3.21Le signal filtrée, bande [0 5000] Hz, filtre chepycheff 79

Figure 3.22Spectre du signal filtré, bande [0 5000] Hz, filtre chepycheff 79

Figure 3.23Le signal filtrée, bande [0 5000] Hz, filtre elliptique 80

Figure 3.24Spectre du signal filtré, bande [0 5000] Hz, filtre elliptique 80

Figure 3.25Le signal filtrée, bande [0 5000] Hz, filtre FIR 81

Figure 3.26Spectre du signal filtré, bande [0 5000] Hz, filtre 81

Figure 3.27Le signal filtrée, bande [5000 10000] Hz, filtre butterworth 82

Figure 3.28Spectre du signal filtré, bande [5000 10000] Hz, filtre butterworth 82

Figure 3.29Le signal filtrée, bande [5000 10000] Hz, filtre chepycheff 83

Figure 3.30Spectre du signal filtré, bande [5000 10000] Hz, filtre chepycheff83

Figure 3.31Le signal filtrée, bande [5000 10000] Hz, filtre elliptique 84

Figure 3.32Spectre du signal filtré, bande [5000 10000] Hz, filtre elliptique84

Figure 3.33 Le signal filtrée, bande [5000 10000] Hz, filtre FIR85

Figure 3.34 Spectre du signal filtré, bande [5000 10000] Hz, filtre FIR 85

Figure 3.35 Le signal filtrée, bande [10000 15000] Hz, filtre butter Worth 86

Figure 3.36 Spectre du signal filtré, bande [10000 15000] Hz, filtre butter Worth86

Figure 3.37 Le signal filtrée, bande [10000 15000] Hz, filtre chepycheff 87

Figure 3.38 Spectre du signal filtré, bande [10000 15000] Hz, filtre chepycheff87

Figure 3.39 Le signal filtrée, bande [10000 15000] Hz, filtre elliptique 88

Figure 3.40 Spectre du signal filtré, bande [10000 15000] Hz, filtre elliptique 88

Figure 3.41 Le signal filtrée, bande [10000 15000] Hz, filtre FIR 89

Figure 3.42 Spectre du signal filtré, bande [10000 15000] Hz, filtre FIR 89

Figure 3.43 Le signal filtrée, bande [10000 20000] Hz, filtre butter Worth90

Figure 3.44 Spectre du signal filtré, bande [10000 20000] Hz, filtre butter Worth90

Figure 3.45 Le signal filtrée, bande [10000 20000] Hz, filtre chepycheff 91

Figure 3.46 Spectre du signal filtré, bande [10000 20000] Hz, filtre chepycheff91

Figure 3.47 Le signal filtrée, bande [10000 20000] Hz, filtre elliptique 92

Figure 3.48 Spectre du signal filtré, bande [10000 20000] Hz, filtre elliptique 92

Figure 3.49 Le signal filtrée, bande [10000 20000] Hz, filtre FIR 93

Figure 3.50 Spectre du signal filtré, bande [10000 20000] Hz, filtre FIR 93

Figure 3.51 Le signal filtrée, bande [7500 12500] Hz, filtre butter Worth 94

Figure 3.52 Spectre du signal filtré, bande [7500 12500] Hz, filtre butter Worth 94

Figure 3.53 Le signal filtrée, bande [7500 12500] Hz, filtre chepycheff 95

Figure 3.54 Spectre du signal filtré, bande [7500 12500] Hz, filtre chepycheff95

Figure 3.55 Le signal filtrée, bande [7500 12500] Hz, filtre elliptique 96

Figure 3.56 Spectre du signal filtré, bande [7500 12500] Hz, filtre elliptique96

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 Caractéristiques des différents types de filtres.12

Tableau 1.2Bruit de fenêtrage pour quelques fenêtres usuelles. 22

Tableau 2.1Représentation temporelle des vibrations en fonction de leur nature. 37

Tableau 2.2Comparaison entre les différents types de capteur. 42

Tableau 2.3 les principaux modes défaillants rencontrés sur les machines tournantes. 45

Tableau 3.1 Caractéristiques du roulement et les détails des tests. 67

Tableau 3.2 L'ensemble des résultats des indicateurs a différente bande fréquentiels. 69

Tableau 3.3 La comparaison entre les fréquences théoriques et les fréquences observée. 77

ملخص

تحليل إشارات الاهتزاز هو أداة مراقبة وتشخيص الاكثر استخداما في صيانة الآلات الدوارة.يستند هذا التحليل في المقام الأول على معالجة الإشارات وحساب المؤشرات الإحصائية
وطيفلترددات.في هذه الدراسة، تم عرض تقنيات ترشيح الإشاراتـوتصميم وتطوير واجهة رسومية لتبسيط وتسريع حساب أهم أدوات الكشف وتحديد الخلل .أظهر تطبيقتقنيات الترشيح المقترحة من خلال واجهة المستخدم الرسومية نتائج مشجعة و ساعدفيالتحقق من دقة الحسابات التي يقوم بها البرنامج المصمم.

الكلمات المفتاحية:الترشيح، المؤشرات الإحصائية، طيف الترددات، عيوب المدحرجات.

Résumé

L’analyse des signaux vibratoires est l’outil de contrôle et de diagnostic le plus utilisé dans la maintenance des machines tournantes. Cette analyse s'appuie en premier lieu sur le traitement des signaux ainsi le calcul des indicateurs statistiques et le spectre fréquentiel (FFT).

Dansla présente étude, les techniques de filtrage des signaux sont présentées et une interface graphique pour simplifier et accélérer le calcul des principaux outils de détection et d'identification des défauts est développée.

L’application des techniques de filtrageproposées via l'interface graphique a montré des résultats encourageants et a permis de vérifier l'exactitude des calculs effectués par le programme développé.

Mots clés :Filtrage, indicateurs statistiques, spectre, défauts de roulement.

Resume

Vibration signal analysis the most widely used control and diagnostic tool for the maintenance of rotating machines. This analysis relies firstly on signal processing and the calculation of statistical indicators and the frequency spectrum (FFT).

In the present study,filtring techniques are presented and a graphical interface to simplify and accelerate the calculation of the main detection and identification tools for defectsis developed.

The application of the filtering techniques by using the graphical interface has shown encouraging results and allowed to verify the accuracy of the calculation scarried out by the developed program.

Key words : filtering, statistical indicators, spectrum, defects of bearing.

Introduction générale

La maintenance par analyse des signaux vibratoires prélevés d'unemachine tournante consiste à suivre son état pendant son fonctionnement afin d'intervenir lorsque certains paramètresmesurés dépassent des seuils prédéfinis. Cette méthode est appelée maintenance conditionnelle. En observant l'évolution du niveau de vibrations, il est possible d'obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine.

L'analyse des vibrations est un outil de contrôle et de diagnostic le plus utilisé dans la maintenance des machines tournantes. Une maintenance par analyse des signaux vibratoires fiable nécessite souvent de faire appelà des techniques de traitement du signal. On pense en particulier à la démodulationd'amplitude (ou détection d'enveloppe), cepstre, kurtosis, facteur crête, valeur efficace etc.Tous ces outils permettent d'établir des diagnosticspuissants et fiables. Ils peuvent également être utilisés dans le cadre de lasurveillance, car ils sont adaptés pour détecter des défauts à un stade précoce etpour surveiller des installations à cinématique complexe (réducteurs, compresseur…).

Le présent projet traite le filtrage des signaux vibratoires. Pour ce faire, une interface graphique pour l'analyse des signaux vibratoiresest développée. Cette interface vise àassurer les fonctions suivantes :lire les fichiers des signaux enregistrés puistracer le signal original et le signal filtré et calculer le spectre fréquentiel via la transformée de Fourier rapide et afficher les valeurs des indicateurs statistiques des deux signaux.

Compte tenu les objectifs que nous avons définis, le mémoirecomporte trois chapitres :

Le chapitre 1, présente des notions générales sur le traitement du signal.

Le chapitre 2, expose des notions relatives à la maintenance par l'analyse des signaux vibratoires. Il présente les outils de détection des défauts et les outils de diagnostic.

Le chapitre 3, présente en détail les étapes de conception d'uneinterface graphique ensuite l'application des techniques de filtrage sur un signal réel.

1.1Introduction

Le traitement du signal est un ensemble de techniques et de méthodes ayant pour objectif d'extraire le maximum d'informations d'un signal traduisant un phénomène physique donné.

Parmi les outilsles plus importants intervenant en traitement du signal,il y a le filtrage et le spectre fréquentiel. Le filtrage des signaux est quasiment incontournable dans tous les circuits ou programmes de traitement. Le spectre d'un signal est le résultat du calcul d'une intégrale (intégrale de Fourier) permettant de passer d'une fonction temporelle appelée signal à une fonction fréquentielle appelée spectre.

1.2Filtrage des signaux

Le filtrage est une opération courante et très importante en traitement du signal. Les signaux acquis au moyen de capteurs sont, dans la majorité des cas, entachés de signaux indésirables, appelés bruit électronique, qui tendent à perturber, voir noyer complétement le signal utile à acquérir. Le filtrage, alors, pour but essentiel, d'améliorer la qualité du signal en rejetant la composante perturbatrice tout en conservant la partie porteuse de l'information utile [1], [2].

1.2.1 Généralités sur le filtrage

Le filtrage s'applique à des signaux représentés sous forme analogique (filtres analogique), ou sous forme numérique après échantillonnage du signal (filtres numériques).

Dans le cas d'un signal numérique, le filtrage s'effectue par une succession d'opérations mathématiques sur un signal discret [3]. Il peut être réalisé par des circuits intégrés, des processeurs programmables (microprocesseurs, microcontrôleurs, etc.), ou par logiciel dans un ordinateur.

Un filtre est un algorithme de calcul qui opère une modification d'un signald'entrée x (t) pour produire un signal de sortie y (t). A cette modification du signal temporel correspond une modification du spectre $X(j^{\omega})$: le rôle d'un filtre est de supprimer les composantes indésirables du signal d'entrée tout en conservant celles portant une information.

Si le filtre est linéaire, le contenu spectral de $Y(j^{\omega})$ contient au mieux celui de $X(j^{\omega})$: le filtre se contente d'amplifier ou d'atténuer certaines composantes présentes dans $X(j^{\omega})$. Un filtre non linéaire fait apparaître des composantes inexistantes dans $X(j^{\omega})$. La plupart des filtres sont linéaires.

1.2.2Filtres analogiques

Cetteopérationmetenœuvredescomposantsélectroniquespassifs (Résistances, capacités, inductances) ou actifs (amplificateur opérationnels). De tels filtres réalisent entre les signaux d'entrée et de sortie des relations intégro-différentielles linéaires traduites par la fonction de transfert opérationnelle construite précédemment à partir de spécifications données.

La théorie des filtres actifs comporte deux approches principales : les filtres actifs qui imitent les filtres inductance/capacitance et les filtres actifs constitués d'une cascade de cellules élémentaires du second ordre comportant un seul amplificateur opérationnel. La seconde approche est la plus fréquemment utilisée dans la conception de filtres actifs.

1.2.3Filtres numériques

Un filtre numérique est un système à temps discret dans lequel toutes les variables (entrée, sortie ..) sont sous forme numérique. les coefficients d'un tel filtre sont également numériques.

La réponse de ce filtre à une excitation s'obtient en effectuant la convolution de cette excitation avec une fonction caractéristique du filtre appelée impulsionnelle et notée $h(n)$.

Soit $h(n)$ la réponse impulsionnelle d'un filtre numérique et $x(n)$ le signal d'entrée. La réponse $y(n)$ du filtre à ce signal d'entrée est donnée par le produit de convolution discret :



$$y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k)h(n-k) \qquad (1.1)$$

Figure 1.1 Opération de filtrage

Si l'entrée $x(n)$ est l'impulsion de Dirac $\delta(n)$, la sortie $y(n)$ représente la réponse impulsionnelle $h(n)$ du filtre [2].

1.2.4Filtres idéaux

Le cas idéal est un filtrage qui élimine totalement les bandes indésirables sans transitionet sans introduire de déphasage dans les bandes conservées (figure 1.2). Selon la bande rejetée, on rencontre les 4 grandes catégories de filtres décrites en figure 2.3 (*A*(dB) est l'atténuation apportée par le filtre sur une composante de fréquence *f*) [4].

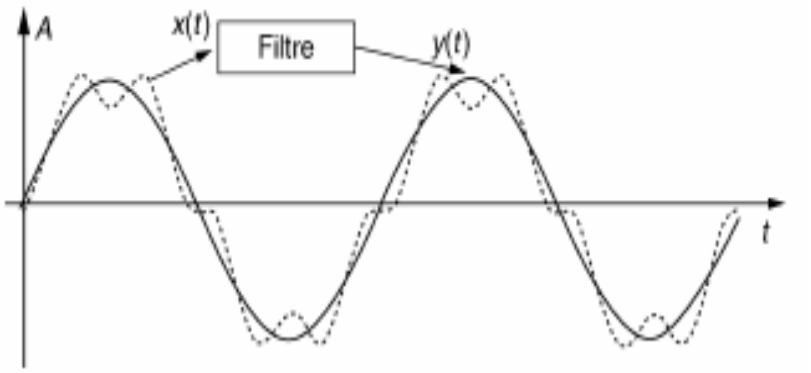


Figure 1.2 Filtrage idéal d'une composante fréquentielle.

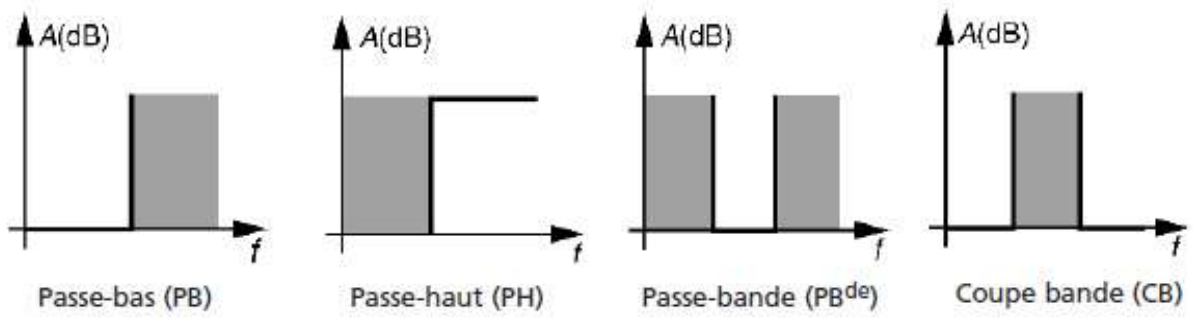


Figure 1.3 Les 4 catégories de filtres idéaux [4].

1.2.4.1Filtre passe-bande

Un filtre passe-bande ne laisse passer que les composantes dans les fréquences se situent dans une plage bien définie, tandis que les autres composantes sont rejetées. Par conséquent, l'amplitude vibratoire mesurée ne concerne que la portion du signal correspondant à ces fréquences.

1.2.4.2 Filtre passe-bas

Un filtre passe-bas ne laisse passer que les composantes dans les fréquences se situent en dessous d'une valeur donnée(figure1.3).

Ce type de filtre est utilisé, par exemple pour éviter l'effet de repliement du spectre, dû à une fréquence d'échantillonnage trop faible par rapport à la fréquence maximale du signal.

1.2.4.3 Filtre passe-haut

Un filtre passe-haut ne laisse passer que les composantes dans les fréquences se situent au-dessus d'une valeur donnée (figure1.3). Ce type de filtre est employé, par exemple, pour éliminer la composante continue (fréquence zéro) d'un signal obtenu à partir d'un prosimètre [5].

1.2.5Réalisabilité du filtre

Pour qu'un filtre numérique soit réalisable, il doit vérifier les trois conditions suivantes :

1.2.5.1 Invariance dans le temps

Un filtre numérique est invariant dans le temps s'il réagit de la même façon à une excitation d'entrée quel que soit l'intervalle de temps ou est appliquée cette excitation [2].

$$y(n) = f(x(n)) \rightarrow y(n-p) = f(x(n-p)) \qquad (1.2)$$

1.2.5.2 Causalité

Un filtre numérique est causal si l'absence d'excitation à l'entrée se traduit par un signal nul à la sortie.

1.2.5.3 Stabilité

La notion de stabilité des filtres est l'un des critères les plus importants à prendre en compte lors de la conception d'un filtre numérique. En effet, si le filtre se révèle instable, il n'aura aucune utilité pratique et peut même se révéler nocif.

- ✓ Théorème 1

  Un filtre numérique de réponse impulsionnelle $\{h(n), n = 1, 2, 3.....\}$ est dit stable si et seulement si la somme de tous les échantillons de sa réponse impulsionnelle est finie.

  $$\sum_{n=0}^{+\infty} |h(n)| \prec +\infty \qquad (1.3)$$

- ✓ Théorème 2

  Un filtre numérique causal de fonction de transfert $H(z)$ est stable si et seulement si tous les pôles de $H(z)$ sont à l'intérieur du cercle unité dans le plan des z.

1.2.6Différents types de filtre numérique

L'une des classifications possibles des filtres numériques consiste à tenir compte de la durée de leur réponse impulsionnelle. On distingue alors deux grandes classes de filtres numériques [2] :

1.2.6.1Les filtres à réponse impulsionnelle finie (ou filtre RIF)

Ce sont des filtres numériques caractérisés par une réponse uniquement basée sur les valeurs du signal d'entrée. Du fait du nombre fini des échantillons de la réponse impulsionnelle, ces filtres sont toujours stables

- **Caractéristique des filtres RIF**

Les principales caractéristiques des filtres RIF sont :

h la réponse impulsionnelle

$$\sum_{i=0}^{N}|h(n)|<+\infty \quad (1.4)$$

La relation entre le signal d'entrée et le signal de sortie est donnée par :

$$y(n)=\sum_{i=0}^{N}b_i x(n-i) \quad (1.5)$$

Ou les $b_i$sont des constantes et n désigne la longueur du filtre.

La fonction de transfert du filtre s'écrit :

$$H(z)=\sum_{i=0}^{N}b_i z^{-i} \quad (1.6)$$

Ces filtres sont caractérisés par :

-Une plus grande stabilité numérique que les filtres RII.

-Une grande facilité d'implantation dans un système numérique de traitement.

1.2.6.2Les filtres à réponse impulsionnelle infinie (ou filtre RII)

Ils sont nommés ainsi parce que leur réponse impulsionnelle est de durée théorique infinie.

$$h(n)\neq 0 \quad \text{pour} \quad n=0,1,...,+\infty \quad (1.7)$$

Ce sont des filtres numériques tels que le signal de sortie dépend, à la fois, du signal d'entrée et des échantillons de ce signal de sortie. Pour cette raison, ils sont aussi nommés filtres récursifs.

- **Caractéristique des filtres RII**

Les principales caractéristiques des filtres RII sont :

La relation entre le signal d'entrée et le signal de sortie :

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N} b_i x(n-i) - \sum_{i=1}^{M} a_i y(n-i) \quad (1.8)$$

La fonction de transfert :

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^{N} b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^{M} a_i z^{-i}} \quad (1.9)$$

Les RII peuvent être instables en raison de leur structure à base de pôles et de zéros :

$$H(z) = b_0 z^{M-N} \frac{\prod_{i=0}^{N} (z - z_i)}{\prod_{i=0}^{M} (z - p_i)} \quad (1.10)$$

Une plus grande sensibilité numérique (quantification des coefficients, bruits de calcules).

1.2.7Les types de filtres des filtres RII

Les principaux types de filtres de cette dernière famille sont les suivants :

- Butterworth.
- Chepycheff (type 1).
- Cauer (elliptiques).

1.2.7.1FiltresButterworth

L'atténuation d'un filtre Butterworth à sa fréquence de coupure est de 3 dB quel que soit son ordre. Le gain est pratiquement égal à 0 dB dans la première partie de la bande passante, commence à décroitre progressivement à partir d'une fréquence fx pour atteindre -3 dB à fc. Au-delà de cette fréquence, la décroissance est de 6n dB/octave (avec n l'ordre du filtre), soit 36db/octave pour un filtre d'ordre 6

Plus l'ordre du filtre est élevé, plus la portion [fx – fc] de la bande passante dans laquelle l'amplitude de signal est atténuée est faible.la figure 1.2illustre la réponse en fréquence d'un filtre passe-bas de type Butterworth d'ordre 6

Dans la bande passante, l'erreur d'amplitude est donc comprise entre 0 et 41.25% [6] .

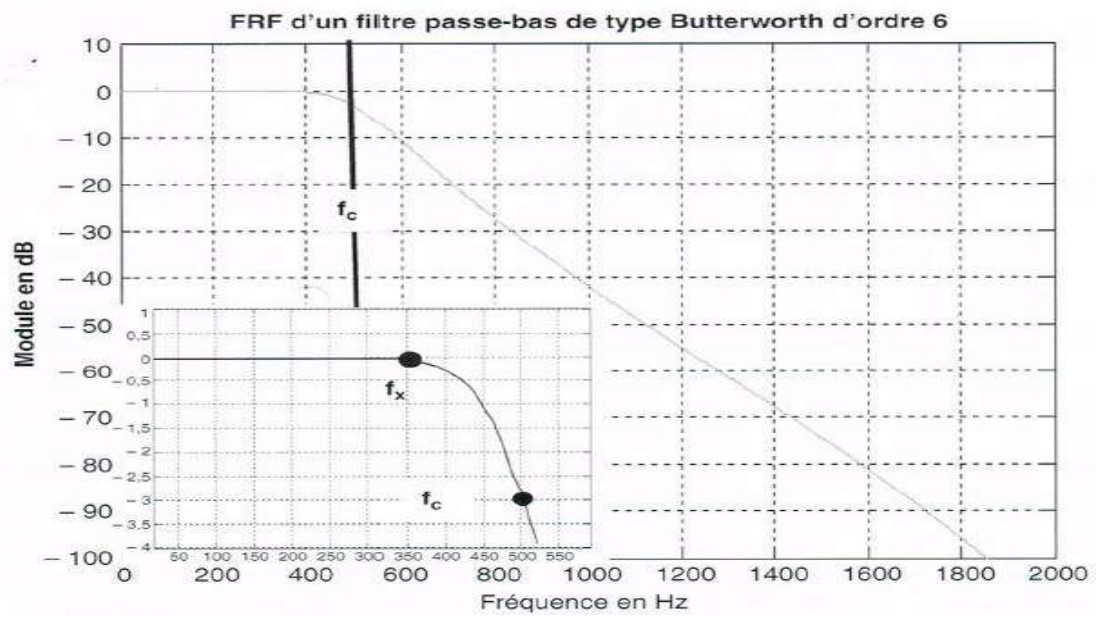


Figure 1.4 Illustration d'un filtre passe-bas de type Butterworth d'ordre 6.

1.2.7.2Filtres Chebycheff

Le gain dans la bande passante d'un filtre Chepycheff 1 ondule avec un taux d'ondulation R_p paramétrable.

Pour R_p = 0.05 dB, il en résulte une erreur maximale dans la bande passante sur l'amplitude d'une composante égale à 0.58 %.

Le nombre d'ondulation correspond à l'ordre du filtre. L'atténuation du filtre à la fréquence de coupure correspond à la valeur du taux d'ondulation. Au-delà de cette fréquence, la vitesse de décroissante est supérieure à celle du filtre Butterworth de même ordre [6].

La figure 1.3 illustre réponse en fréquence un filtre passe-bas de type Butterworth d'ordre 6.

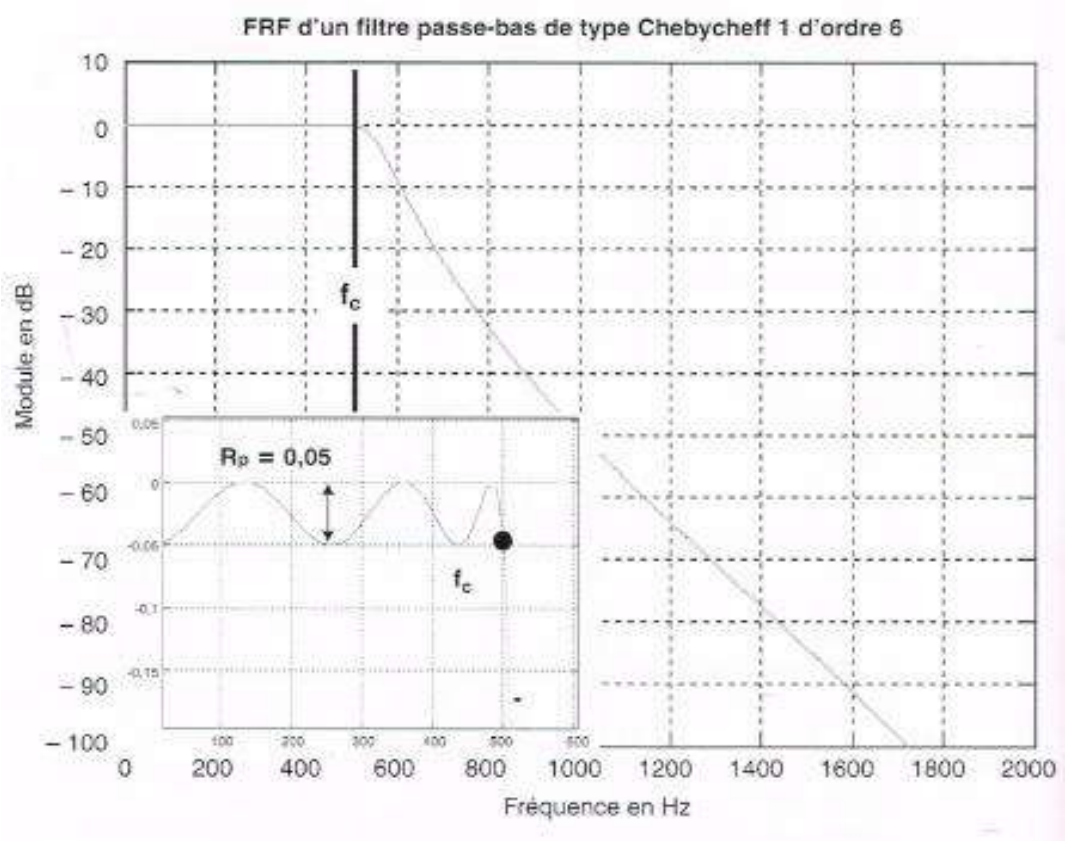


Figure 1.5 illustration d'un filtre passe-bas de type Chepycheff 1 d'ordre 6

1.2.7.3Filtres elliptiques

Le gain dans la bande passante d'un filtre elliptique ondule avec un taux d'ondulation R_p paramétrable.

Pour R_p = 0,05 dB, il en résulte une erreur maximale dans la bande passante sur l'amplitude d'une composante égale à 0,58 %.

Le nombre d'ondulation correspond à l'ordre du filtre. L'atténuation à la fréquence de coupure correspond à la valeur du taux d'ondulation R_p. L'atténuation dans la bande d'arrêt ondule et l'atténuation minimale R_s est paramétrable. La pente d'atténuation dans la zone de transition après la fréquence de coupure est beaucoup plus raide que celle d'un filtre de type Chepycheff ou Butterworth de même ordre.la figure 1.4 illustre réponse en fréquence d'un filtre passe-bas de type elliptique d'ordre 6 [6].

En version analogique, ces filtres sont utilisés comme filtres anti-repliement.

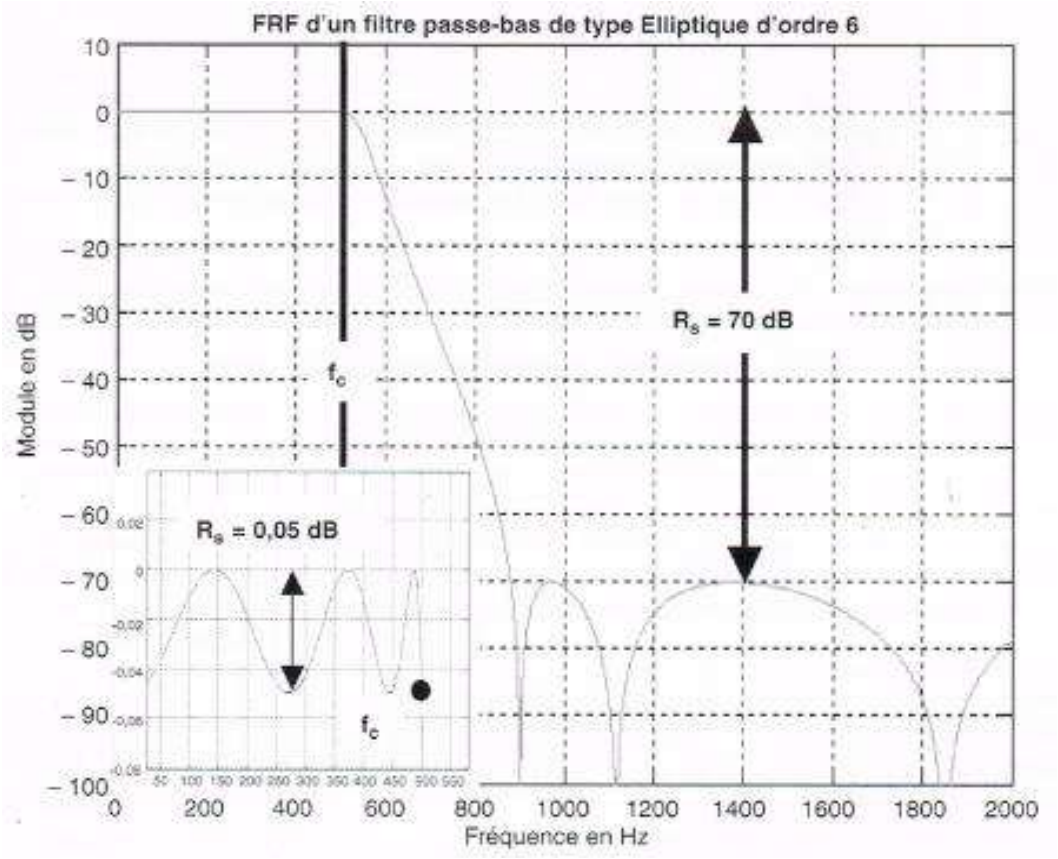


Figure 1.6 Illustration d'un filtre passe-bas de type Elliptique d'ordre 6

Le tableau 1.1 donne les principales caractéristiques des différents types de filtres

Tableau 1.1 Caractéristiques des différents types de filtres [7].

BUTTERWORTH	Réponse en amplitude plate jusqu'à la fréquence de coupure Affaiblissement optimal dans la bande passante et ajustable dans la bande atténuée au prix d'un ordre élevé. Distorsions de phase nonlinéaires significatives à +/- une décade de la fréquence de coupure
TCHEBYCHEV	Léger « ripple » dans la bande passante (TCHEBYCHEV 1), plus important dans la bande atténuée (TCHEBYCHEV 2). Affaiblissement ajustable dans les deux bandes. Distorsion de phase réduite.
BESSEL	Distorsion de gain significative dans la bande passante. Distorsion de phase minimale. Fort affaiblissement dans la

	bande atténuée
CAUER(ELLIPTIQUE)	Léger « ripple » dans la bande passante. Affaiblissement maximal après la fréquence de coupure, distorsion de phase importante

1.3Spectre

Le spectre d'un signal est le résultat du calcul d'une intégrale (intégrale de Fourier) permettant de passer d'une fonction temporelle appelée signal à une fonction fréquentielle appelée spectre. Ce résultat est généralement obtenu grâce à l'algorithme FFT(Faste Fourier Transfer*)* qui réduit considérablement le temps de calcul. L'utilisation de cet outil mathématique nécessite d'effectuer sur le signal à analyser un certain nombre d'opérations indispensables (numérisation, fenêtrage, périodisation) mais qui entraînent quelques modifications entre le spectre calculé et le spectre réel, altérations dont on doit limiter les effets [5].

1.3.1Calcul du spectre

Un spectre peut être obtenu de deux façons :

1. Analogiquement, par l'utilisation d'un filtre « accordable »,à largeur de bande, soit constante, soit proportionnelle à la valeur de la fréquence centrale retenue. L'image spectrale est obtenue en accordant le filtre sur toutes les fréquences de la plage désirée. Pour cette raison, les appareils qui utilisent cette technique sont souvent dits filtres à balayage.

2. Numériquement, par l'application d'un algorithme de calcul(transformée de Fourier discrète) qui a la propriété de décomposer un signal complexe en ses différentes composantes élémentaires définies par leur amplitude et leur fréquence et qui permet de passer d'une représentation temporelle à une représentation spectrale.

1.3.2Série de Fourier

Physiquement, les signaux sont enregistrés sous la forme de la variation d'un paramètre (force, contrainte, amplitude, accélération, tension, pression, etc.) en fonction du temps. Or il est souvent plus facile de caractériser un signal dans le domaine fréquentiel.

Cette représentation est obtenue grâce au théorème de Fourier qui démontre que toutefonction périodique f (t) de période T, peut se représenter par la somme d'une série defonctions sinusoïdales de périodes T, T/2, ..., T/ k… que l'on appelle série de Fourier que l'on peut écrire sous la forme d'un développement :

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(2\pi kt) + b_k \sin(2\pi kt) \qquad (1.11)$$

Où les coefficients a_o, $a_k$et $b_k$ont les expressions suivantes :

$$a_0 = \int_0^T 1/T \; f(t)dt \; (1.12)$$

$$a_k = \int_0^T 2/Tf(t)\cos(2\pi kt/T)dt \; (1.13)$$

$$b_k = \int_0^T 2/Tf(t)\sin(2\pi kt/T)dt \; (1.14)$$

L'ensemble des valeurs des coefficients a_k et b_k forme le spectre de fréquences de la fonction $f(t)$. Un formalisme plus simple est possible en utilisant des fonctions exponentielles

imaginaires, à savoir :

$$f(t) = \sum_{k=-x}^{x} c_k \exp(2i\pi kt/T) \; (1.15)$$

$$c_k = 1/T \int_0^T f(t)\exp(-2ihkt/T)dt \; (1.16)$$

Dans la pratique, cela veut dire que l'on peut décomposer notre fonction comme une somme de sinus (cosinus) de périodes multiples de la période de base de notre fonction. Les

coefficients représentent ainsi les niveaux ≪énergétique de chacune des fréquences élémentaires ≫. L'application principale de l'analyse FFT est donc la mise en évidence despériodicités du signal et le calcul de l'énergie contenue dans le signal pour chacune desfréquences [5].

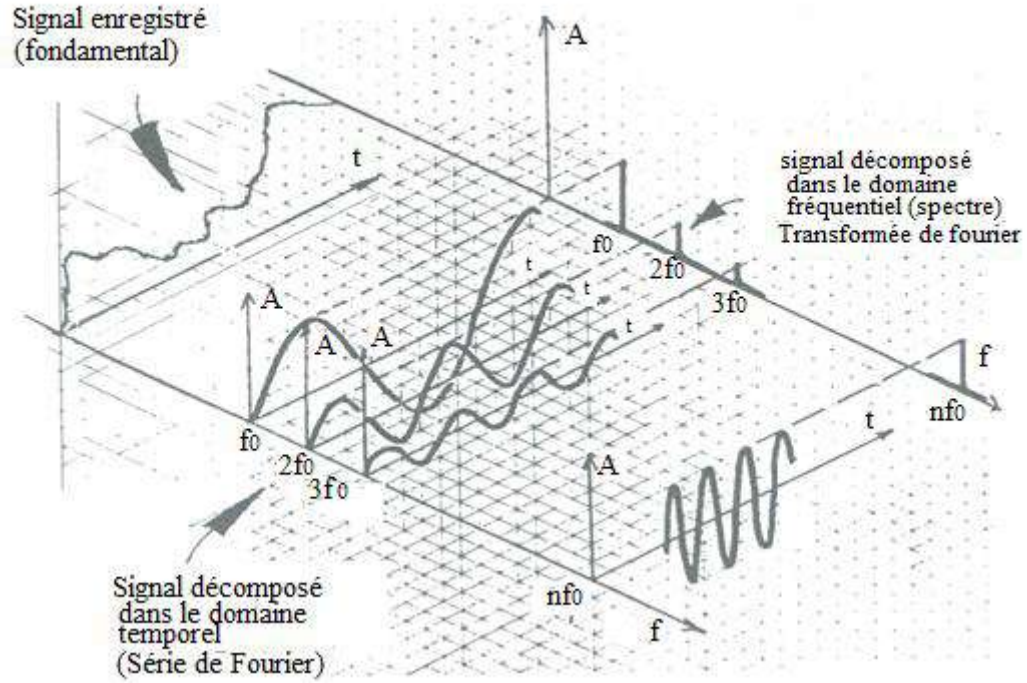


Figure 1.7 Obtention du spectre à partir du signal temporel [5]

1.3.3Transformée de Fourier

La notion de transformée de Fourier peut être étendue à des fonctions non périodiques (aléatoire par exemple). La fréquence 1/T du terme fondamental tend alors vers 0, et les fréquences des différents harmoniques se rapprochent pour donner à la limite une fonction continue de la variable $F = 1/T$. La fonction $f(t)$ n'est plus représentée par une somme de composantes de fréquences discrètes, mais par une intégrale sur toutes les valeurs des fréquences F(v) [8] :

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(V)\exp(2i\pi vt)dt \quad (1.17)$$

Remarques : $F(V)$, spectre de $f(t)$, est appelé transformée de Fourierde la fonction $f(t)$. L'énorme avantage est que F(v) peut se déduire de $f(t)$ par une expression comparable et qui donne les valeurs de C_k lorsque $f(t)$ est périodique

$$F(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\exp(-2i\pi vt)dt \quad (1.18)$$

On remarque la similitude des deux expressions.On appelle la fonction $f(t)$, la transformée de Fourier inversede $F(V)$. C'est entre autre grâce à cette propriété que les calculs de transformées de Fourier sont très utiles en traitement numérique d'un signal. Les appareils de mesures utilisés pour faire une analyse vibratoire utilisent ces propriétés pour déterminer les caractéristiques d'un signal mesuré. Ainsi, l'analyse FFT sert à observer des signaux qui ne sont pas périodiques. Il faut remarquer que cette extension de capacité du calcul FFT, qui n'est pas naturelle pour ce type de signal, appelle à la plus grande prudence dans l'interprétation des résultats. En conclusion, l'analyse FFT est utilisée pour la description du signal temporel dans le domaine fréquentiel avec une résolution fréquentielle constante sur une échelle linéaire de fréquence. La résolution peut être très fine pour chercher avec précision les composantes périodiques des signaux vibratoires.

1.3.4Analyseurs de spectres

Les analyseurs de spectres permettent la visualisation du signal en fonction de la fréquence. Les analyseurs réalisent la décomposition du signal en fonction de la fréquence en appliquant un traitement spécifique. Ils fonctionnent selon le principe suivant :

- Le signal électrique issu du capteur de vibrations est amplifié et filtré ;
- Le signal analogique est échantillonné et transformé en une suite de valeursnumériques représentatives (conversion analogique/numérique) ;
- Il réalise un calcul de transformée de Fourier rapide (en anglais Fast FourierTransform, FFT) ;
- Un afficheur indique le résultat

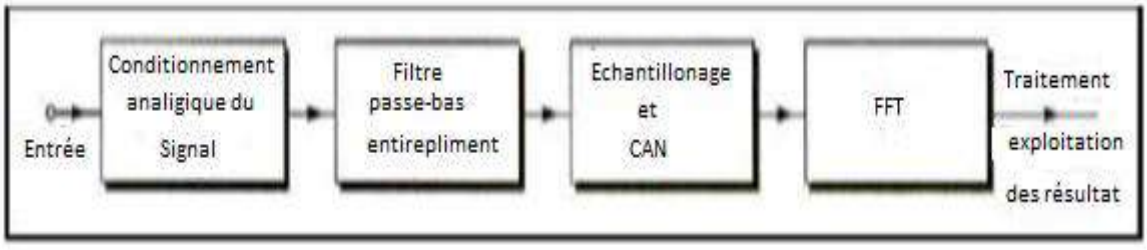


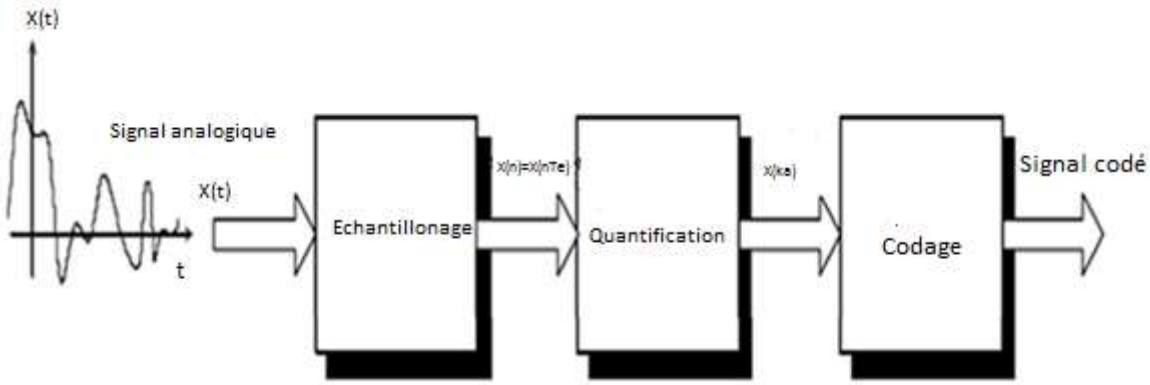
Figure 1.8 Schéma de principe d'un analyseur FFT

1.3.5Numérisation des signaux

Un signal est le résultat de la mesure d'une grandeur physique, il est dit analogique ou à temps continu si la mesure est disponible à tout instant ou numérique ou à temps discret si la mesure n'est observée qu'à des instant discrets. Le traitement numérique du signal Consiste à traiter des signaux à temps discret. En TNS, l'information se présente sous forme d'une suite de valeurs numériques constituant ce qu'on appelle un signal numérique[9].

La conversion d'un signal analogique en un signal numérique est appelée numérisation, elle s'effectue en trois étapes [10] (voir la figure 1.9) :

- L'échantillonnage : Pour rendre le signal discret.
- La quantification : Pour associer à chaque échantillon une valeur.



- Le codage : Pour associer un code à chaque valeur.

Figure 1-9 : Numérisation d'un signal

1.3.6Echantillonnage

L'échantillonnage consiste à prélever, à des intervalles de temps réguliers (T_e), Les valeurs d'un signal. Le signal analogique x(t), continu dans le temps, est alors représenté par un ensemble de valeurs discrètes.

$$x(t) = \sum_n x(n * T_e) \tag{1.19}$$

Avec :

N : Nombre entier,

T_e : Période d'échantillonnage.

Pour une simplification d'écriture, on note le signal échantillonné

$$x(t) = x(n) \tag{1.20}$$

Étant entendu que la durée entre deux échantillons successifs est T_e.

Cette opération est réalisée par un échantillonneur souvent symbolisé par un interrupteur :

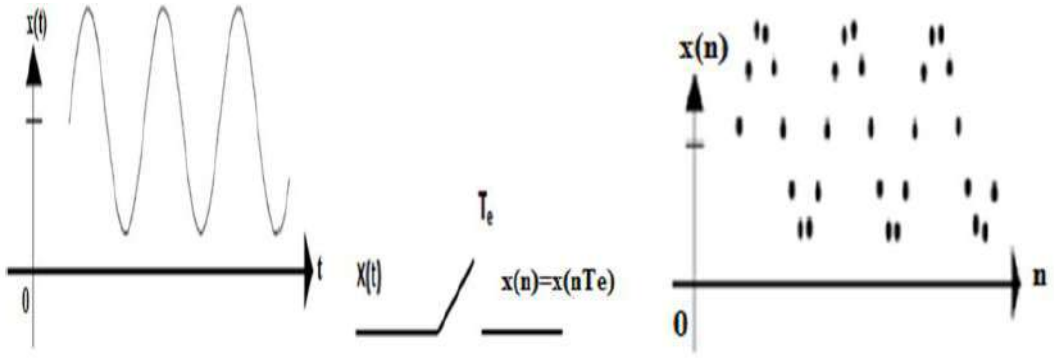


Figure 1.10 Echantillonnage d'un signal

1.3.7Théorème de Shannon

Le théorème de Shannon stipule que pour pouvoir reconstituer un signal analogique à partir de ses échantillons, il faut que la fréquence d'échantillonnage $F_e = (1/T_e)$ soit égale ou supérieure à deux fois la fréquence maximale $f_{\max}$ du spectre du signal analogique :

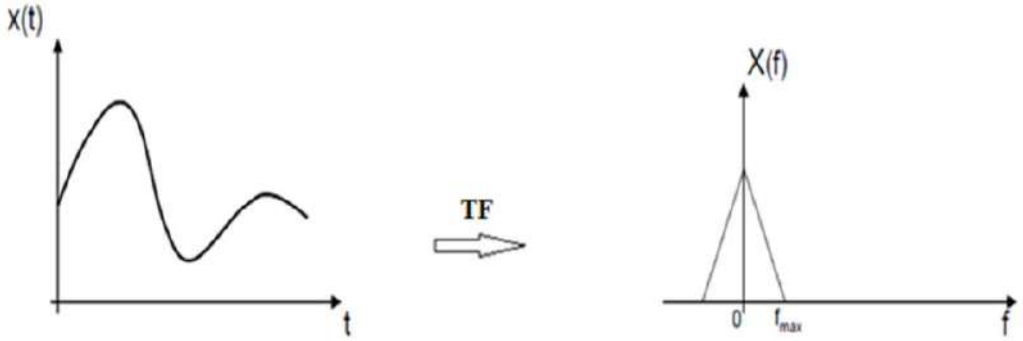
$$F_e \geq 2 f_{\max} \tag{1.21}$$

Avec :

F_e : Fréquence d'échantillonnage.

f_{max} : Fréquence maximale du spectre d'amplitude X(f) de x(t).

La fréquence f_{max} est obtenue par la conversion du signal x(t) du domaine temporel



Vers le domaine fréquentiel par la transformée de Fourier(voir la figure 1.11).

Figure1.11 Le domaine temporel et le domaine fréquentiel

1.3.8Filtre anti-repliement

En pratique, comme l'étendue spectrale du signal est inconnue, le signal temporel est filtré en analogique avec un filtre passe-bas très sélectif (filtre anti-repliement) dont la fréquence de coupure est inférieure à la fréquence de NYQUIST $f_e/2$ afin de prendre en compte les effets du filtrage (atténuation de l'amplitude et rotation de phase).

La fréquence de coupure est généralement définie à -3 dB de la fonction de transfert du filtre. C'est ainsi que, dans la plupart des analyseurs, la fréquence d'échantillonnage est conventionnellement prise telle que le rapport du nombre d'échantillons sur 2,56 fournisse un nombre entier de lignes d'analyses [6].La figure 1.12 illustre le filtre anti-repliement

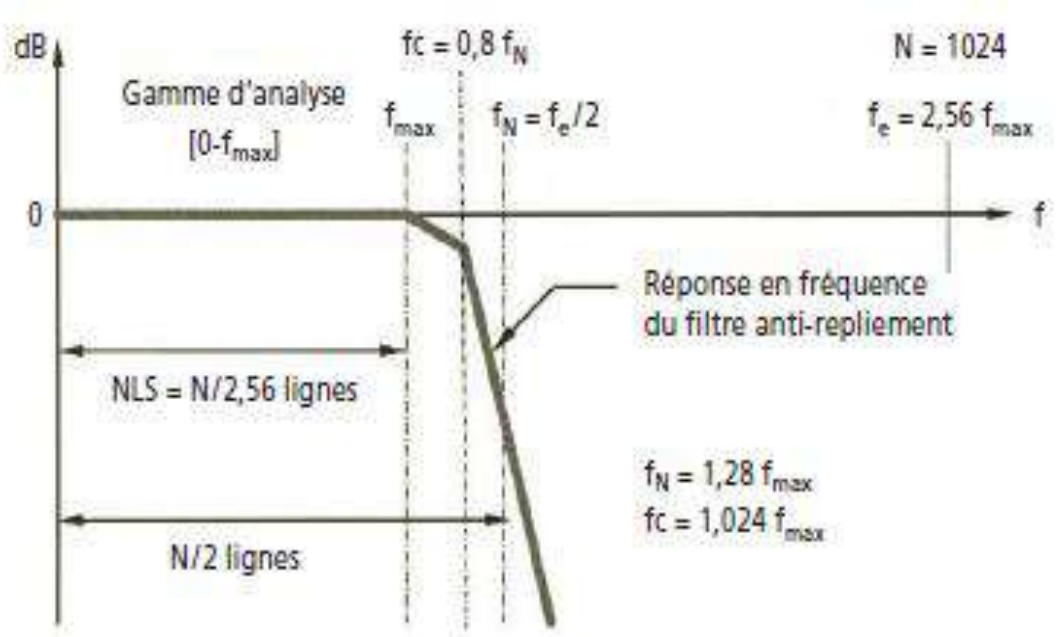


Figure 1.12 Filtre anti-repliement[6].

1.3.9Fenêtrage du signal

Lors de la numérisation du signal, le fenêtrage permet de disposer d'un signal discret dont le nombre de points est fini.

Un signal numérisé est issu de l'observation sur une durée finie du signal analogique.Il se trouve ainsi tronqué par la fenêtre d'observation.Dans le cas où la fenêtre d'observation contient un nombre entier de période du signal,le fenêtrage n'a aucune incidence sur le signal numérisé :il y a identité parfait entre le signal numérisé et le signal analogique.Dans le cas contraire, le fenêtrage introduit des discontinuités aux extrémités du signal numérisé : l'identité est rompue, il en résulte un bruit de fenêtrage [6] qui réduit la lisibilités du spectre en fréquence,amplitude et phase.

1.3.9.1Fenêtre d'apodisation

Pour répondre à ce problème, une première approche a été de développer des fenêtres d'apodisationqui à l'exception de la fenêtre rectangulaire utilisée par défaut, assure une continuité du signal numérisé en annulant ses extrémités.

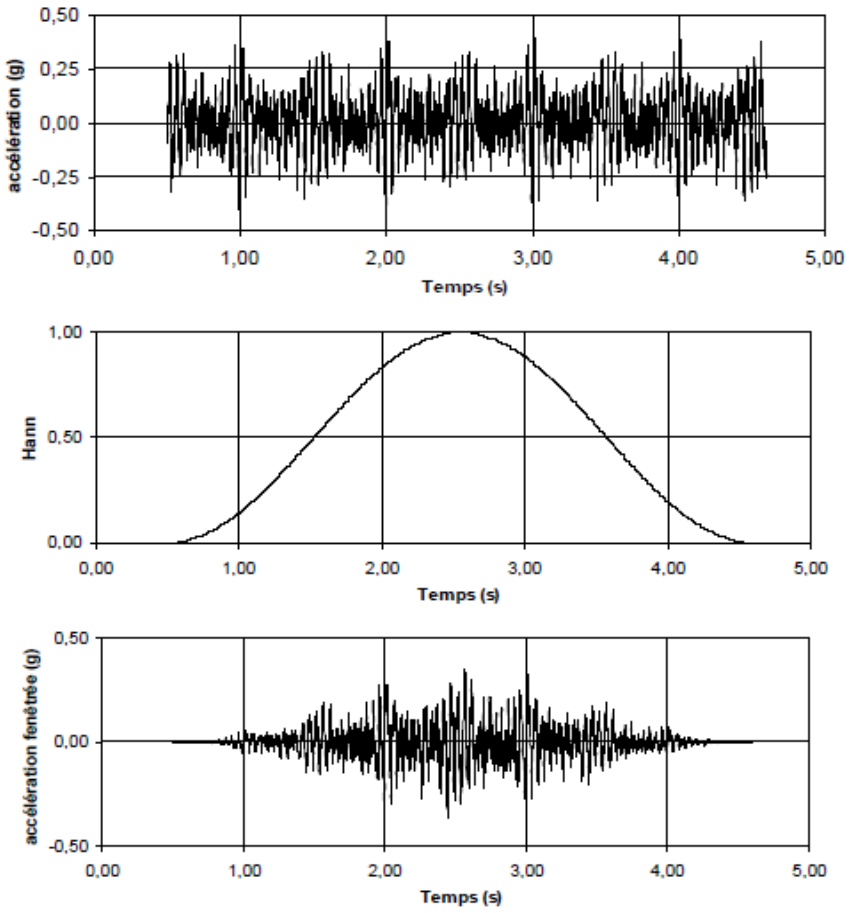


Figure 1.13 Observation d'un signal accélération à travers la fenêtre de HANN

Mathématiquement,le fenêtrage se traduit par la multiplication du signal analogique par une fonction fenêtre dont la valeur est nulle en dehors d'un intervalle de largeur $\Delta T_e = (N-1)\times T_e$,quantifiant la durée d'échantillonnage .

La figure1.11 illustrent l'opération. La durée d'échantillonnage est de 4,095s correspondant à 4096 points échantillonnés à 1000Hz.

La multiplication du signal par une fenêtre temporelle de largeur ΔT_e se traduit par la convolution des spectres dans l'espace de Fourier. Dans le cas où le signal est constitué des composantes discrètes, le produit de convolution a pour effet de centrer le spectre de la fenêtre sur chaque composante spectrale du signal [11].

Il en résulte naturellement une déformation du spectre du signal numérisé. Elle se caractérise par une atténuation de l'amplitude du mesurande, un élargissement de la

composante spectrale et un glissement de phase correspondant à la forme caractéristique du spectre de la fenêtre.

La figure 1.14 en donne une illustration dans le cas d'une fenêtre rectangle utilisée dans la numérisation de deux signaux dont la fréquence est un multiple ou non de la résolution spectrale.

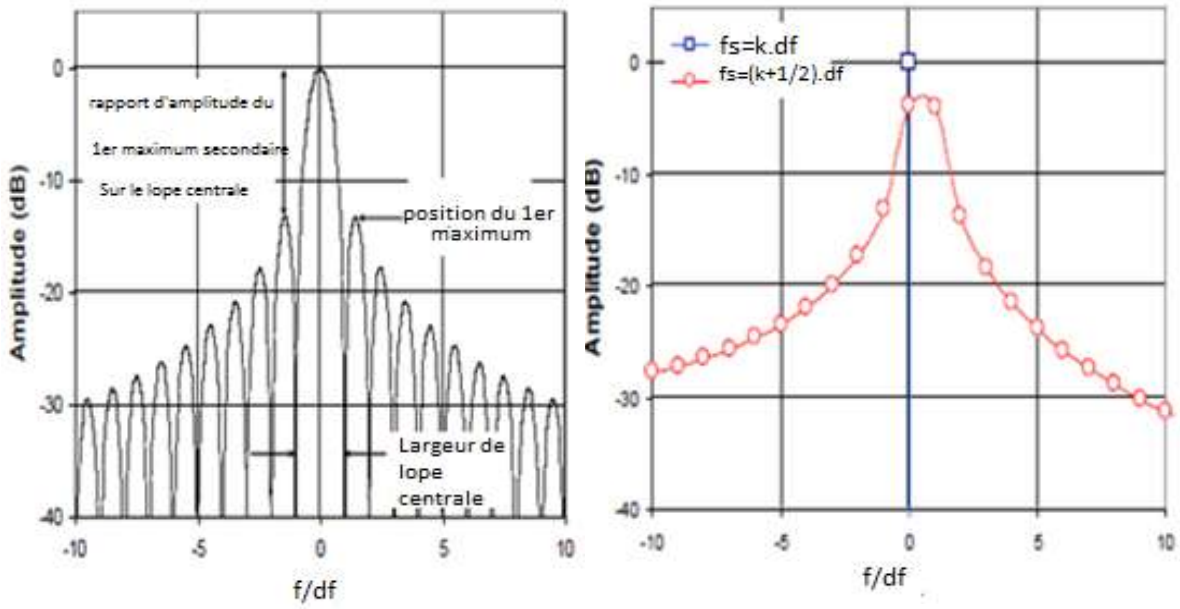


Figure 1.14 Spectre en amplitude de la fenêtre rectangle et erreur maximale commise

Deux signaux ont été numérisés dans des conditions identiques : l'un, dont la fréquence f_s est multiple de la résolution Δf (cas favorable, marqueurs carrés) et l'autre dont la fréquence diffère d'une demi résolution (cas le plus défavorable, marqueurs ronds).

Le tableau 1.2 dresse une comparaison de différentes fenêtres d'apodisation.

La comparaison est donnée en décibels pour l'amplitude et en lignes spectrales pourLa fréquence.

	Largeur du lobe central	*Position du premier lobe secondaire*		*Erreur maximale sur l'amplitude*	
	δ_f	*dB*	δ_f	*dB*	*%*
Rectangle	2	- 13,3	1,4	- 3,9	≈ 36
HANN	4	- 31,5	2,4	- 1,4	≈ 15
Blakman	6	- 58,1	3,5	- 1,1	≈ 12
Kaiser Bessel	6	- 66,9	3,3	- 1,0	≈ 11
Flat Top	10	- 82,9	5,3	- 0,01	≈ 0,1

Tableau 1.2 Bruit de fenêtrage pour quelques fenêtres usuelles [6].

Le choix d'une fenêtre est un compromis entre pouvoir de séparation, précision de mesures et bruit d'analyse, la fenêtre de hanning présente un compromis acceptable entre ces exigences contradictoires, c'est la fenêtre la plus utilisée pour analyse les signaux vibratoires de machines tournantes, bien que la fenêtre de kaiser Bassel présente des propriétés nettement plus intéressantes en terme de bruit d'analyse et de pouvoir de séparation.

1.3.10Zoom FFT

La résolution de basse d'un analyseur est souvent insuffisante pour pouvoir dissocier deux raies de fréquences voisines qui peuvent être induites par deux phénomènes différents

Le zoom (figure 1.15) est une technique de calcul qui permet d'améliorer la résolution de basse de deux façons :

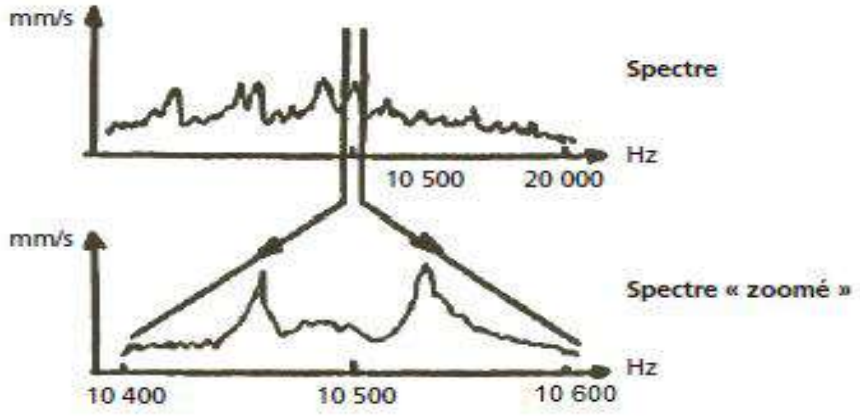


Figure 1.15 Principe de zoom

- Soit en augmentant le nombre de points nécessaires au calcul d'un spectre, ce dernier étant alors calculé avec pN points (pN /2.56 lignes spectrales), donc avec une finesse d'analyse meilleure que celle du spectre de basse.

- Soit en calculant le spectre avec le même nombre de points N (ou le même nombre de lignes spectrales), mais en réduisant la plage d'analyse d'un facteur p pet en la centrant auteur de la fréquence de la composante que l'on veut analyser d'une manière plus détaillée (fréquence centrale de zoom)[12].

1.3.11Elaboration du spectre moyenné

La principe finalité de l'analyse spectrale des vibrations induites par des machines tournantes est d'extraire du signal ses composantes périodiques. Or, le signal comporte également des composantes aléatoires ou « bruit » dont l'amplitude moyenne calculée sur un certain nombre de spectres tend vers zéro. Un spectre moyenné issu de la moyenne arithmétique de chaque composante appartenant à n spectres est de ce fait plus lisible qu'un spectre issu du calcul d'un seul bloc Δt de N points [6].

Il est évident que le temps d'acquisition du signal est d'autant plus long que le nombre de spectres nécessaires à l'obtention du spectre final (spectre moyenné) est grandla figure 1.16illustre un spectre instantané et spectre moyenné de 100 spectres

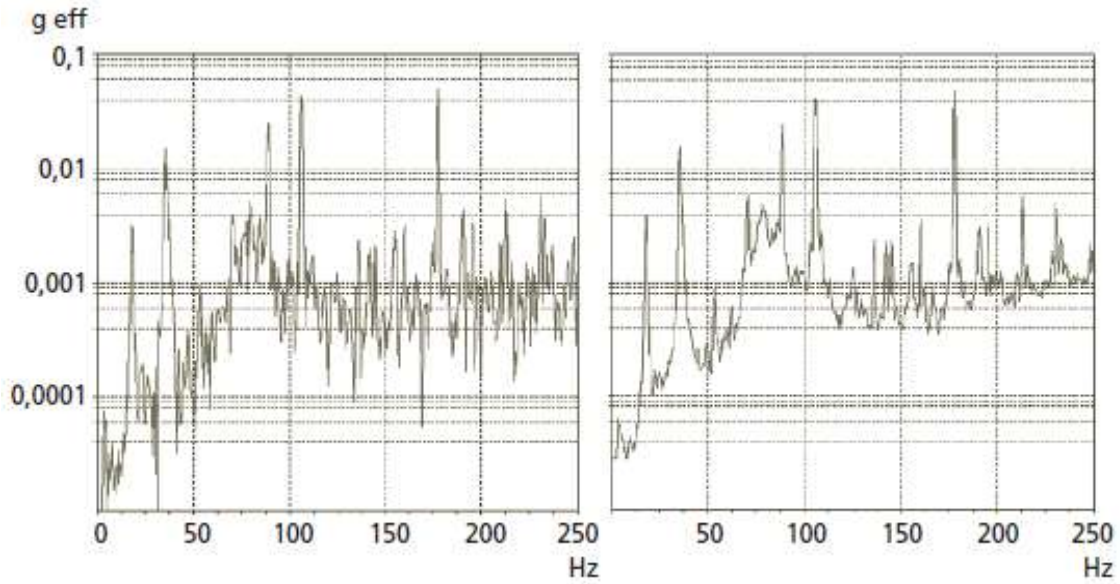


Figure 1.16.a Spectre instantané**Figure 1.16.b** Spectre issu dumoyennage

1.3.12Dualité résolution (temps/fréquence)

Il est absolument nécessaire de connaître les relations qui existent entre la fréquenced'échantillonnage, le nombre d'échantillons, la gamme de fréquence, le nombre de lignes decalcul et la résolution. La gamme de fréquence commence théoriquement à 0Hz et dépend de la fréquence d'échantillonnage qui détermine la fréquence maximale d'analyse :

$$F_{\max} = f_e / 2.56 \quad (1.22)$$

Le nombre de ligne de calcul n dépend du nombre d'échantillons stockés N et respecte la même règle que précédemment :

$$n = N / 2.56 \quad (1.23)$$

Il faut remarquer qu'il existe deux types de transformée de Fourier. La transformée de Fourier Discrète (DFT) et la transformée de Fourier Rapide (TFR). L'utilisation de la seconde revient à la diminution des opérations de calcul par rapport à la première. Or, N étant le nombre d'échantillons, le nombre de multiplications à effectuer est de N^2 dans le premier cas, alors, il n'est que de $N \log 2N$ dans la seconde.

Pour ce qui concerne la résolution, elle est définie par rapport entre la fréquenced'échantillonnage et le nombre d'échantillons, à savoir :

$$\Delta f = f_e / N = f_{\max} / n \qquad (1.24)$$

Les résolutions fréquentielle et temporelle sont inversement proportionnelles.

La rapidité des calculs impose que le nombre N d'échantillons constituant laportion de signal de durée Δt dont on veut calculer la TFD [6], soit une puissance de 2 (algorithme de Colley Tucket). N peut alors prendre les valeurs : 512, 1024, 2048,…

1.3.13Représentation graphique d'un spectre

La lisibilité d'un spectre dépend du choix des échelles de sa représentation graphique.

– Une représentation des ordonnées avec une échelle linéaire ne met en évidence que les raies d'amplitude prépondérante et noie dans le bruit de fond toutes les raies de faible amplitude, qui véhiculent pourtant souvent des informations importantes.

– Une représentation des ordonnées avec une échelle logarithmique graduée, en unités physiques ou en décibels, montre des composantes de rapport d'amplitude très élevé et met ainsi en évidence des familles d'harmoniques (multiples d'une fréquence donnée) ou de bandes latérales de modulation riches en enseignements pour le diagnostic [5].

Les correspondances entre décibels et unité physique sont données par la relation suivante

$$L(dB) = 10\log(\frac{A}{A_0})^2 = 20\log\frac{A}{A_0} \qquad (1.25)$$

$$A = A_0 10^{\frac{L}{20}} \qquad (1.26)$$

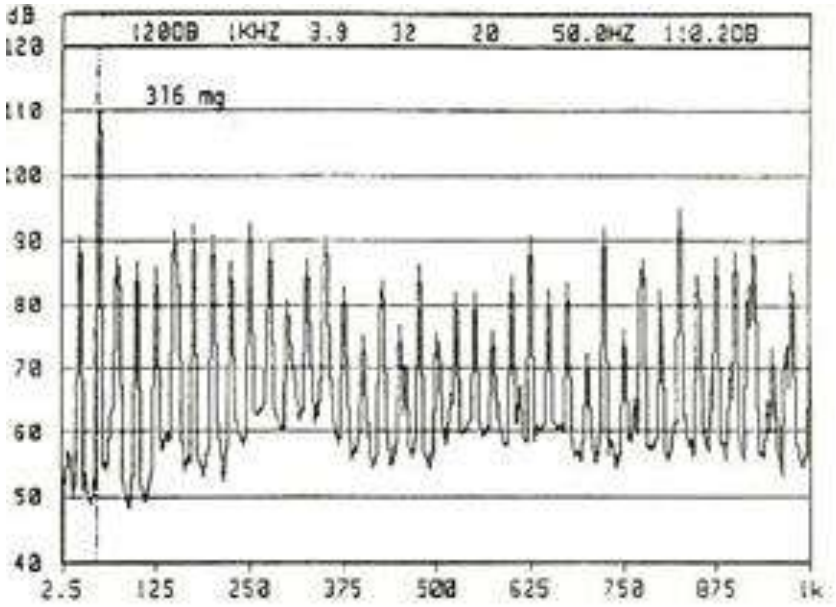
Avec :

– L : l'amplitude en dB de la composante.

– A : sa valeur exprimée en unité physique.

– A_0 est une valeur de référence dans la même unité, qui peut être fixée conventionnellement par des normes.

Les figures1.17 et 1.18illustrent la différence entre les deux modes de représentation graphique de l'amplitude (représentation linéaire et représentation en échelle logarithmique), ainsi que les différences d'interprétation qui peuvent en découler.



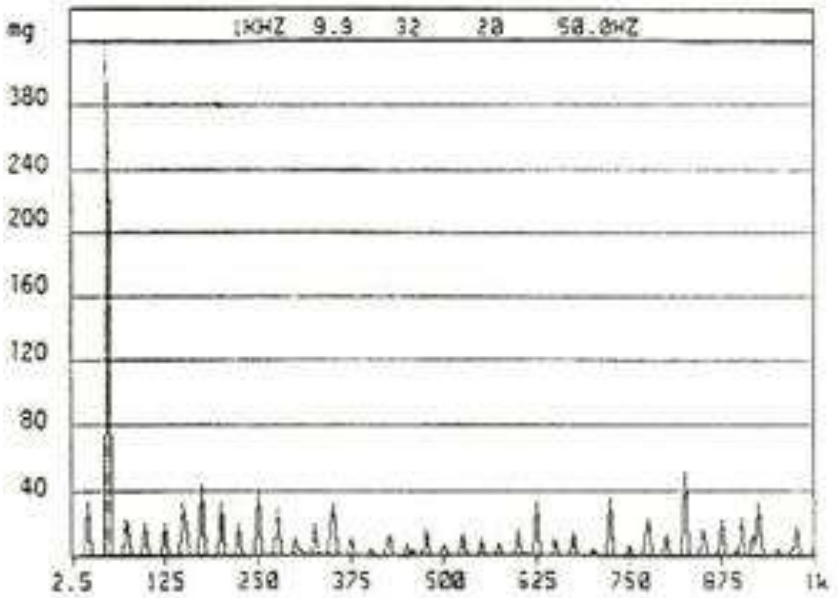


Figure 1.17 Représentation d'un spectre en échelle logarithmiquede l'amplitude

Figure 1.18 Représentation d'un spectre en échelle linéaire de l'amplitude

1.4Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les notions fondamentales couramment utilisées en traitement du signal, telles que le filtrage, les différentes méthodes de filtrage, l'analyse des spectres, le calcul de la transformée de Fourier, l'échantillonnage,le fenêtrage, la représentation des spectres et les techniques de traitement du signal vibratoire.

Le chapitre suivant sera consacré à la maintenance et l'analyse vibratoire des machines tournant et les principaux défauts.

2.1Introduction

Les machines tournantes nécessitent un suivi de son comportement afinde garantir la sécurité, la qualité des produits, la disponibilité des installations, et la minimisation des couts d'exploitation.

Plusieurs méthodes de surveillance des machines [13] ont été proposées dans la littérature. Manifestement le plus répandue est l'analyse des vibrations elle est indispensable à tout service de maintenance pour assurer une surveillance efficace.

En effet, cette méthode peut donner des renseignements qualitatifs sur les efforts développés au sein sur les organes de la machine et permet de détecter l'apparition précoce des défauts et éviter des arrêts de productions couteux dus à la défaillance imprévue d'un composant mécanique tournant.

Dans les procédures de maintenance, on peut classer les étapes d'intervention en deux niveaux :

- Le premier niveau consacré à la surveillance, utilise des indicateurs scalaires (niveau global, Facteur de crête, Kurtosis, etc.…) pour mettre en évidence l'apparition d'un ou de plusieurs défauts.

- Le second niveau caractérisé par le diagnostic, intervient après l'étape de surveillance et utilise des indicateurs beaucoup plus fins (Spectre, Zoom, etc.…), afin de localiser plus précisément la nature et le lieu du défaut, c'est une technique plus récente.

Ce chapitre donne des notions sur la maintenance industrielle et ses différents types. Ainsi présentées les notions de base d'une vibration et les techniques de surveillance.

2.2 La maintenance par analyse vibratoire

Selon la norme NF-X60-010 [AFNO 90b], la maintenance est définie comme étant un ensemble d'activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état spécifique ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement [14], pour accomplir une fonction requise.

2.2.1Les différents types de maintenance

En effet, aussi bien pour des raisons de sécurité que pour des raisons de rentabilité, les activités de maintenance sont essentielles pour la pérennité des machines industrielles [14]. Elles permettent une diminution des coûts de production et l'amélioration de la qualité des produits. Il est possible de distinguer deux stratégies de maintenance, comme le montre la (voir la figure 2.1).

La maintenance préventive conditionnelle : subordonnée à un type d'événement prédéterminé.

La maintenance préventive systématique : effectuée selon un échéancier fixé surla base du minimum de durée de vie des composants mécaniques.

La maintenance corrective : correspondant à une action effectuée après la panne.

a) Maintenance palliative : Activités de maintenance corrective destinées à permettreà un bien d'accomplir provisoirement tout ou une partie d'une fonction requise.

b) Maintenance curative : Activités de maintenance ayant pour objet de rétablir unbien dans un état spécifie ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise.

Les résultats des activités réalisées doivent presser un caractère permanent. Ces activités peuvent être :

- Des réparations.

- Des modifications ou améliorations ayant pour objet de supprimer la (ou les) défaillance(s).

2.2.2 Les stratégies de maintenance

Une fois analysés les mécanismes pouvant provoquer les pannes, il est nécessaire de se doter de moyens préventifs pour les éviter et introspectifs pour les diagnostiquer. C'est dans ce contexte que sont développées différentes stratégies de maintenance.

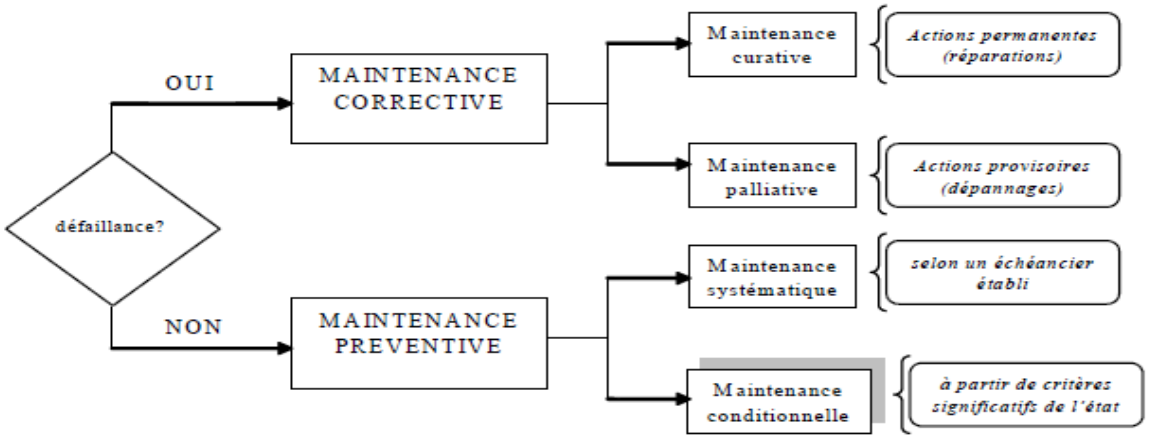
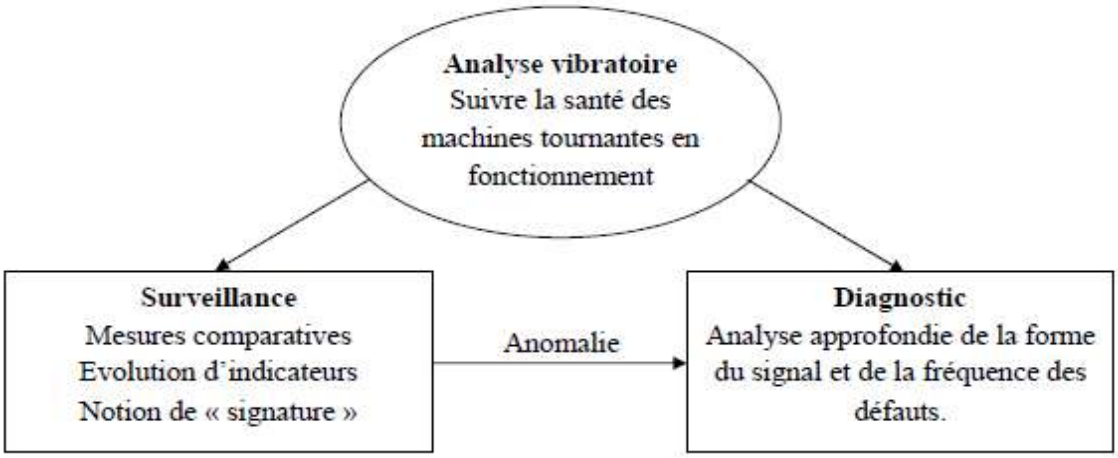


Figure 2.1 Types de maintenance et évènements associés[7].

Nos travaux portent sur la maintenance conditionnelle et prévisionnelle des machines par analyses vibratoires.

2.2.3La surveillance et le diagnostic

Schéma de la Figure 2-2 présente [15], de façon simplifiée, l'analyse vibratoire réalisée à partir de mesures effectuées sur les parties fixes des machines surveillées. On



distingue communément deux principales activités : la surveillance et le diagnostic.

Figure 2.2Déroulement d'une analyse vibratoire [16].

2.2.3.1 La surveillance

L'avantage majeur de l'analyse vibratoire est qu'elle peut détecter et identifier l'évolution du défaut avant qu'il soit sérieux et cause un arrêt non planifié. Ce qui peut être

accompli par la surveillance régulière de la machine vibratoire. Donc, la surveillance vise l'augmentation de la rentabilité par la réduction des temps d'arrêt, l'empêchement des défauts secondaires et l'augmentation de la durée de vie des équipements.

Elle permet de suivre l'évolution d'une machine par comparaison des relevés successifs de ses vibrations. L'alerte sur un disfonctionnement probable est généralement signalée par le technicien dès qu'il y a une tendance à la hausse de certains indicateurs par rapport à des valeurs de référence constituant la signature d'un défaut. En principe, la signature est définie à la suite d'une première campagne de mesures sur la machine neuve ou révisée.

En cas de détection du défaut, une analyse supplémentaire est nécessaire pour identifier et estimer le problème ; il s'agit du diagnostic.

2.2.3.2 Le diagnostic

Le diagnostic est la détermination de la nature et la localisation du défaut ; cette connaissance servira pour décider le danger émanant du défaut et l'action nécessaire à prendre (maintenance Corrective).

Le diagnostic des defaults repose largement sur la maintenance prédictive. L'idée de base du diagnostic des défauts est de s'assurer de la présence du défaut dans le système (détection), puis identifier le défaut, et ensuite prendre une décision pour la maintenance du système (accommodation). Le diagnostic est effectué quand la surveillance a détecté une anomalie dans le signal vibratoire.

Le diagnostic des defaults est le contrôle du système qui supervise le comportement de tout le système et fournit suffisamment d'informations sur les organes qui ne fonctionnent pas normalement. Le diagnostic des défauts est composé de trois taches :

- La détection de default : pour indiquer si le défaut existe ou non dans le système.

- L'isolation du défaut : pour déterminer la localité et le type de défaut.

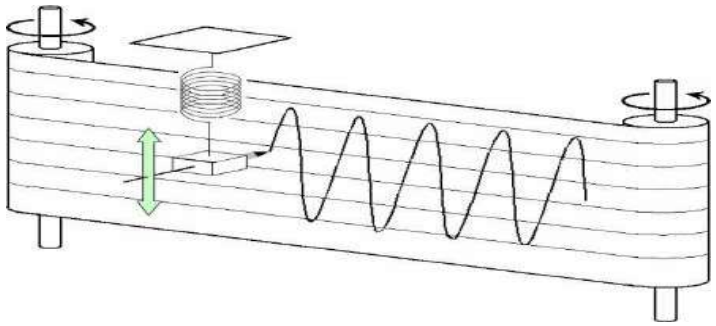
- L'identification du défaut : pour estimer sa taille et sa nature de défaut.

La détection de défaut et son isolation sont les étapes les plus importantes du diagnostic de défaut. En général, le diagnostic de défaut peut être vu considérer comme détection de défaut et isolation.

2.3Vibration mécanique

2.3.1 Définition d'une vibration

La norme ISO 2041 « vibrations et chocs - vocabulaire (Août 1990) » définit la notion devibration comme étant la variation avec le temps de l'intensité une grandeur caractéristiquedu mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité estalternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence. Enfait, un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'uneposition d'équilibre ou de référence. Ce déplacement par rapport à cette position peut êtreprovoqué par une force mécanique non désirable. Ainsi, un système



mécanique est dit envibration lorsqu'il oscille autour de sa position d'équilibre [17] [18].

Figure 2.3 Vibration d'un oscillateur libre.

2.3.2 Caractéristiques d'une vibration

Une vibration se caractérise principalement par, son amplitude, sa période et sa fréquence (voir Figure 2.4) [18].

• Son amplitude Aqui est la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre.

• Sa période T, durée correspondant à l'intervalle de temps entre deux positions successivesidentiques. La période se note Tet s'exprime en seconde (s).

• Sa fréquence f, qui est le nombre de cycles par seconde, et qui est l'inverse de la période T

La fréquence se note *f* et s'exprime en en Hertz (Hz). (1 Hz = 1 s^{-1}).

La fréquence s'exprime en fonction de la période par la relation suivante : $f = 1/T$

La forme la plus simple d'un signal vibratoire est un signal périodique que l'on représentesous la forme d'un mouvement sinusoïdal. Le mouvement sinusoïdal peut être représenté parla projection sur un axe vertical d'un vecteur tournant A ayant une vitesse angulaire constanteω. La rotation de ce vecteur provoque une variation de sa projection x, dont l'équation est :

$$x(t) = A\sin(t) \qquad (2.1)$$

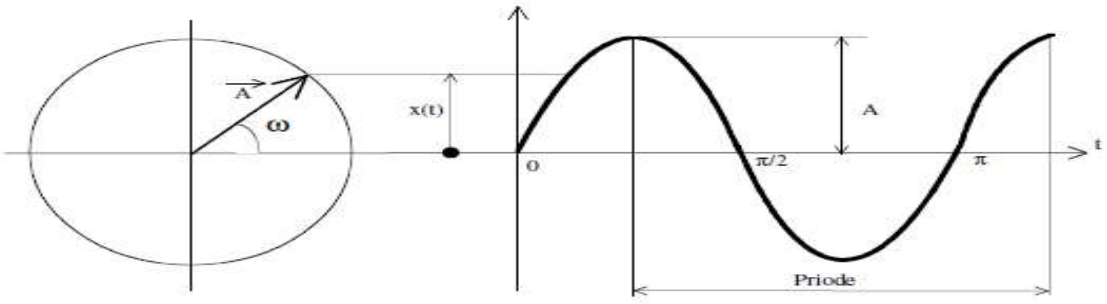


Figure 2.4 Représentation d'une vibration sinusoïdale.

2.3.3Types des signaux vibratoires

On compte plusieurs types de signaux vibratoires, comme les signaux périodiques, stationnaires, non stationnaires, non linéaires, déterministes, etc. La figure 2-5 représente les différents types de ces signaux [19].

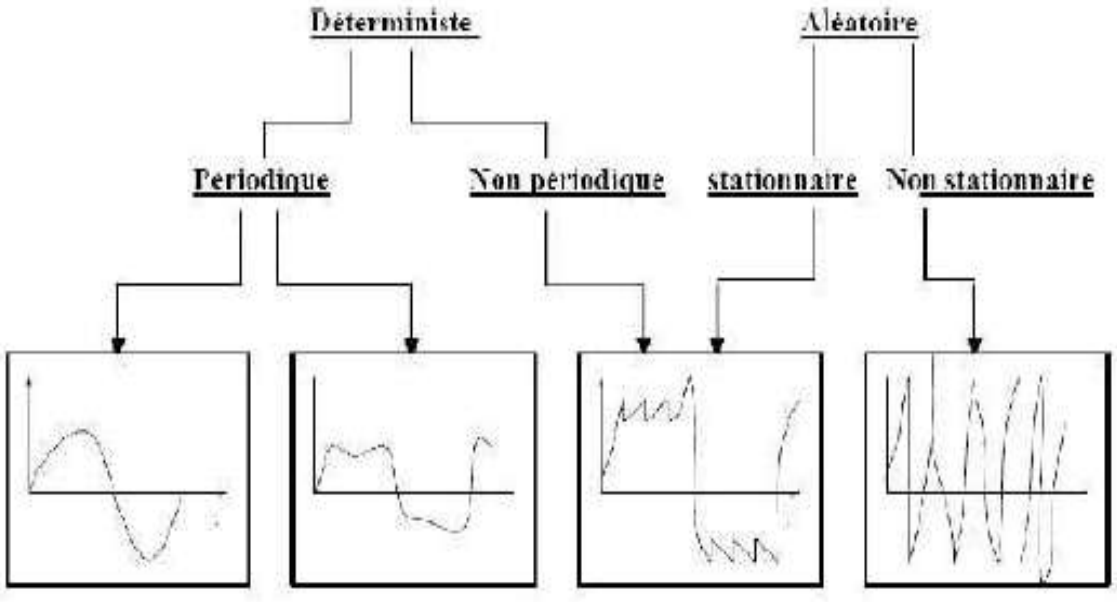


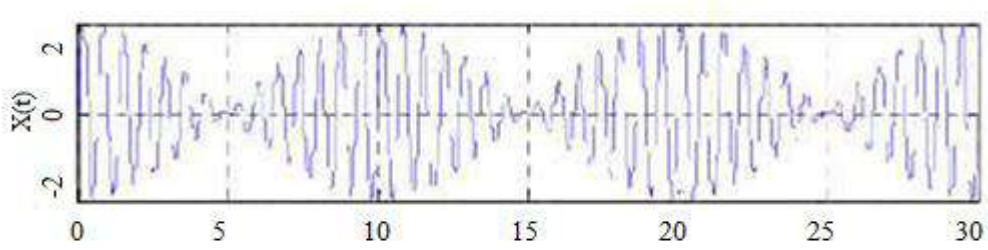
Figure 2.5 Types de signaux vibratoires.

2.3.3.1 Signaux déterministes

Un signal est appelé déterministe s'il est possible de déterminer son amplitude pour tout instant « t ». Il peut être périodique ou non [20].

2.3.3.1.1 Signaux périodiques

Le signal est dit périodique, si la propriété suivante est vérifiée : $x(t+nT)=x(t)$ pour

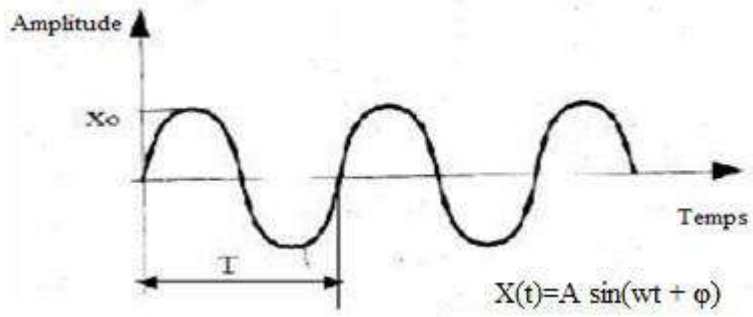


toute valeur de n. D'une manière générale, comme l'illustre la figure 2-6.

Figure 2.6 Signal périodique.

Les différents signaux périodiques peuvent être classés dans l'une des catégories suivantes :

- **Signaux périodiques harmoniques *:*** est une vibration dont le diagramme



amplitude temps est représenté par une sinusoïde, comme l'illustre la figure 2-7.

Figure 2.7 Représentation d'un signal harmonique.

- **Signaux périodiques non harmoniques *:*** est une somme de signaux harmoniques dedifférentes amplitudes maximales (constantes) mais dont les pulsations sont multiplesd'une pulsation dite fondamentale, comme l'illustre la figure 2-8.

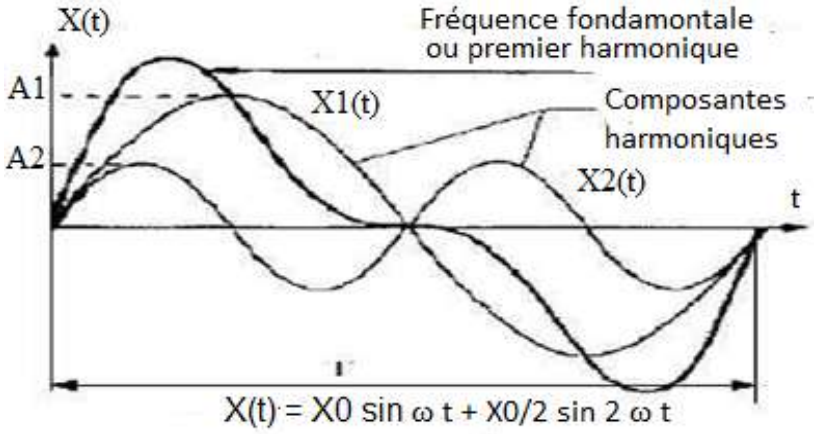
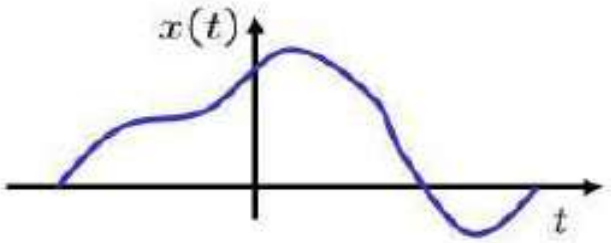


Figure 2.8 Représentation d'un signal périodique non harmonique

2.3.3.1.2 Signaux Non périodiques

Un signal est dit non périodique s'il n'est pas périodique, mais, existe à tout instant

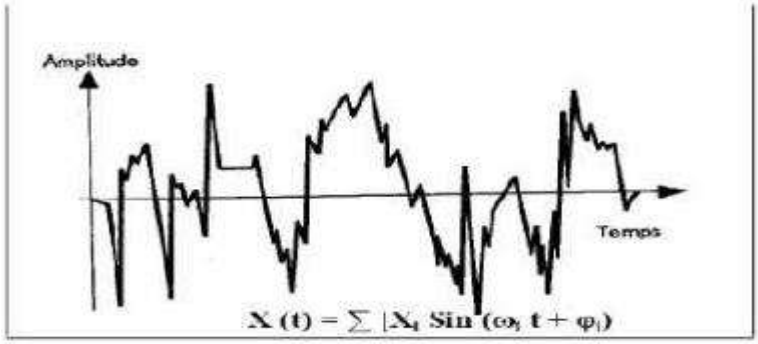


« t ».

Figure 2.9 Représentation d'un signal non périodique.

2.3.3.1.3 Signaux aléatoires

Les signaux aléatoires sont caractérisés par le fait qu'il n'est pas possible de prédire leursamplitudes à un instant donné. Ils sont classés en deux types : stationnaires dont le



contenu fréquentiel ne change pas dans le temps et non stationnaires dans le cas contraire [17][18].

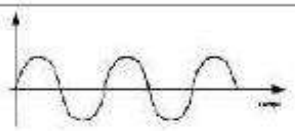
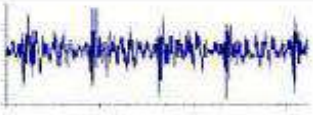
Figure 2.10 Représentation d'un signal aléatoire.

- **Stationnaires** : ce sont des signaux dont les caractéristiques statistiques sont indépendantes de l'origine du temps.
- **Non stationnaires** : ce sont des signaux qui ont les caractéristiques contraires à celles des stationnaires.

2.3.2.2 Représentation temporelle des vibrations en fonction de leur nature

Le tableau 2.1 illustre la représentation temporelle des vibrations en fonction de leur nature.

Tableau 2.1 Représentation temporelle des vibrations en fonction de leur nature.

Nature des vibrations	Représentation temporelle des vibrations	Causes possible
A : Périodique de type sinusoïdal simple		balourd
B : Périodique de type sinusoïdal complexe		Engrènement
C : Périodique de type impulsionnel		Ecaillage des roulements
D : Aléatoire de type impulsionnel		Défauts de lubrification sur des roulements cavitation

2.3.3Les grandeurs de mesures d'une vibration

Une vibration mécanique peut être mesurée selon les trois grandeurs suivantes [21] :

• Déplacement

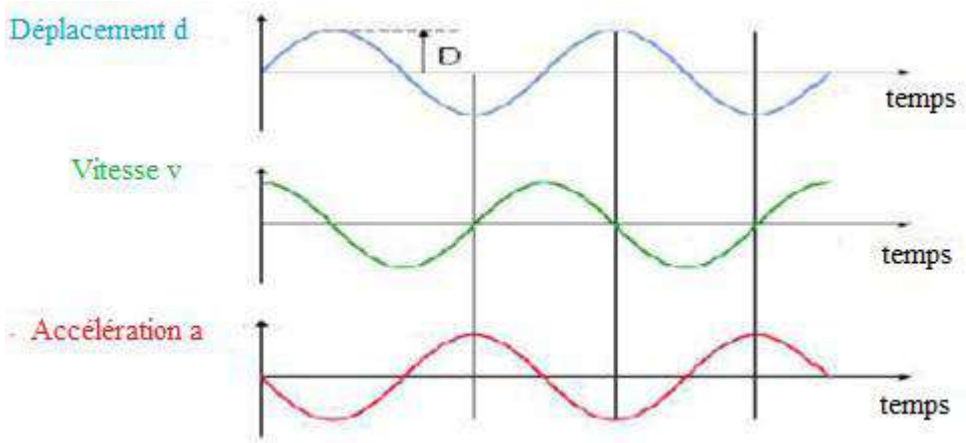
$d = A\sin(2\pi ft)$ (2-1)

• **Vitesse** (variation du déplacement par unité de temps)

$v = A2\pi ft\cos(2\pi ft)$ (2.2)

• **Accélération** (variation de la vitesse par unité de temps)

$a = -A(2f\pi)^2 \sin(2\pi ft)$ (2.3)



La figure 2-11 illustre les grandeurs associées à une vibration.

Figure 2.11 Grandeurs associées à une vibration.

2.3.4 Choix des grandeurs de mesure

On choisira préférentiellement :

- ✓ La grandeur déplacement pour détecter des phénomènes à basse fréquence F ≤ 100 Hz.
- ✓ La grandeur vitesse pour détecter des phénomènes se situant dans une large gamme de fréquence F ≤ 1000 Hz.
- ✓ La grandeur accélération pour détecter des phénomènes se situant à haute fréquence 0 ≤ F ≤ 20000 Hz.

La Figure 2-12 illustre la relation accélération, vitesse, déplacement

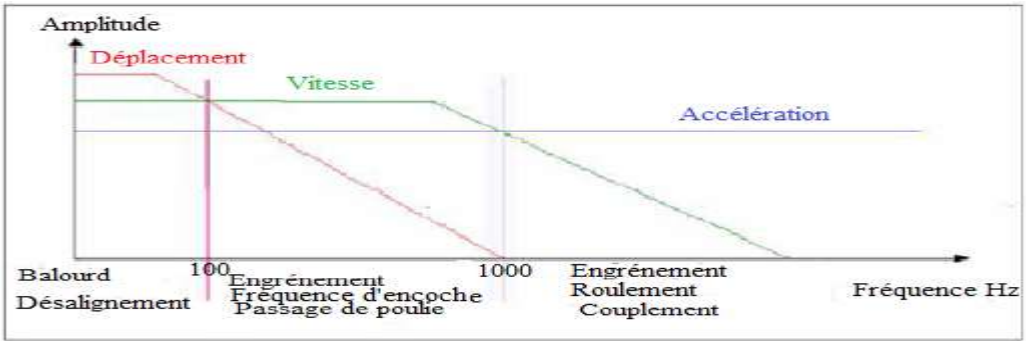


Figure 2.12 Relation accélération, vitesse, déplacement.

2.3.5 Capteurs de vibrations

Le capteur de vibrations est le premier maillon de la chaîne de mesure. Le but de ce capteurest de transformer une vibration mécanique en un signal électrique. Les capteurs de vibration utilisés peuvent être actifs, ne nécessitant aucune alimentation et ne pouvant fonctionner qu'avec une source d'énergie auxiliaire [22] [23].

On distingue :

• Les capteurs de déplacement ;

• Les capteurs de vitesse (vélocimétres) ;

• Les capteurs d'accélération (accéléromètres).

La Figure 2.13 illustre les types des capteurs de vibration.

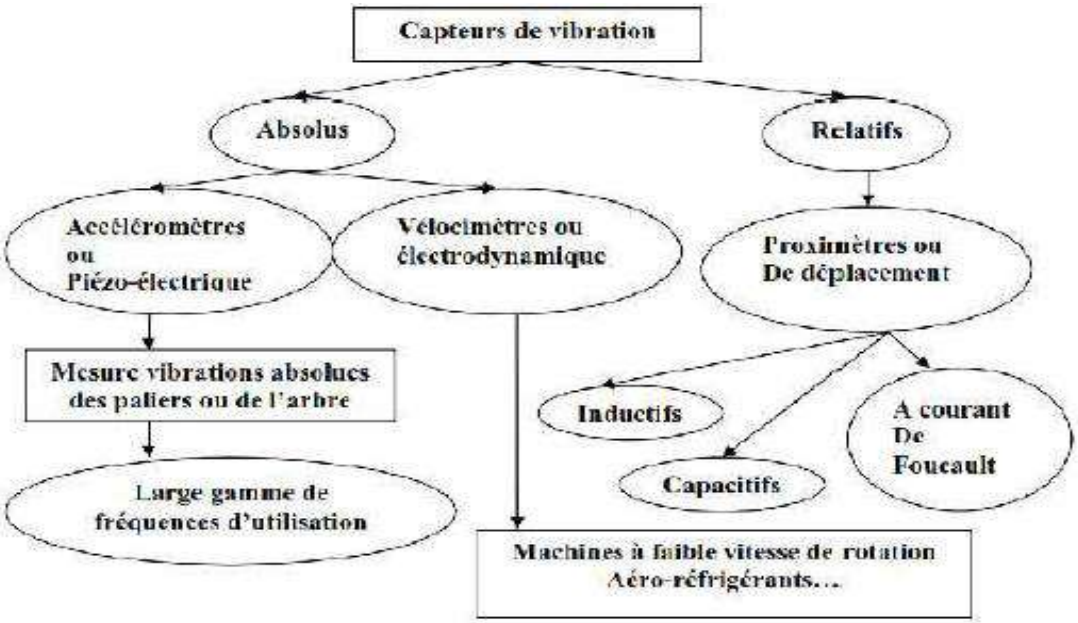
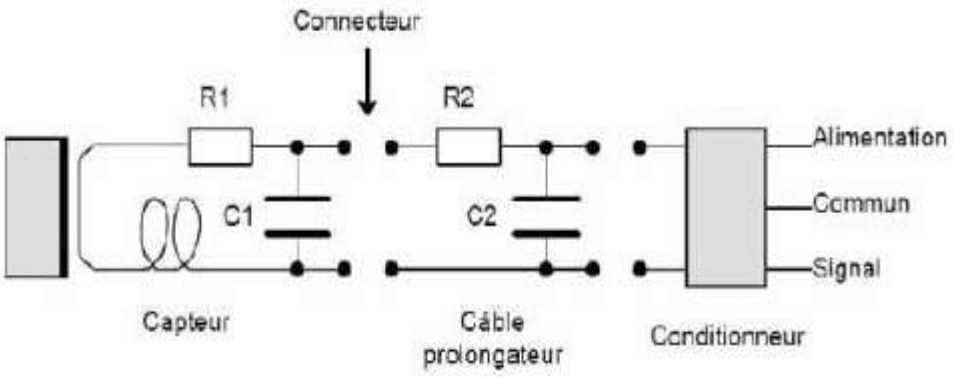


Figure 2.13 Capteurs de vibration.

2.3.5.1 Capteur de déplacement

Un capteur de déplacement mesure le déplacement relatif entre l'arbre et le palier qui est dûaux vibrations. La bobine et le conditionneur intégrés forment ensemble un circuit électronique oscillant. La figure 2-14 présente le principe de fonctionnement d'un capteur



de déplacement.

Figure 2.14 Principe de fonctionnement d'un capteur de déplacement.

Le circuit oscillant crée un champ magnétique alternatif dans la bobine du capteur. D'après le principe d'induction, il se crée alors des courants de Foucault dans un corps conducteur quel'on approche du capteur. Ces courants de Foucault agissent à leur tour sur la bobine par l'intermédiaire du champ magnétique et consomment ainsi de l'énergie électrique. Cette transformation d'énergie est d'autant plus importante que le corps métallique est proche de labobine et que sa susceptibilité magnétique est élevée [23].

2.3.5.2 Capteur de vitesse

Un capteur de vitesse (vélocimètre) est un capteur actif qui n'est pas alimente.

La figure 2-15 illustre le fonctionnement d'un capteur de vitesse [24].

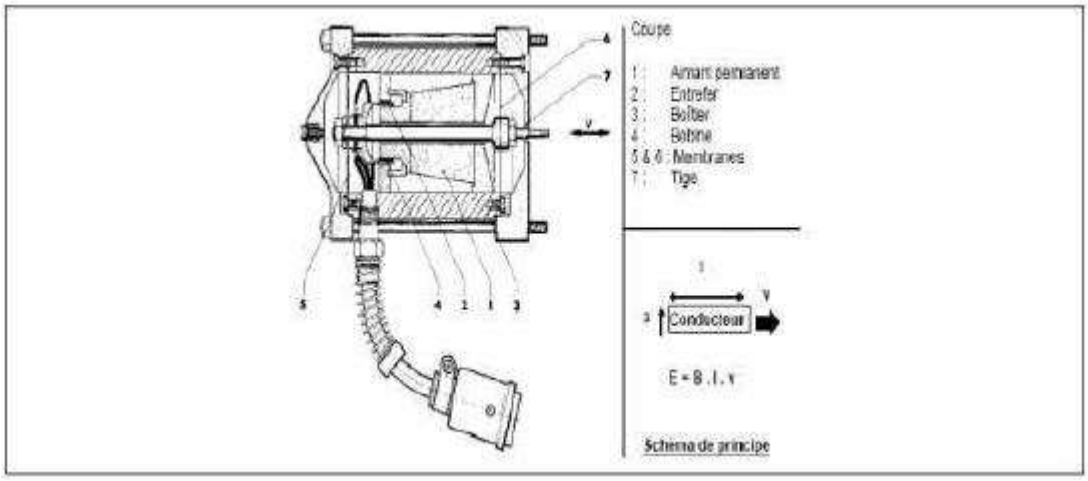
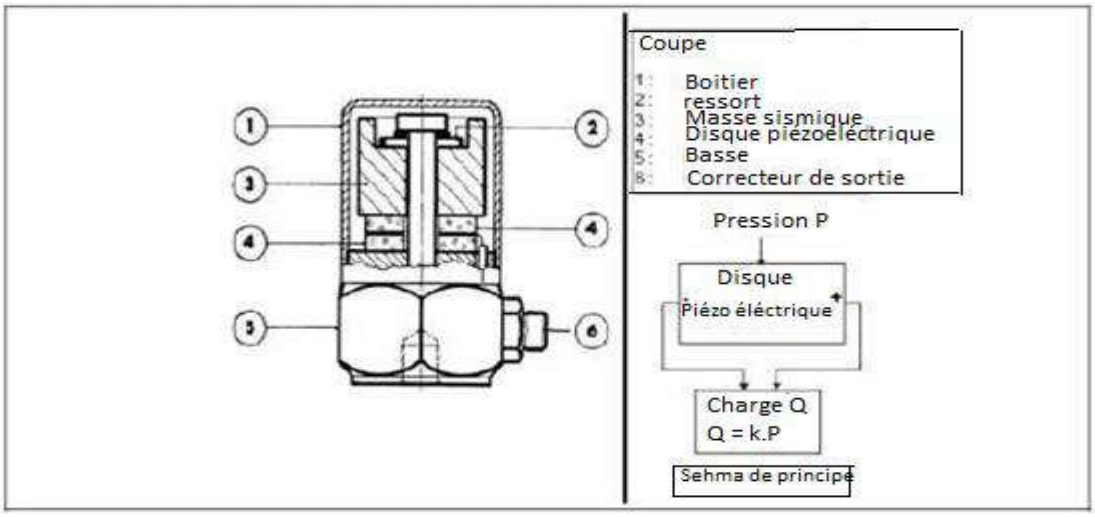


Figure 2.15 Principe de fonctionnement d'un capteur de vitesse.

L'aimant permanent (1) génère une induction magnétique constante B. Les lignes de champse referment par l'intermédiaire du boîtier (3). Une bobine (4) suspendue par des membranes (5) et (6) peut se déplacer dans la direction des lignes de champ. Une force électromotrice (fem) d'induction **E** est alors générée, qui est le produit de la vitesse **v** de vibration, de l'induction magnétique **B** et de la longueur **l** de l'enroulement.

2.3.5.3 Capteur d'accélération

Les capteurs d'accélération (accéléromètres) mesurent des vibrations absolues de la cage ou les vibrations relatives dans l'espace [24].



La figure 2-16 illustre le principe de fonctionnement d'un capteur d'accélération.

Figure 2.16 Principe de fonctionnement d'un capteur d'accélération.

Les éléments actifs de ce type de capteur sont des disques de cristal piézo-électrique présentant la propriété de transformer une sollicitation mécanique (pression ou cisaillement) en charges électriques. Ces disques sont pris entre deux masses relativement importantes par l'intermédiaire d'un ressort de tarage élevé. Lorsque le capteur est soumis à une vibration, les masses exercent une pression alternative sur les disques qui, grâce à leur effet piézoélectrique, créent une variation de charge électrique proportionnelle à la force appliquée et donc à l'accélération des masses .

2.3.5.4 Comparaison des différents types de capteurs

Le tableau 2-2 illustre les avantages et les inconvénients de chaque capteur [22] [24].

	Avantages	Inconvénients
Capteur d'accélération	• Facile à installer • Bonne détection des défauts HF • Bonne gamme dynamique/fréquentielle • Petit, léger • Supporte les hautes températures • Pas de pièce mobile	• Nécessite une double intégration pour le déplacement • Nécessite une source extérieure • Fournit des informations limitées sur la dynamique d'arbre • Médiocre pour les faibles vitesses
Capteur de déplacement	• Mesure directement les mouvements d'arbre • Même capteur pour les butées axiales, les vibrations radiales et la vitesse • Mesure directement le déplacement • Mesures DC (position d'arbre) • Pas de pièce mobile	• Problème de « run-out » • Sensible au matériau de l'arbre • Installation • Gamme de fréquence limitée. Pas de détection des défauts de roulements • Restriction de températures • Oscillateur externe nécessaire

Tableau 2.2 Comparaison entre les différents types de capteur.

2.4Les outils de surveillance vibratoire

Les outils utilisés pour la surveillance vibratoire peuvent être classés en deux catégories [23] :

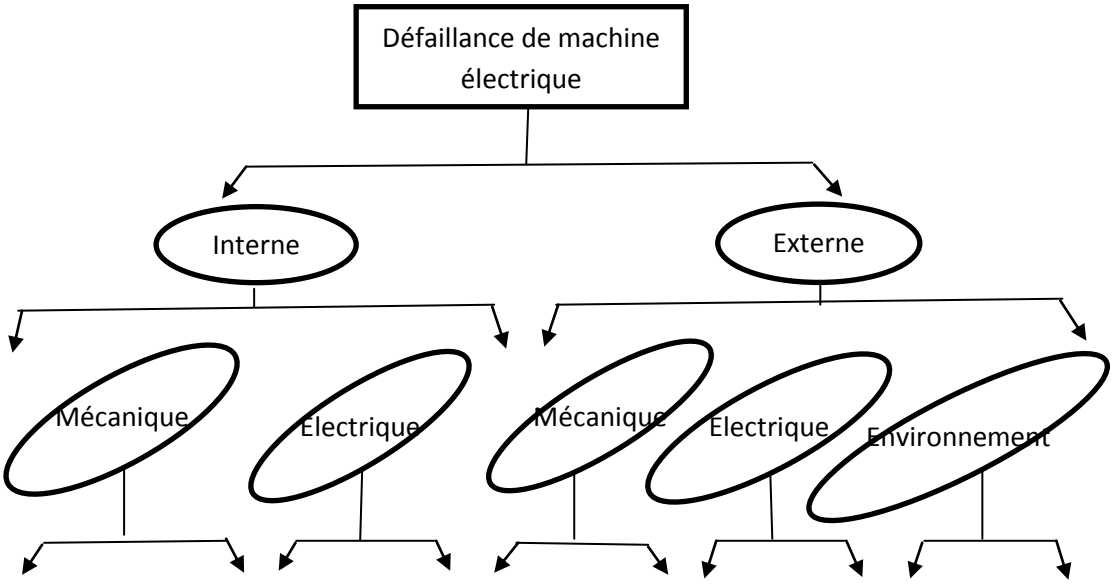
- Des outils propres à la surveillance (valeur efficace de l'accélération ou RMS, facteurde crête, Kurtosis) qui permettent, lorsque ces valeurs dépassent le seuil d'alerte, dedétecter la présence d'une anomalie.
- D'autres outils propres au diagnostic (FFT, spectre d'enveloppe, cepstre, ondelette etanalyse multi résolution) permettant d'identifier la signature vibratoire de chaquedéfaut.

2.5 Défauts des machines électriques tournantes

Le diagnostic de l'état d'une machine n'est possible que si l'on connaît les symptômesvibratoires associés à chaque défaut susceptible d'affecter la machine considérée. En d'autres termes, c'est à dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts et lacinématique de la machine, il serait possible de formuler un diagnostic de l'état de cette dernière.

Par ailleurs, les défauts qui caractérisent les machines électriques et les systèmes d'entrainement peuvent être classés, selon leurs origines, en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine [25].

La Figure 2-17 présente la classification des défauts selon leurs origines.



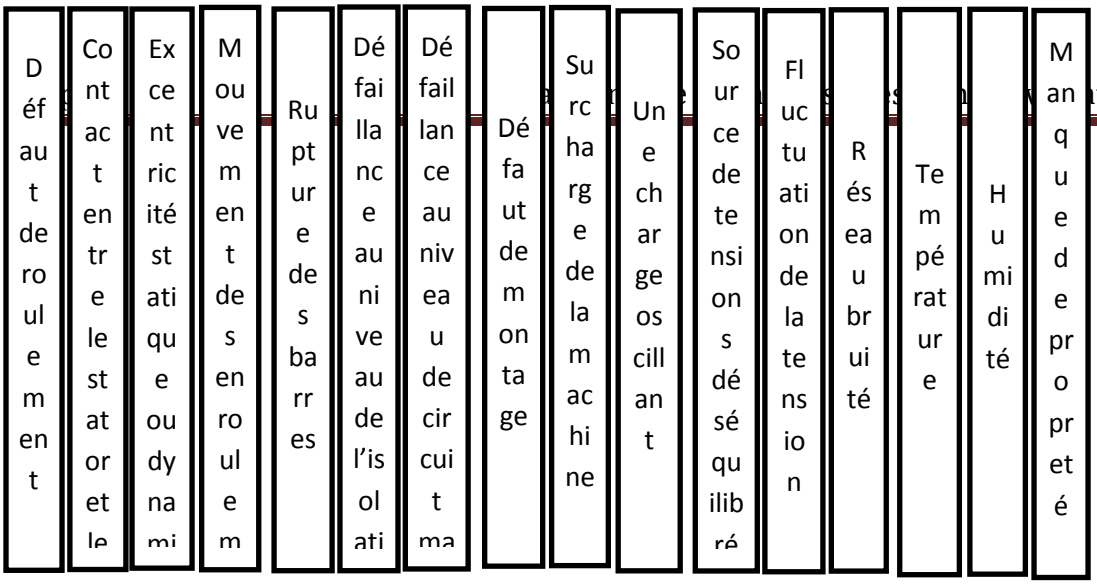


Figure 2.17 Classification des défauts selon leurs origines.

Le tableau 2-3 montre les principaux modes défaillants rencontrés sur les machines tournantes.

Défaut	Fréquence à laquelle le défaut est attendu se manifester (f_r : fréquence de rotation)
Déséquilibre (balourd)	f_r (manifestation radiale)
Désalignement	f_r : désalignement angulaire, manifestation axiale $2 \times f_r$: désalignement parallèle, manifestation radiale
Jeux mécaniques, courroie	$0,5 \times f_r$, f_r et harmonique d'ordre supérieur
Instabilités hydrodynamiques dans les paliers	$40\text{-}50\% \times f_r$
Défauts de palier à éléments roulants	Défaut de bague externe : $f_{be} = \frac{N}{2} \times f_r \left(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha\right)$ Défaut de bague interne : $f_{bi} = \frac{N}{2} \times f_r \left(1 + \frac{d}{D}\cos\alpha\right)$ Défaut d'élément roulant : $f_e = \frac{d}{D} \times f_r \left(1 - \left(\frac{d}{D}\cos\alpha\right)^2\right)$ Défaut de cage : $f_c = \frac{f_r}{2} \times \left(1 \pm \frac{d}{D}\cos\alpha\right)$ (+ : dans le cas où la bague externe est tournante ; - dans le cas où la bague interne est tournante) f_r : fréquence de rotation de l'arbre d : diamètre de l'élément roulant D : diamètre moyen de rotation α : angle de contact ; N : nombre d'éléments roulants
Défaut d'engrènement	Modulations d'amplitude et de phase à la fréquence d'engrènement $z \times f_r$; composantes satellites à $f_e \pm k \times f_r$ (z : nombre de dents, k : entier)
Défaut de ventilateur	PPMC (bras , pales) $\times f_r$
Défauts de pompage	PPMC (aubes ,2) $\times f_r$ si on suppose une admission et un refoulement
Défaut de cavitation	f_r, $N \times f_r$ et spectre étendu aux fréquences sup. à 2000Hz
Défauts électriques	f_r et harmonique d'ordre élevé : balourd magnétique f_{el}, $2 \times f_{el}$: défauts de champ fixe $f_r \pm 2gf_{el}$, $f_r\left(k\left(\frac{1-g}{p}\right) \pm g\right)$: défaut de champ tournant, g : glissement f_{el} : fréquence d'alimentation électrique $k/p = 1,5,7\ldots$ en fonction du bobinage moteur

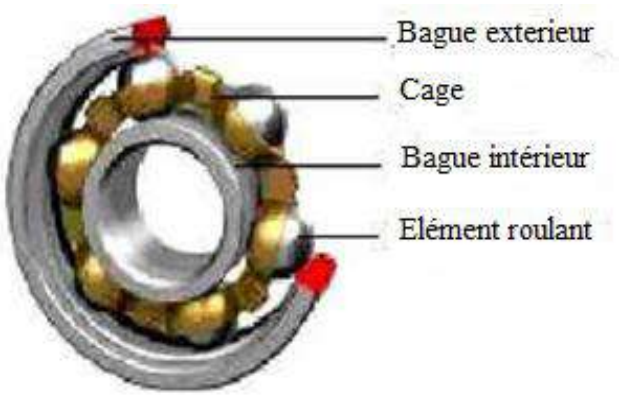
Tableau 2.3 Comparaison entre les différents types de capteur.

2.5.1 Défauts de roulements

Les roulements sont les éléments mécaniques les plus importantes des machines tournantes.

Ils sont employés pour guider et soutenir les arbres de machines tournantes. Etant donné leurs grandes sollicitations les sont la source de panne fréquente. De manière générale, lesroulements sont constitués de quatre composants essentiels Une bague

extérieure, une bagueintérieure, des organes roulants (billes) et un organe de lubrification



(cage) (Figure 2-18).

Figure 3.18 Constitution d'un roulement.

2.5.2 Techniques et méthodes de surveillance de l'état des roulements

La figure suivant indique les différents méthodes et techniques de surveillance de l'état des roulements

Méthodes fréquentielles FFT, analyse d'envellope, analyse cepstrale etc….	Méthodes statiques temporelles Valeur efficace(RMS),valeur crête, facteur crête, kurtosis,	Méthodes de filtrage (de bruitage)passe haut et passe bande

Figure 3.19 Techniques de surveillance des roulements.

- **Indicateurs des méthodes statistiques temporelles.**

En mesure vibratoire, on utilise couramment trois indicateurs de détection [26] :

- Valeur efficace.
- Valeur crête.
- Le Kurtosis.

Valeur efficace

La valeur efficace, donnée par l'expression suivante :

$$V_{RMS} = [\frac{1}{N}\sum(x_i^{\ 2})]^{1/2} \qquad (2.4)$$

Cette expression permet de contrôler rapidement l'état de la machine et d'indiquer si les conditions de fonctionnement ont évoluées de manière inquiétante depuis la dernière mesure. Ce critère n'évolue pas de manière significative au cours de la 1ère phase de dégradation, il ne commence à croître que pendant la 2eme phase de dégradation [26]. Ceci est un point faible pour la maintenance conditionnelle et rend la détection précoce impossible. De plus le signal vibratoire recueilli par le capteur contient toujours des bruits non seulement de la machine mais aussi de l'environnement, ce qui peutentraîner une mauvaise interprétation de la valeur RMS, surtout dans un espace industriel où les machines ne sont pas isolées, sans toutefois oublier l'effet de masque.

Valeur crête

La valeur crête, donnée par :

$$V_c = 20\log(Am/\sigma_x) \qquad (2.5)$$

Est un indicateur qui caractérise l'amplitude maximale des chocs.

Il se manifeste dès l'apparition de la première écaillure et donne une information très précoce de la prédiction. Malheureusement, c'est un mauvais indicateur une fois que la dégradation s'accentue.

Il faut remarquer aussi, que ces deux indicateurs (V_{RMS}, Vc) dépendent de la vitesse de rotation, des charges de la machine et des dimensions des roulements. Ceci est un inconvénient pour la surveillance des roulements (seuil de la surveillance).

Pour pallier à cela, des méthodes équivalentes ont étéintroduites, telles que :

- le facteur de crête :

$$F_c = V_c / V_{RMS} \qquad (2.6)$$

- le facteur de défaut :

$$F_d = aF_c + bV_{RMS} \qquad (2.7)$$

Malheureusement, il est impossible de déterminer si le roulement est en début ou en fin de dégradation, au moins pendant les premières mesures. Un autre indicateur permettant de caractériser le caractère impulsif d'un signal vibratoire, en particulier pour les roulements, fondé sur l'examen de la distribution d'amplitude d'un signal vibratoire, est le kurtosis.

Le kurtosis

Le kurtosis, donnée par :

$$K = 1/N \sum_{1}^{n} (x_i - \bar{x})^4 / \sigma^4 \quad (2.7)$$

Est un indicateur adimensionnel permettant de caractériser le degré d'aplatissement d'une distribution d'un signal vibratoire [26]. Il a l'avantage d'être indépendant des variations des vitesses de rotation et des charges de la machine.

Prenons l'exemple d'un roulement dont nous avons suivi l'évolution du kurtosis, en faisant varier la gamme de fréquence et celle de l'amplitude. Cette étude permet d'introduire le kurtosis, comme l'un des paramètres de la loi de dégradation d'un roulement.

En effet, le signal vibratoire d'un roulement en bon état génère un signal de distribution gaussienne avec un kurtosis voisin de 3 compris entre (2.75 – 3.25) [27]. Par contre, la détection d'un défaut précoce produit un signal transitoire et périodique avec une allure de distribution modifiée avec un kurtosis plus grand (Figure3-20). Pour quantifier ce changement de distribution, le kurtosis est le facteur le plus sensible.

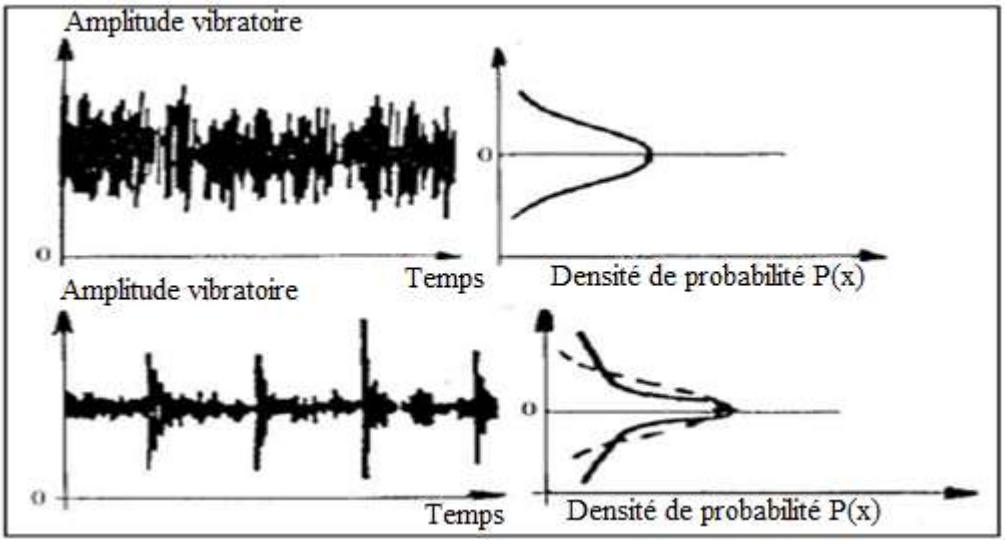


Figure 3.20 Signature vibratoire d'un roulement : a) roulement en bon état, b) roulement dégradé [5].

2.5.3 Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement

Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues [28].

d :le diamètre de la bille

D : le diamètre du cercle primitif

∝: l'angle de contact

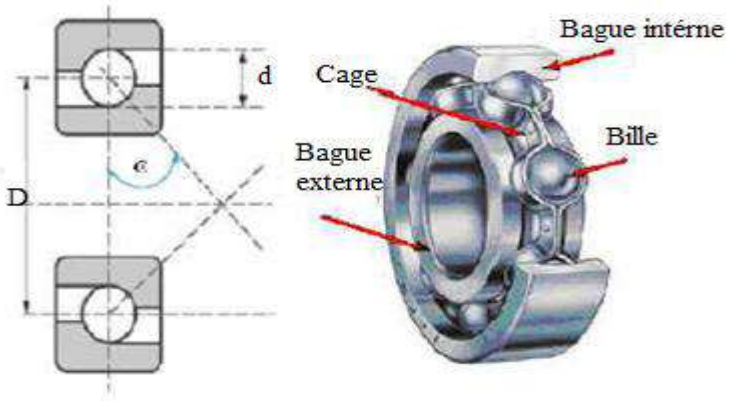


Figure 3.21 Caractéristiques d'un roulement.

2.5.3.1Défaut sur la bague extérieure

Un défaut de type écaillage affectant la bague externe d'un roulement a pour image vibratoire un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence du défaut. À chaque composante de ce peigne, est associée une paire de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique importante [figure 3.22] [28].

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (2-8).

$$Fbext = \frac{N}{2}\left[1 - \frac{dcos\varphi}{D}\right] Frot \quad (2.8)$$

Où, $Frot$ est la fréquence de rotation, d le diamètre de la bille, D le diamètre du cercle primitif,n le nombre de billes et α l'angle de contact.

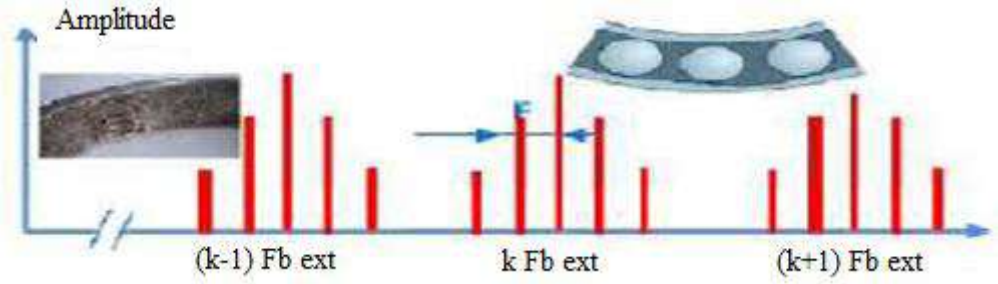


Figure 3.22 Image vibratoires théorique d'un défaut de bague extérieur.

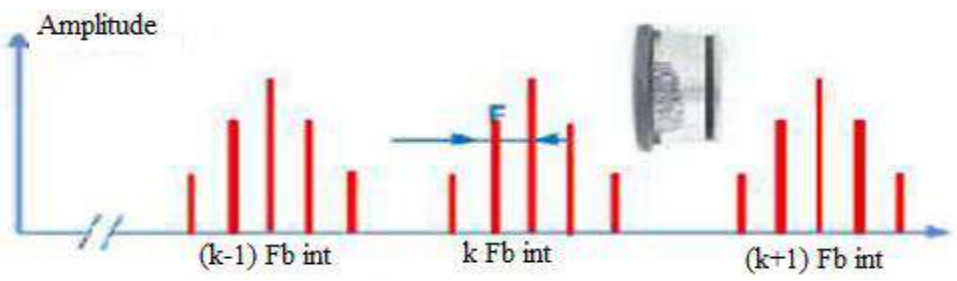
2.5.3.2 Défaut sur la bague intérieure

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image vibratoire unpeigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation (figure 2-23) [28].

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (2.9).

$$Fbint = \frac{N}{2}\left[1 + \frac{dcos\varphi}{D}\right] Frot \quad (2.9)$$

Où, $Frot$ est la fréquence de rotation, d le diamètre de la bille, D le diamètre du

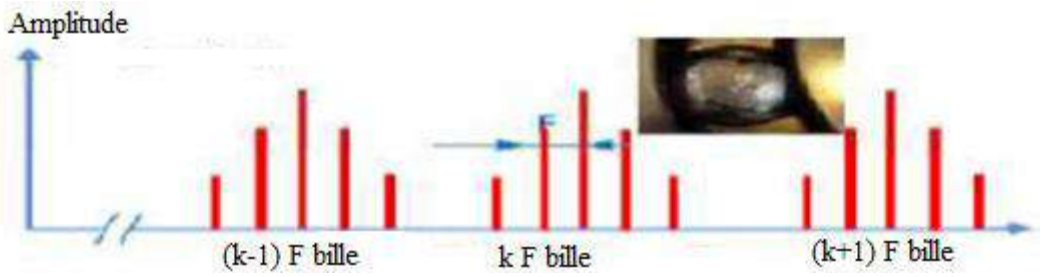


cercle primitif, n le nombre de billes et α l'angle de contact.

Figure 2.23 Image vibratoires théorique d'un défaut de bague intérieure.

2.5.3.3 Défaut sur l'élément roulant

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant (bille, rouleau ou aiguille) a pour imagevibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de la cage (figure 2.24) [28].



Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (2.10).

Figure 2.24 Image vibratoires théorique d'un défaut de bille.

$$F\,b\; = \frac{D}{2d}\,[1 - \frac{d}{D}\,(cos \propto)^2]Frot \qquad (2.10)$$

2.5.3.4 Défaut sur la cage

La fréquence de passage d'un défaut de cage est donnée par l'équation (2.11) : Ce défaut semanifeste par la présence de raies à la fréquence *fc* et ses harmoniques. [28].

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (2.11).

$$Fc\; = \frac{N}{2}\left[1 + \frac{dcos\varphi}{D}\right]Frot \qquad (2.11)$$

2.5.4Rupture de la cage

L'évolution rapide de ce type de défaut en rend la surveillance difficile. Dans la plupart des cas, un roulement dont la cage est cassée va très vite se détériorer. Les éléments roulants (billes ou rouleaux) n'étant plus maintenus, ils vontse regrouper et créer

un fléchissement de l'arbre ou, notamment dans le cas derouleaux, se mettre en travers, entraînant ainsi le blocage immédiat du rotor [5] [12].

2.5.5 Déversement de bague

Pour assurer une durée de vie optimale. Les bagues d'un roulement doiventêtre parfaitement alignées, c'est-à-dire que l'angle formé par les axes desbagues intérieure et extérieure doit être nul. En pratique, il existe toujours uncertain défaut d'alignement entre l'arbre et le logement. L'effet de ce défautd'alignement sur la durée de vie dépend de l'importance du déversementexprimé en degrés, du type et de la géométrie interne du roulement et dela charge appliquée. Le défaut d'alignement provoque une distribution de contraintes non uniforme le long de la ligne de contact rouleau/chemin deroulement, voire des contraintes aux extrémités des rouleaux qui réduisentconsidérablement la durée de vie d'un roulement de manière plus ou moinsimportante selon son type :

- les roulements dits rigides (roulements rigides à billes, roulements à rouleaux cylindriques),les butées à billes ou à rouleaux cylindriques ne supportent guère des déversements d'un angle supérieur à 5 minutes sans induire des contraintes importantes.

- les roulements à alignement automatique (roulements à rotule sur billes ousur rouleaux, butées à rotule sur rouleaux) sont capables de compenser lesdéfauts d'alignement. Les valeurs maximales admissibles sont donnéespour chaque type de roulement par les constructeurs.

Un déversement de bague se manifeste dans le domaine vibratoire par la présence d'une raie d'amplitude importante dont la fréquence correspond àla fréquence de défaut de la bague déversée, l'amplitude de cette composanteétant largement prépondérante face à ses premiers harmoniques avant que cedéfaut n'induise, par fatigue, des écaillages (figure 2-20). L'amplitude de cettecomposante dépend de l'importance du déversement du type de roulement [1].

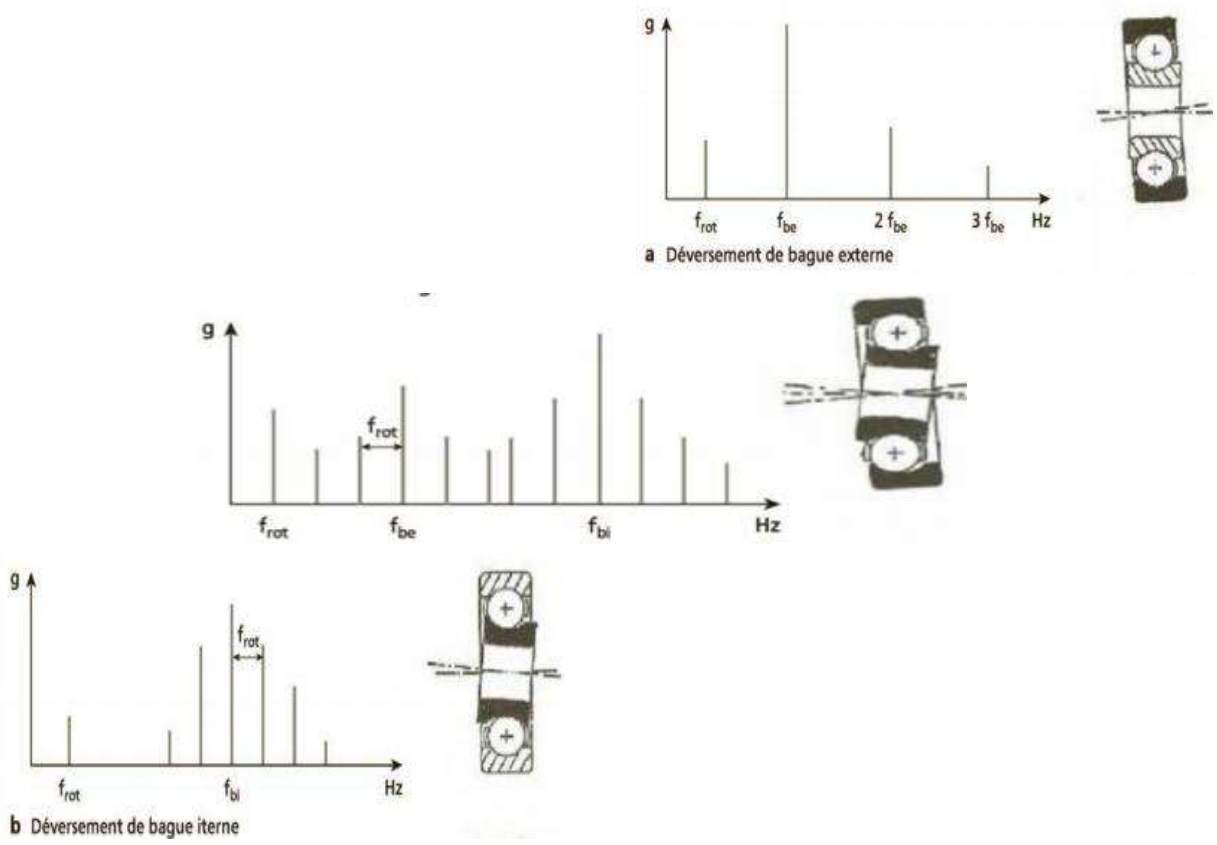


Figure 2.25 Spectre de défauts de diversement.

2.5.6 Jeux de paliers

Les typologies vibratoires liées à des jeux de palier se caractérisent selon l'importance du défaut par:

- l'excitation des résonances hautes fréquences des différents éléments constitutifs du roulement et palier par chocs.

- un peigne de raies basses et moyennes fréquences plus ou moins étendu depas correspondant à la fréquence de rotation [12].

2.5.7 Altération due au passage de courants de fuite

L'apparition de cannelures affectant les pistes d'un roulement induite par lepassage de courants de fuite se traduit par la présence d'un peigne de raiesdont le pas correspond le plus souvent à la fréquence de défaut de bagueexterne, même si souvent les cannelures affectent à la fois les bagues externeet interne. L'amplitude du peigne de raies dans la bande fréquentielle [1500-5000 Hz] est très élevée alors qu'elle est très faible dans la bande [0-1500 Hz](figure 2.21).

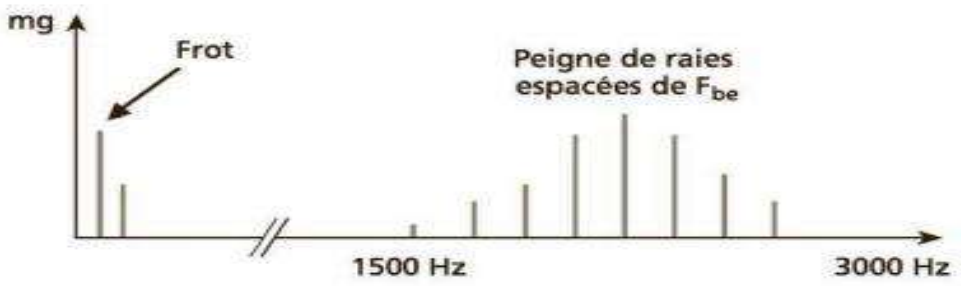


Figure 2.26 spectre induit par une altération de bague de roulement par électroérosion [5].

2.5.8Les étapes d'identification des anomalies

Les différentes étapes d'identification des anomaliespeuvent être schématisées suivant la figure 2- 27.

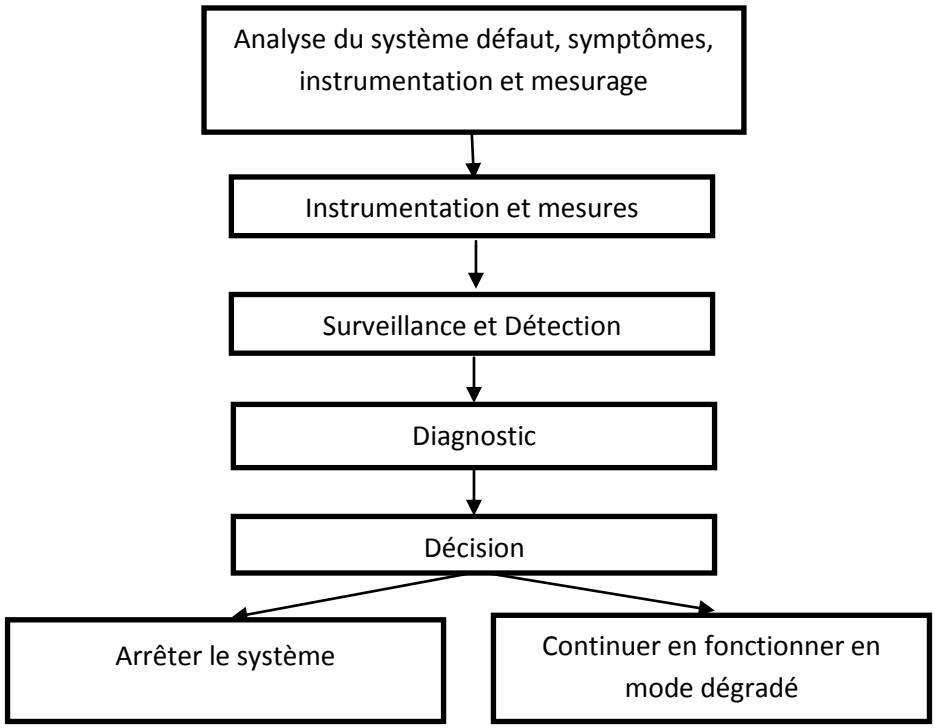


Figure 2.27 Etapes d'identification des anomalies.

Étape 1 : Analyse du système

C'est une étape primordiale. Il s'agit de fixer des objectifs au système que l'on souhaite mettre en place. Pour cela il est nécessaire de rechercher les caractéristiques du système (par exemple, quel est le nombre de dents d'un engrenage à surveiller), des défauts et symptômes des défauts qu'il s'agit d'appréhender, … C'est cette étape qui conduit aux choix des méthodes à mettre en œuvre et, en particulier les méthodes de traitement des signaux.

Étape 2 : Instrumentation et mesurage

Il s'agit de déterminer le type et l'emplacement des capteurs et réaliser les mesurages qui peuvent être périodiques, en continu, ou simplement uniques dans le cas d'un contrôle qualité.

Étape 3 : Surveillance et détection

Après la mise en place des capteurs, l'opération de surveillance permettra de réaliser le suivi des indicateurs extraits des signaux avec les capteurs. Les indicateurs utilisés sont en général « simples » et ne sont utilisés généralement que pour faire de la détection, par exemple, signaler que les indicateurs dépassent un certain seuil, ce qui traduirait un état anormal de la machine. Ces seuils sont en général déterminés par expérience soit par des méthodes de traitement statistique du signal. Beaucoup de méthodes de traitement du signal sont plutôt adaptées à la « détection ».

Étape 4 : Diagnostic

Il s'agit dans l'opération de diagnostic de déterminer l'élément défaillant du système complexe. C'est dans cette étape que le traitement du signal peut contribuer de manière la plus significative. Il s'agit d'extraire du signal, avec la connaissance du système et des symptômes des défauts, le (les) paramètre(s) relatif(s) à ces symptômes. Outre les méthodes de traitement du signal, cette étape peut utiliser des méthodes dites de « décision », par exemple de type reconnaissance des formes.

Étape 5 : Décision

C'est l'étape qui complète l'étape de diagnostic. Il s'agit dans un contexte industriel de décider des actions à mener, lancer des opérations de maintenance, arrêter lesmachines [12],

2.6Conclusion

Ce chapitre présente les principes de base de l'analyse vibratoire appliquée à la maintenance des machines tournantes. Dans cette analyse, deux types d'outils peuvent être utilisés : outils pour la détection des défauts et outils pour la localisation et l'identification des défauts. Le choix de ces outils se fait selon la nature de la machine et la nature du

composant mécanique défectueux.Le chapitre suivant sera consacré au développement d'une interface graphique pour simplifier et accélérer l'analyse des défauts.

3.1 Introduction

L'analyse des signaux vibratoires exige une interface graphique pour visualiser les graphes, tels que les signaux temporels, les spectres et les indicateurs de surveillance. L'utilisation d'une interface graphique est indispensable pour accélérer les analyses et simplifier l'interprétation des résultats. Dans les sections suivantes, nous montrerons le déroulement de développement d'une interface graphique et les résultats issus de son utilisation pour la détection et l'identification des défauts de roulement.

3.2 Développement d'une interface graphique

Le développement d'une interface graphique consiste à réaliser un produit logiciel qui résout de façon optimale le problème posé. C'est le développement d'un petit logiciel opérationnel qui est en quelque sorte un extrait, un morceau choisi du futur logiciel. C'est autour de ce petit logiciel opérationnel que l'on construira le logiciel opérationnel. Cette phase peut se décomposer en :

1. Analyse préalable qui a pour but de fixer le domaine d'application, le cadre de l'étude et les objectifs que devra atteindre.
2. Conception, par ce terme, on entend deux choses :
   - Conception d'un logiciel vis à vis d'un domaine d'application. C'est la phase de modélisation du système.
   - Conception d'un logiciel destiné à être implanté dans une organisation pour y effectuer une tâche précise. C'est la phase d'analyse fonctionnelle.

   Cette dualité implique la réalisation simultanée de deux études de conception.
3. Développement.

   Il s'agit dans cette phase de passer de la représentation conceptuelle précédente à un code compréhensible par la machine. Cette phase va être liée aux caractéristiques de l'outil de développement. Il faut choisir cet outil, le maîtriser et représenter les modèlesmathématiques dans le formalisme de l'outil.

Le logiciel obtenu doit être validé, entretenu et perfectionné en vue de simplifier son utilisation et répondre aux exigences.

3.3 Objectifs de l'application

Avant de commencer le développement d'un programme, il est indispensable de fixer les objectifs du programme envisagé.

Dans notre projet, nous sommes intéressés pour le programme qui sera développé nous permet de faire les tâches suivantes :

- Lire un fichier de données extrait d'un système d'acquisition des signaux
- Choisir le signal original.
- Calculer les indicateurs statistiques du signal original
- Calculer le spectre fréquentiel du signal original
- Filtré le signal original
- Calculer le spectre fréquentiel du signal filtré
- Calculer les indicateurs statiques du signal filtré
- Calculer les fréquences des défauts de roulement
- Calculer le cepstre fréquentiel
- Calculer le spectre d'enveloppe

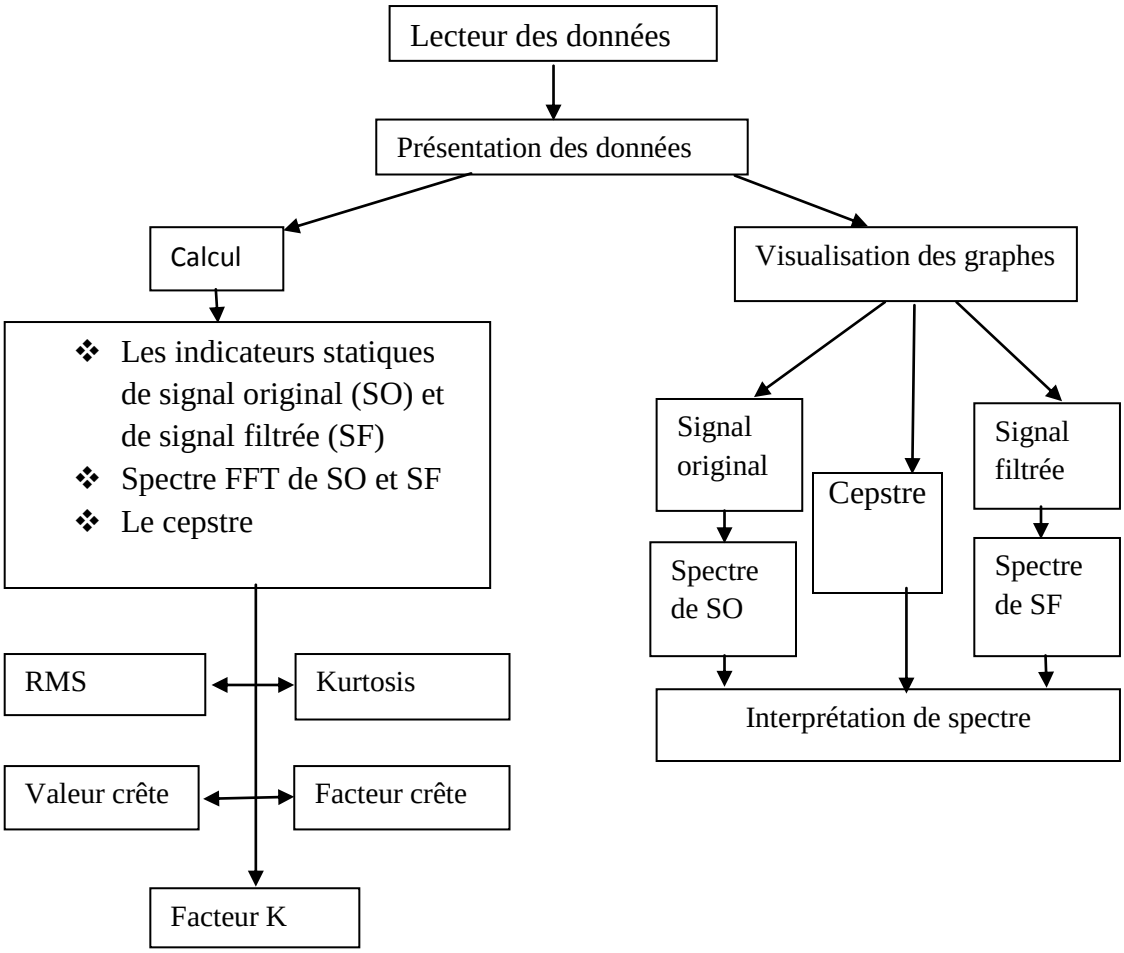


Figure 3.1 Conception de l'application.

3.4Outils de développement de l'application

Dans le présent projet, nous avons choisi le langage MATLAB(R2013b) comme outil pour développer notre application.

MATLAB (« matrix laboratory ») est un langage de programmation de quatrième génération émulé par un environnement de développement du même nom ; il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The MathWorks, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Les utilisateurs de MATLAB (environ un million en 2004) sont de milieux très différents comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel

que pour la recherche. Matlab peut s'utiliser seul ou bien avec des toolbox (« boîte à outils »).

Les interfaces graphiques permettent de contrôler des applications logicielles avec des commandes de type pointer-cliquer. Avec une interface de ce type, l'utilisateur n'a pas besoin de connaître un langage ni de saisir des commandes pour se servir de l'application.

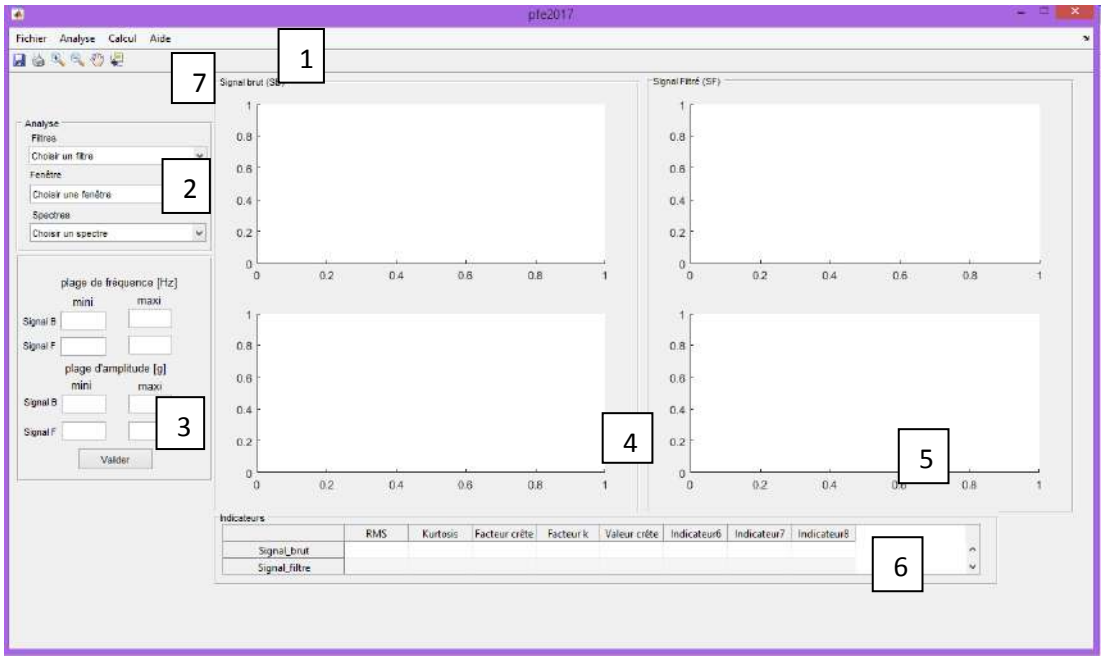
Les applications MATLAB sont des programmes autonomes, dotés d'une interface graphique, qui permettent d'automatiser une tâche ou un calcul. L'interface graphique contient généralement des commandes telles que des menus, des barres d'outils, des boutons et des curseurs. De nombreux produits MATLAB, comme Curve Fitting Toolbox, Signal Processing Toolbox et Control System Toolbox, incluent des applications dotées d'une interface graphique personnalisée. Il est également possible de créer ses propres applications personnalisées, ainsi que leur interface graphique, afin de permettre à d'autres de les utiliser.

En général, l'objectif de la conception de l'interface utilisateur est de produire une interface utilisateur qui le rend facile (explicite), efficace et agréable (conviviale) pour faire fonctionner une machine de la manière qui produit le résultat souhaité. Cela signifie généralement que l'opérateur doit fournir un minimum d'entrée pour obtenir la sortie désirée, et que la machine minimise les sorties indésirables à l'être humain.

Avec l'utilisation accrue des ordinateurs personnels et le déclin relatif de la conscience sociale de la machinerie lourde, l'interface utilisateur terme est généralement supposé signifier l'interface utilisateur graphique, alors que le panneau de contrôle industriel et des discussions de conception de contrôle des machines plus se réfèrent généralement à des interfaces homme-machine [29].

3.5Présentation de l'interface graphique

Après l'analyse préalable qui a pour but de fixer les objectives de l'application et la détermination de la conception envisagée, nous avons développé l'interface graphique illustrée par la figure 3.2.



.

Figure 3.2 Interface graphique

Dans cette interface, on distingue les parties suivantes :

1. Une barre de menu qui comporte les boutons suivants : ouvrir un fichier, et un choisir un capteur et calculer les indicateurs globaux, tracer le signal, tracer le spectre FFT, avec un bouton de calcul qui contient les outils de calcul les fréquences caractéristiques des défauts de roulement, engrènement et aube.

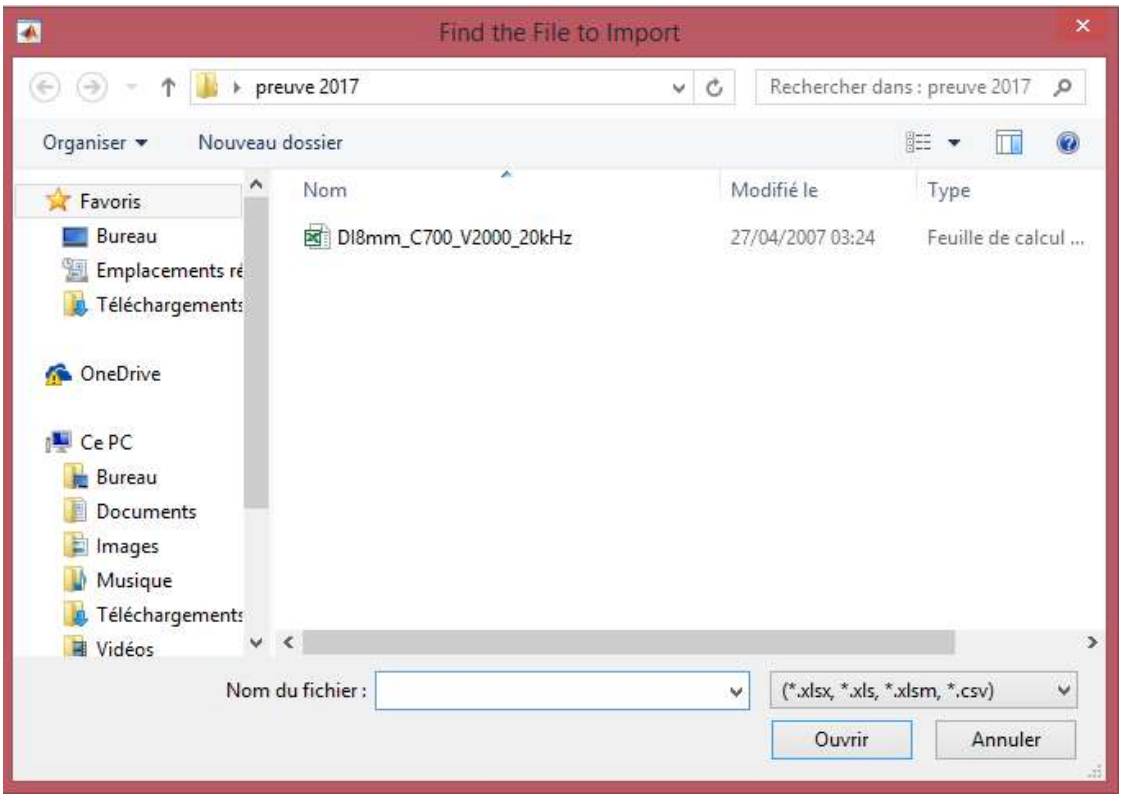


Figure 3.3 Emplacement de fichier de données

2. Un paneld'analyse qui comporte des pop-up menu de filtrage (types de filtrage « passe bande, passe bas et passe haut »), fenêtrage et le spectre

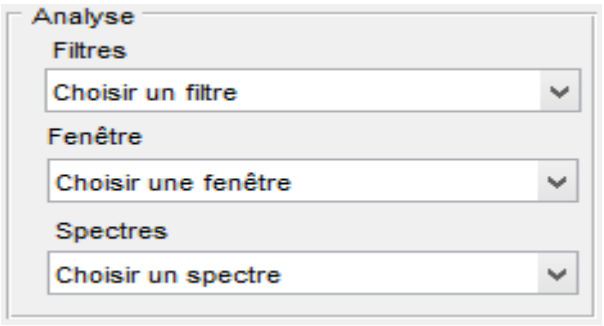


Figure 3.4 Panel d'analyse

3. Un panel de zoom, cette panel nous permettre de changer l'axe des fréquences et des amplitudes pour un bon lecteur du spectre de signal original et filtré.

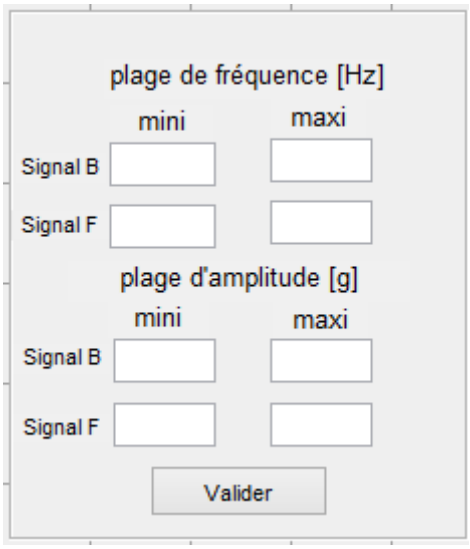
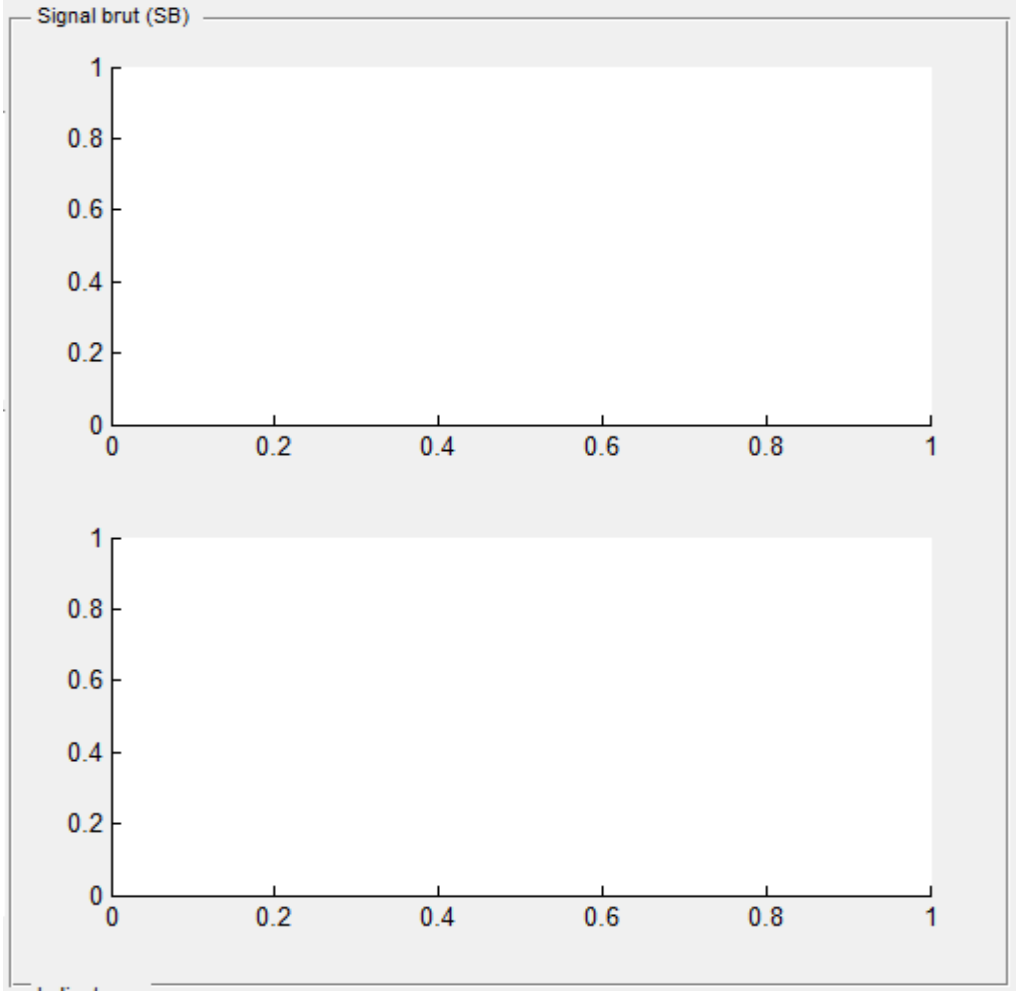


Figure 3.5 Panel des lignes des harmoniques

4. Un panel de signal brut qui comporte des axes pour ploter les graphes des signaux



et leur spectre des déférents capteurs.

Figure 3.6 Panel de signal brut (ou original) (SO)

5. Un panel de signal filtrée qui comporte des axes pour ploter les graphes des signaux filtrés et leur spectre des déférents capteurs.

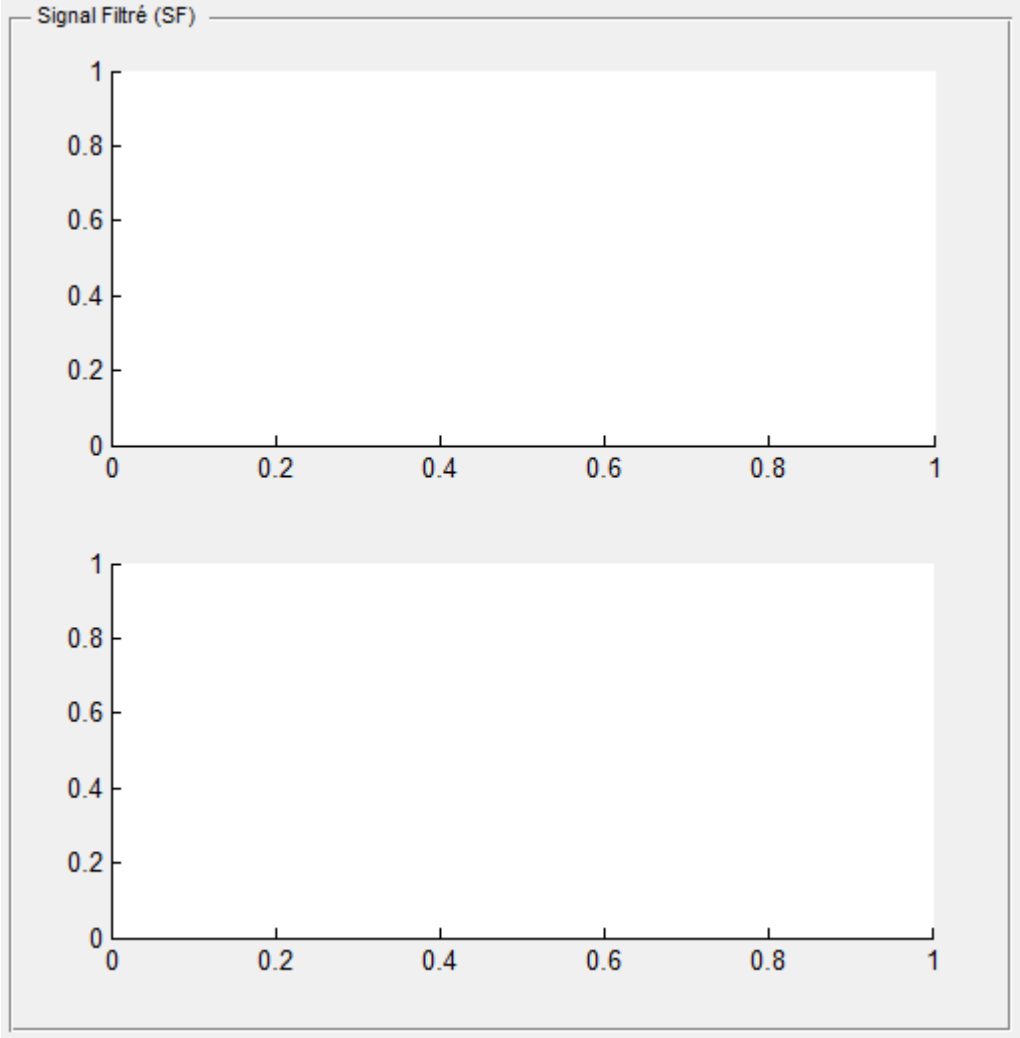


Figure 3.7 Panel de signal filtrée (SF)

6. Un panel pour l'affichage des valeurs calculées des indicateurs suivants : RMS, Kurtosis, Valeur crête, Facteur crête, Facteur krelatifs aux signaux brut et filtré.

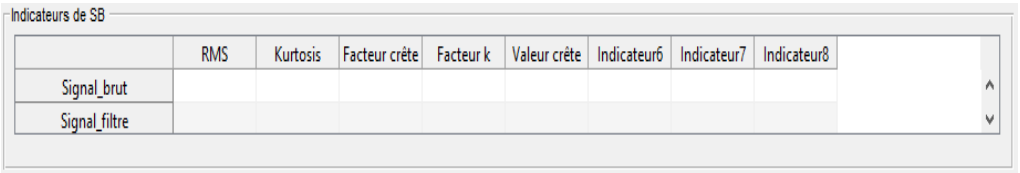


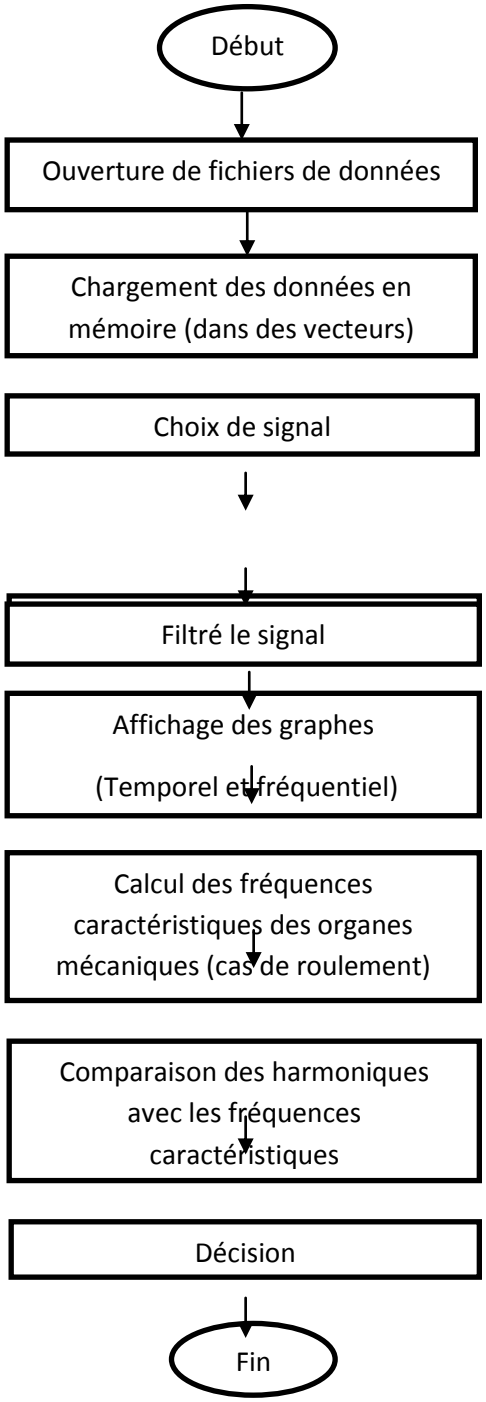
Figure 3.8 Panel des indicateurs des signaux brut et filtrée

7. Barre d'outils qui comporte des outils des éléments de base de l'interface graphique qui regroupe en une barre plusieurs boutons.

3.6 Procédure d'utilisation de l'application

Le programme est conçu pour analyser des signaux délivrés par des capteurs. Le programme appelle seulement les fichiers de données qui comporte neuf colonnes qui serons stocker dans la mémoire sous neuf vecteurs (un vecteur pour le temps de Ne=8192 points et huit vecteurs pour les valeurs d'accélérations).

Pour utiliser le programme, il faut suivre la procédure illustrée par la figure 3.9



↓

Figure 3.9 Procédure d'utilisation du programme

3.7 Présentation du banc d'essai

Pour valider les outils intégrés dans l'interface graphique, un signal vibratoire brut a été utilisé. Ce signal est prélevé d'un accéléromètre fixé sur un palier avec un roulement à billes à une rangée qui comporte un défaut d'écaillage sur la piste de sa bague intérieure. La figure 3.11 montre le schéma du banc d'essai expérimental utilisé et l'emplacement du roulement à tester.

Ce type de roulement comporte une bague intérieure, une bague extérieure, un ensemble de billes et une cage qui maintient la position des billes. Un défaut artificiel réalisé par électroérosion a été introduit sur la bague intérieure.

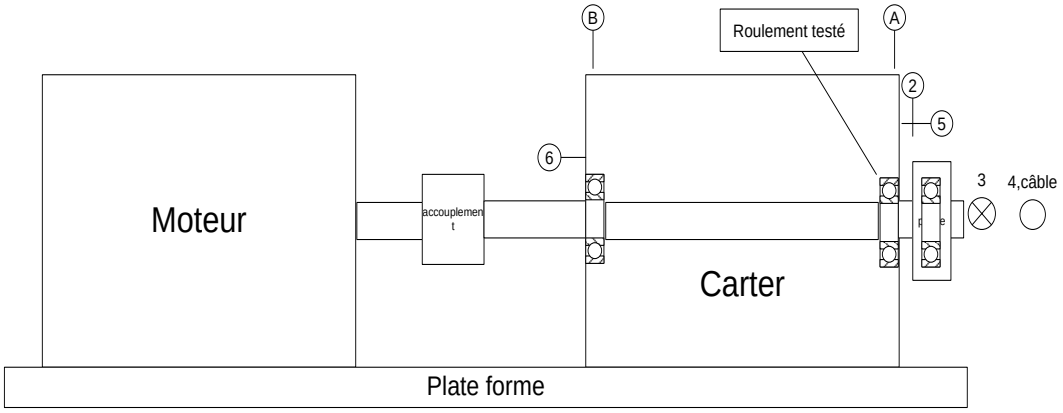


Figure 3.10 Schéma du banc d'essai

La chaîne de mesure est constituée des principaux éléments suivants :

- Accéléromètres piézo-électriques :
  Sensibilité 10 [mV/g],
  Mode de fixation : embase collée.
- Système d'acquisition.
- Logiciel de traitement MATLAB.

3.7Caractéristique cinématique

- **Les roulements**

Le roulement testéest un roulement à billes à une rangée de type SKF6206.

La figure 3.12 - illustre le diamètre intérieur et extérieur d'un roulement à une rangé à billes

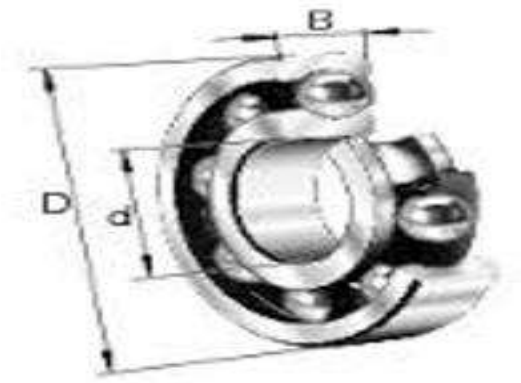


Figure 3.11 Roulement à billes à une rangée

Tableau 3.1 Caractéristiques du roulement et les détails des tests

Caractéristiques du roulement
Type SKF 6206
Nombre de billes 9
Diamètre primitif 46 mm
Diamètre d'une bille 9.525 mm
Angle de contact 0

3.8Analyse vibratoire des signaux

3.8.1Analyse temporel

L'analyse temporel du signal vibratoire s'appuie surle calcul des indicateurs de vibrations tels que : RMS, Kurtosis, Facteur crête, Facteur k, Valeur crête, etc.

La valeur efficace du signal *(*ou RMS Root Mean Square*)*

C'est un indicateur qui mesure le contenu énergétique dans un signal temporel. Sa valeur correspond à la racine carrée de la moyenne du carrée du signal *x(t)* calculée sur une période T [30].

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T}.\int_{t}^{t+T} x^2(t).dt} \quad (3.1)$$

Et pour une variable discrète$\{x_i\}$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2} \quad (3.2)$$

Où *n* et x_i sont le nombre d'échantillons prélevés dans le signal et l'amplitude du niveau vibratoire mesuré filtré ou non, respectivement.

Les indicateurs crêtes

Les indicateurs crêtes sont issus des valeurs crêtes(supérieures, inférieures ou crêtes à crêtes) du signal temporel mesuré. Les plus utilisés sont le facteur crête et le facteur K.

Le facteur de crête (FC)défini comme étant le rapport entre la valeur crête (VC) d'un signal (en valeur absolue) et sa valeur efficace.

$$FC = \frac{Vcc_{crête}}{V_{efficace}} = \frac{\sup|x_i|}{RMS} \quad (3.3)$$

Le facteur K défini comme étant le produit entre la valeur crête et la valeur efficace.

$$K = Vcc_{crête}.V_{efficace} \quad (3.4)$$

Le Kurtosis

Le Kurtosis ou coefficient d'aplatissement, est le moment centré d'ordre 4. Le Kurtosis est un indicateur statistique permettant de détecter l'apparition des chocs et de suivre l'évolution des défauts induisant des forces impulsionnelles périodiques.Il permet de détection précoce d'un défaut de roulement. Il correspond au moment d'ordre 4 normé de la distribution statistique du signal. Il est défini comme suit :

$$Kurtosis = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\right)^2} \quad (3.5)$$

où M_4 et M_2 sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2, respectivement.

$\bar{x}$ est la valeur moyenne de$\{x_i\}$,

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \quad (3.6)$$

Dans cette étude, les indicateurs cités ci-dessous ont été calculés par l'utilisation d'un programme développé sous la plateforme Matlab. Les résultats donnésdans le tableau 3.2 concernent les indicateurs de vibration calculés à partir d'un signal réel etson signal filtré dansles bandes fréquentielles suivantes :
[10 5000] Hz, [5000 10000]] Hz, [10000 15000]] Hz et la bande [7500 12500]] Hz.
Le signal a été filtré par les méthodes suivantes : Filtre Butterworth, filtre elliptique, filtre Chepycheff, et filtre FIR.

Les figures 3.12-3.15représentent les variations des indicateurs de vibration d'un signal originel et de son signal filtré en passe-bande par les filtres Butterworth, elliptique, chepycheff, et FIR pour différentes bandes de fréquentielles.
On constate que les valeurs issues du signal filtré sont inférieures à celles du signal brut. Ceci indique que le filtrage a réduit les bruits du signal brut.

Tableau 3.2 Indicateurs de vibration

Les bandes de fréquence		Signal origine	Butterworth	Chebycheff	Elliptique	FIR
Bande 0-5 KHz	RMS	0.3038	0.2232	0.2539	0.2504	0.1813
	Kurtosis	37.4075	14.6850	16.7059	15.5231	14.7263
	Facteur crête	12.5303	7.6749	8.5763	8.3386	8.9788
	Facteur K	1.1564	0.3823	0.5527	0.5229	0.2951
	Valeur crête	3.8066	1.7130	2.1772	2.0881	1.6278
Bande 5-10 KHz	RMS	0.3038	0.2290	0.2526	0.2404	0.1878
	Kurtosis	37.4075	11.1723	11.2091	11.1964	16.0344
	Facteur crête	12.5303	7.1032	6.4664	6.8101	10.2921
	Facteur K	1.1564	0.3726	0.3806	0.3935	0.3631

	Valeur crête	3.8066	1.6268	1.5689	1.6371	1.9333
Bande 10-15 KHz	RMS	0.3038	0.2988	0.2986	0.2985	0.2949
	Kurtosis	37.4075	32.9973	32.7683	32.8198	34.0893
	Facteur crête	12.5303	12.3758	12.2193	12.3332	11.5853
	Facteur K	1.1564	1.1050	1.0896	1.0987	1.0074
	Valeur crête	3.8066	3.6980	3.6488	3.6811	3.4163
Bande 15-20 KHz	RMS	0.3038	0.3034	0.3026	0.3025	0.3027
	Kurtosis	37.4075	35.9779	36.0132	36.0335	36.9409
	Facteur crête	12.5303	11.7439	11.7216	11.7532	12.3909
	Facteur K	1.1564	1.0814	1.0733	1.0757	1.1355
	Valeur crête	3.8066	3.5636	3.5470	3.5556	3.7510
Bande 7.5-12.5 KHz	RMS	0.3038	0.2930	0.2934	0.2931	0.26.40
	Kurtosis	37.4075	26.7739	26.0020	25.8511	25.3121
	Facteur crête	12.5303	10.4121	10.0772	10.0549	10.6429
	Facteur K	1.1564	0.8549	0.8673	0.8636	0.7416
	Valeur crête	3.8066	2.9446	2.9564	2.9467	2.8094

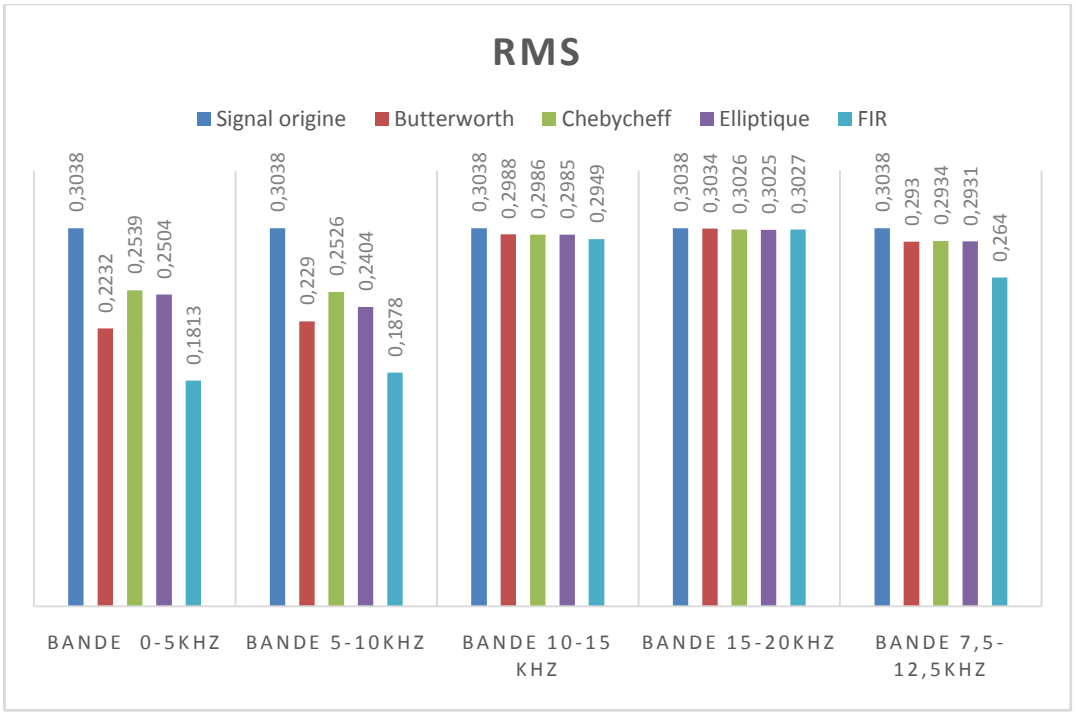


Figure 3.12 Variation de RMSpour différents filtres et bandes fréquentielles

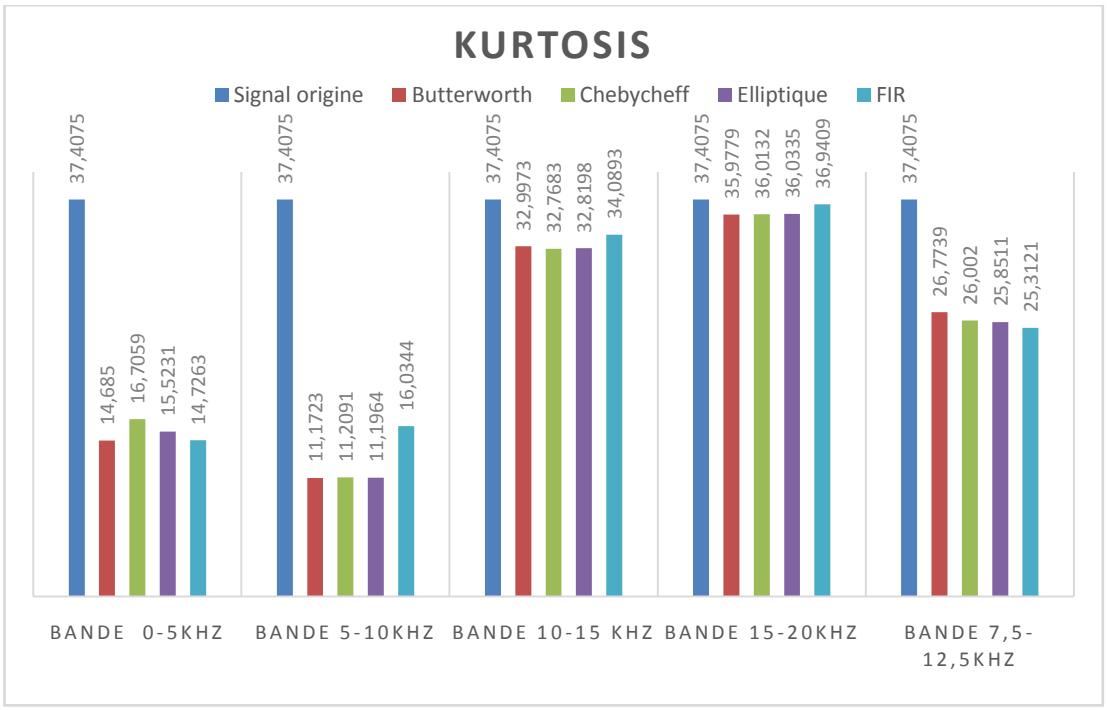


Figure 3.13 Variation de Kurtosispour différents filtres et bandes fréquentielles

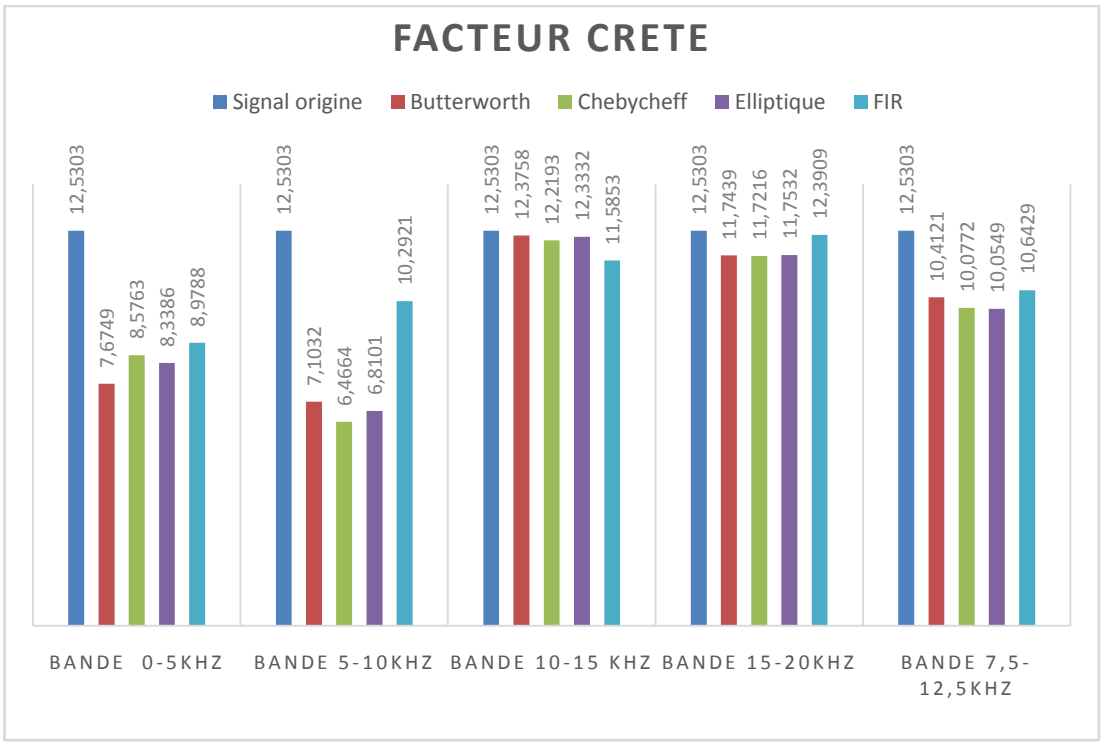


Figure 3.14 Variation de facteur crêtepour différents filtres et bandes fréquentielles

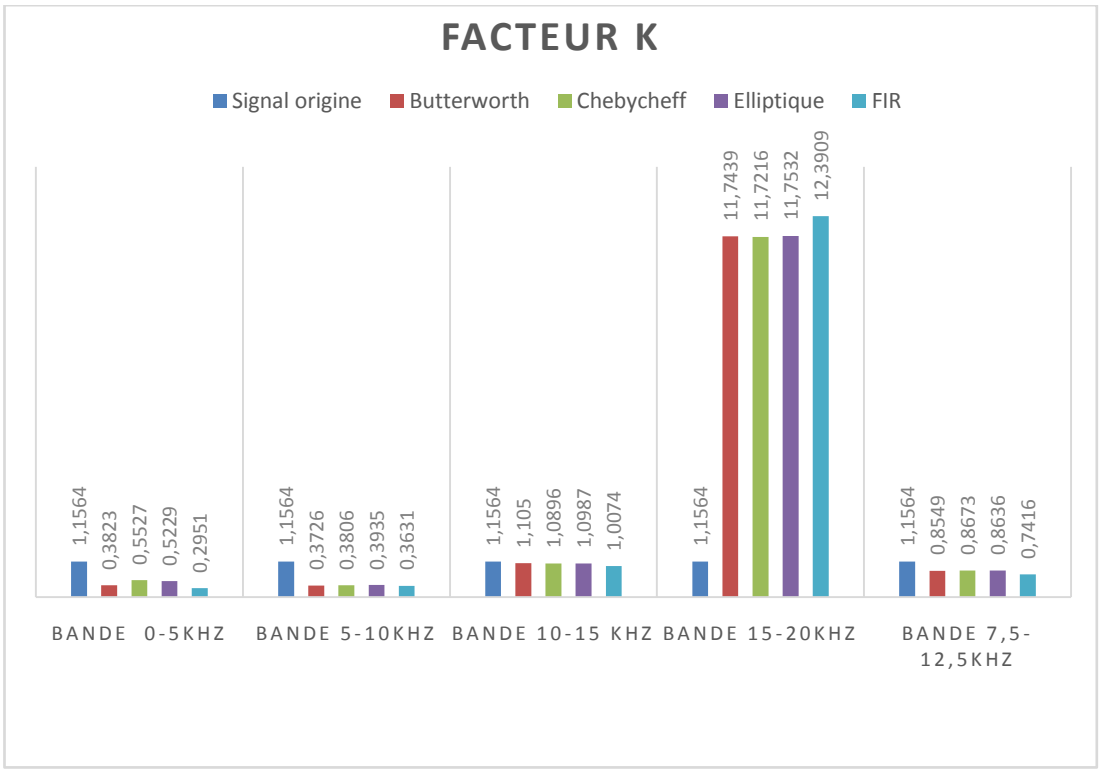


Figure 3.15 Variation de facteur Kpour différents filtres et bandes fréquentielles

L'analyse du domaine temporel permet de détecter la présence des défauts dans le roulement. Pour ce faire, on compare les valeurs indiquées dans le tableau 3.2 avec les seuils définis ci-dessous.

Dans le cas du roulement, la détection de l'état d'un roulementse vérifie généralement par les indicateurs kurtosis et facteur crête dont les seuils sont données comme suit :

Les seuils de l'indicateur Kurtosis

Si Kurtosis = 3, le roulement est en bonétat ;

Si 3 <Kurtosis> 6, le roulement est faiblement dégradé ;

Si Kurtosis > 6 avec retour à 3, le roulement estdégradé.

Les seuils de l'indicateur facteur crête

Si Facteur crête ≤ 5, le roulement est en bon état ;

Si Facteur crête> 5, leroulement est faiblement dégradé ;

Si Facteur crêtedécroît, le roulement est dégradé [31].

D'après les résultats obtenus, on constate que les valeurs des indicateurskurtosis et facteur crête sont supérieurs à 6 et 5, respectivement.Ceci indique que le roulement esten état dégradé. C'est-à-dire il y a un défaut dans leroulement. Il faut noter, que ces indicateurs signalent à la présence de défaut seulement et ne identifier sa nature.

Pour localiser et identifier le défaut, on utilise l'analyse fréquentielle qui sera présentée dans les sections suivantes.

3.8.2Analyse spectrale

L'analyse fréquentielle ou spectrale s'appuie sur le calcul de la transformée de Fourier et les fréquences caractéristiques des composant de la chaîne cinématique. Ces fréquences sont exprimées en fonction de la géométrie du composant et de sa vitesse de rotation.

Dans notre étude, nous avons utilisé un signal vibratoire prélevé d'un capteur accéléromètre fixé sur un palier avec roulement comportant un défaut d'écaillage sur la piste de la bague intérieure. Le roulement choisi est un roulement rigide à billes à une rangée du type 6206 dont leurs caractéristiques sont indiquées dans le tableau 3.2.

Le signal utilisé est capté pour une vitesse de rotation de l'arbre Vrot = 2000 t/min.

d'où la Fréquence de rotation $Frot = \frac{2000\,tr/min}{60min} = 33.34\,Hz$

Calcul des fréquences caractéristiques du roulement 6202

La fréquence de passage d'une bille sur un défaut de bague interne est :

$$BPFI = \frac{N}{2}\left[1 + \frac{d\cos\alpha}{D}\right]Frot \quad (3.8)$$

$$BPFI = \frac{9}{2}\left[1 + \frac{9{,}53}{46}\right]33.34 = 181.0598$$

$$BPFI = 181.07\text{Hz}$$

La fréquence de passage d'une bille sur un défaut de bague externe est :

$$BPFE = \frac{N}{2}\left[1 - \frac{dcos\ \alpha}{Dp}\right] Frot \quad (3.9)$$

$$BPFE = \frac{9}{2}\left[1 - \frac{9{,}53}{46}\right] 33.34 = 118.93$$

$$BPFE = 118.93\ Hz$$

La fréquence de passage d'un défaut de cage est :

$$FTF = \frac{1}{2}\left[1 + \frac{dcos\ \alpha}{Dp}\right] Frot \quad (3.10)$$

$$FTF = \frac{1}{2}\left[1 + \frac{9{,}53}{46}\right] 33.34 = 13.2156$$

$$FTF = 13.2156\ Hz$$

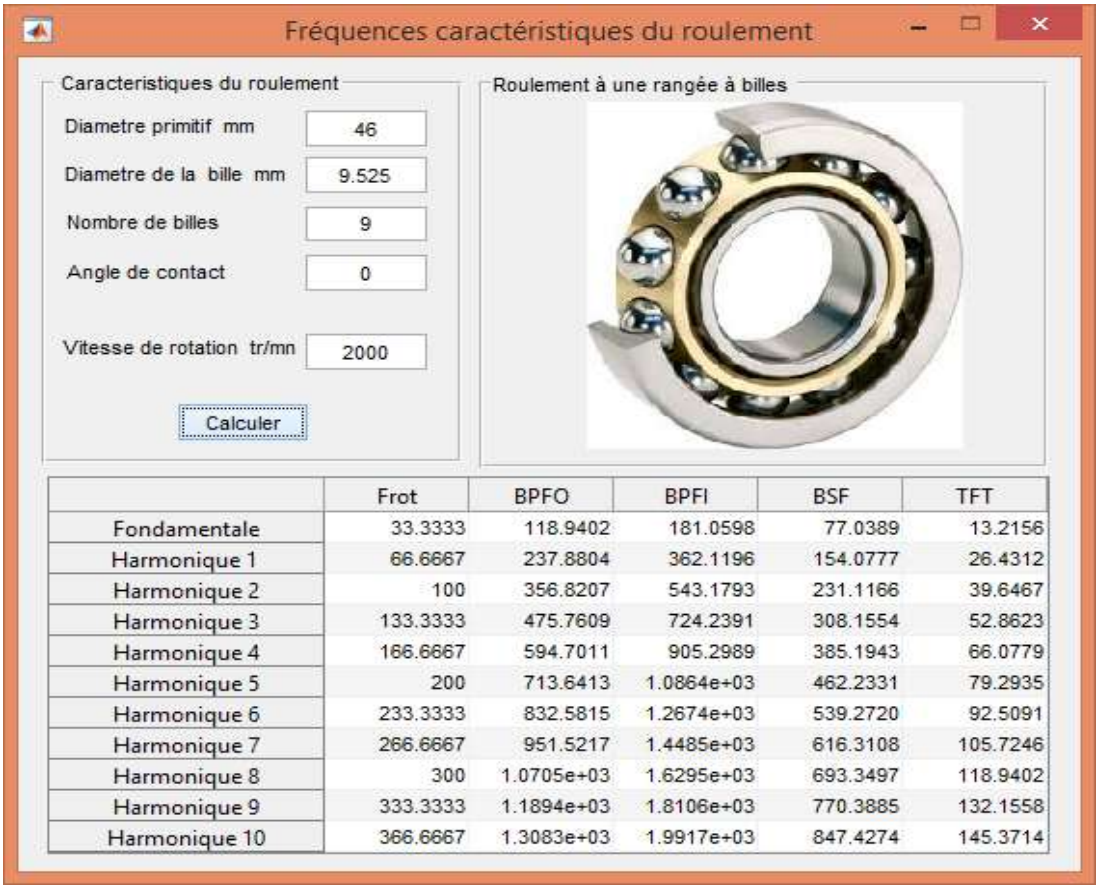
La fréquence de passage d'un défaut de bille sur la bague externe ou sur la bague interne est :

$$BSF = \frac{D}{2d}\ [1 - (\frac{d}{D}\ (cos \propto))^2] Frot \quad (3.11)$$

$$BSF = \frac{46}{19{,}06}\left[1 - \frac{9{,}53}{46}\right] 33.34 = 77.0389$$

$$BSF = 77.0389\ Hz$$

A partir les expressions mathématiques (3.8), (3.9), (3.10) et (3.11) intégrées dansl'application développée, on a calculé les fréquences fondamentales des défauts etses harmoniques. Les résultats de calcul sont illustrés dansla figure 3.16.



	Frot	BPFO	BPFI	BSF	TFT
Fondamentale	33.3333	118.9402	181.0598	77.0389	13.2156
Harmonique 1	66.6667	237.8804	362.1196	154.0777	26.4312
Harmonique 2	100	356.8207	543.1793	231.1166	39.6467
Harmonique 3	133.3333	475.7609	724.2391	308.1554	52.8623
Harmonique 4	166.6667	594.7011	905.2989	385.1943	66.0779
Harmonique 5	200	713.6413	1.0864e+03	462.2331	79.2935
Harmonique 6	233.3333	832.5815	1.2674e+03	539.2720	92.5091
Harmonique 7	266.6667	951.5217	1.4485e+03	616.3108	105.7246
Harmonique 8	300	1.0705e+03	1.6295e+03	693.3497	118.9402
Harmonique 9	333.3333	1.1894e+03	1.8106e+03	770.3885	132.1558
Harmonique 10	366.6667	1.3083e+03	1.9917e+03	847.4274	145.3714

Figure 3.16 Fréquences fondamentales et leurs harmoniques

Pour localiser et identifier le défaut d'écaillage sur la piste de la bague interne, nous utilisons le spectre fréquentiel calculé par l'application de l'algorithme de de FFT sur le signal capté.

Cas1 : signal brut

Les figures 3.17 et 3.18 représentent respectivement le signal temporel brut (ou réel) et son spectre fréquentiel. La figure 3.17 montre des impulsions périodiques qui correspondent aux chocs périodiques naissants du passage des billes sur un défaut.

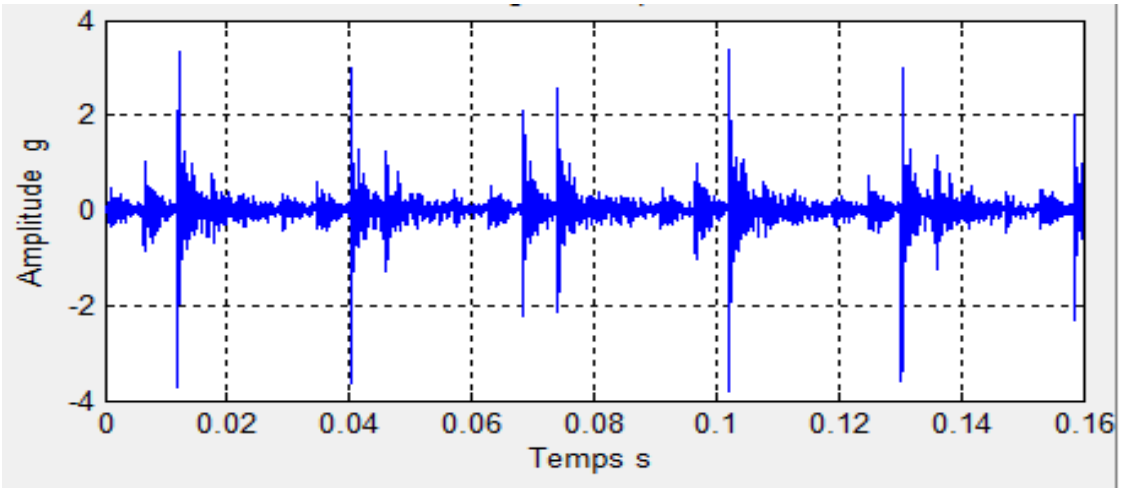


Figure 3.17 Signal temporel avec défaut sur la bague intérieure

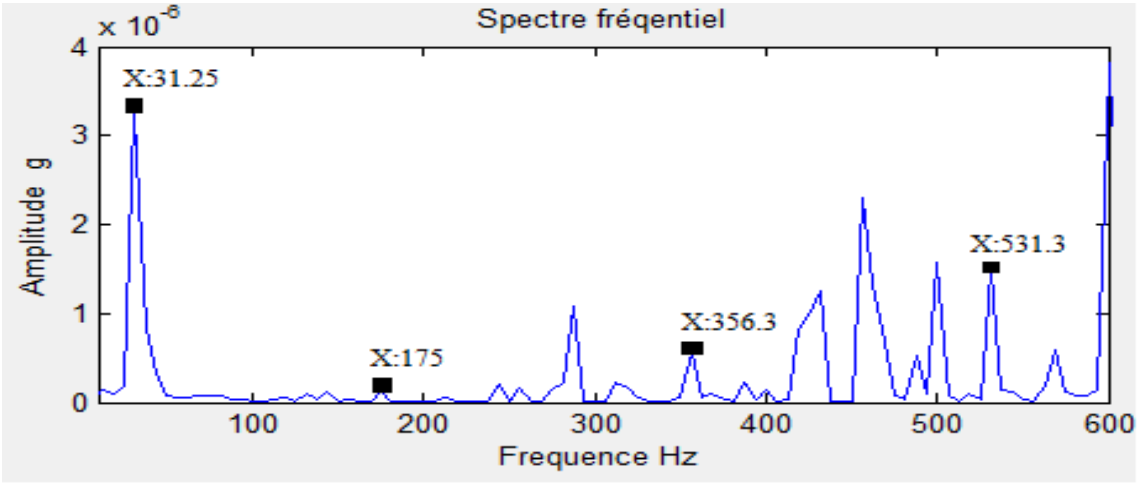


Figure 3.18 Spectre fréquentiel dans la bande de 0 à 600

La figure 3.18 montre l'apparition d'une série de pics. Il y a un pic à la fréquence de rotation à 33.33 Hz qui désigne la présence d'un déséquilibre. Il y a aussi des pics à la fréquence fondamentale et ses harmoniques qui correspondent à la présence du défaut surla piste de la bague intérieure du roulement. On constate un pic à 175 Hz presque égal à la fréquence BPFI = 181 Hz et les deux premières harmoniques sont elles aussi présentent (356.3 Hz et 531.3 Hz). Ces résultats permettent de décider qu'il y a un défaut sur la bague interne du roulement

Le tableau 3.3 montre une comparaison entre les fréquences théorique et les fréquences observées.

Le tableau 3.3 Comparaison entre les fréquences

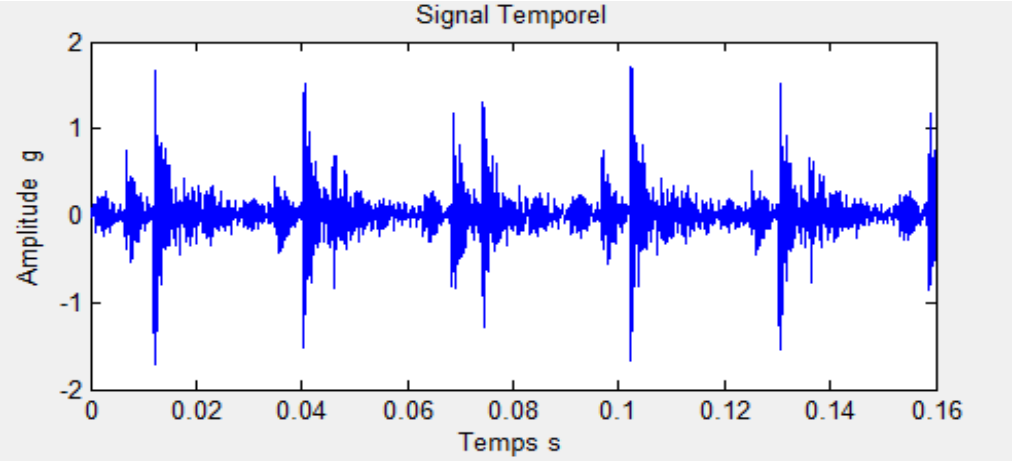
	Frot	BPFI	2BPFI	3BPFI
Fréquence théorique Hz	33.33	181.07	362.13	543.2
Fréquence observée Hz	31.25	175	356.3	531.3
Erreur (%)	0.208	0.607	0.583	1.1

Dans la pratique l'erreur admissible est 1%. Donc les valeurs obtenues sont acceptable. Parmi les paramètres qui influencent sur la valeur de l'erreur sont le réglage de la vitesse de rotation et à la résolution choisie avant l'acquisition des signaux. Il faut savoir que dans une machine tournante en fonctionnement il est difficile d'obtenirune vitesse de rotation avec précision [30].

Dans les sections suivantes, nous présentons les résultats du filtrage du signal brut.Le choix de filtragedépenddu type de la réponse (Passe bas, passe haut, passe bande, passe coupe) et de la méthode de conception du filtre (Infinite Impulse Response (IIR) ou Finite Impulse Response (FIR)). Dans la méthode IIR, on utilise les filtres Butterworth, elliptic, Chebyshev, etc.

Cas 2 : Signal filtré, gamme de fréquences [0 5000] Hz,Filtre Butterworth

Les figures 3.19 et 3.20représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [0 5000] avec le filtre Butterworth. La figure 3.19 montre les impulsions périodiques, ceci indique que le filtrage a conservé l'image réelle du signal brut. Par contre, la figure 3.20ne montre aucun pic, ceci signifie que le filtrage dans [0 5000] Hz ne donne aucune indication sur la présence du défaut d'écaillage sur la bague intérieure.



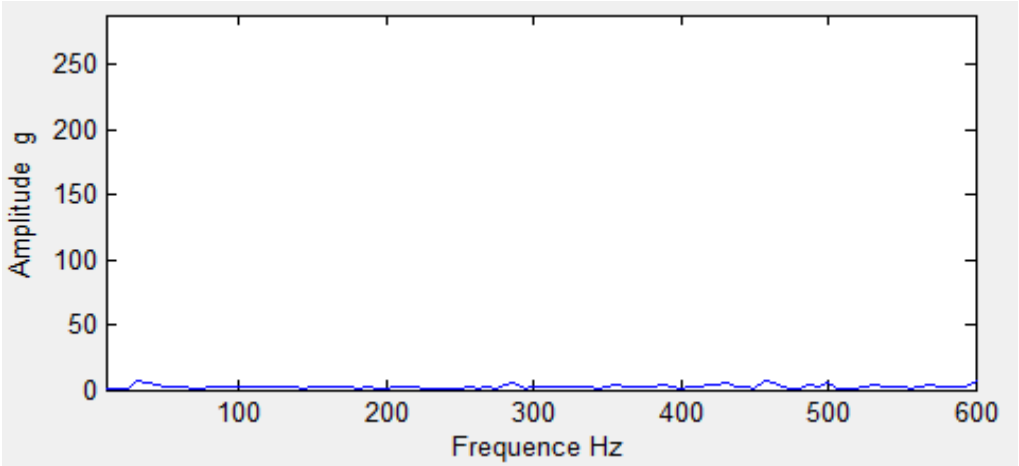


Figure 3.19 Le signal filtrée, bande [0 5000] Hz, filtre butterworth

Figure 3.20 Spectre du signalfiltré, bande [0 5000] Hz, filtre butterworth

Cas 3 : Signal filtré, gamme de fréquences [0 5000] Hz,Filtre Chepycheff

Les figures 3.21 et 3.22 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [0 5000] avec le filtre chepycheff. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 2.Ceci signifie que le filtrage dans la bande [0 5000] Hz n'est pas convenable pour l'identification du défaut de roulement.

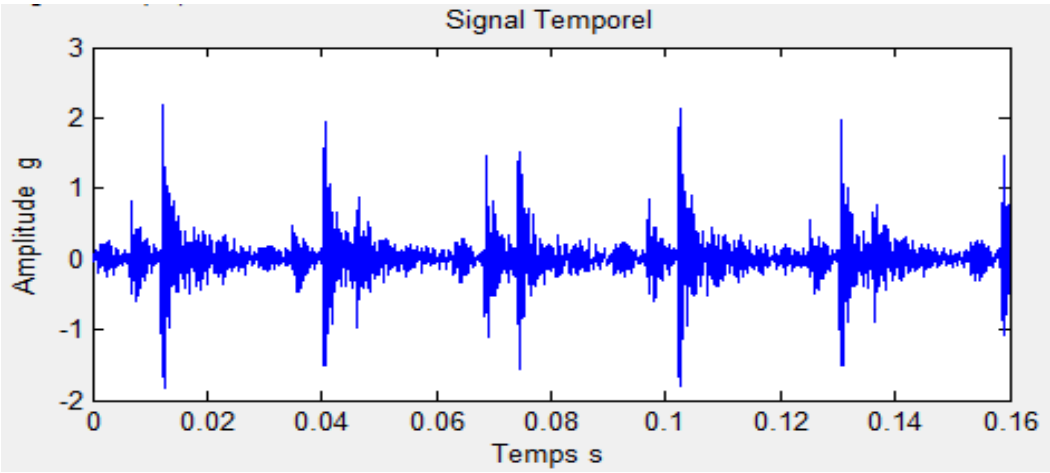


Figure 3.21 Le signal filtrée, bande [0 5000] Hz, filtre chepycheff

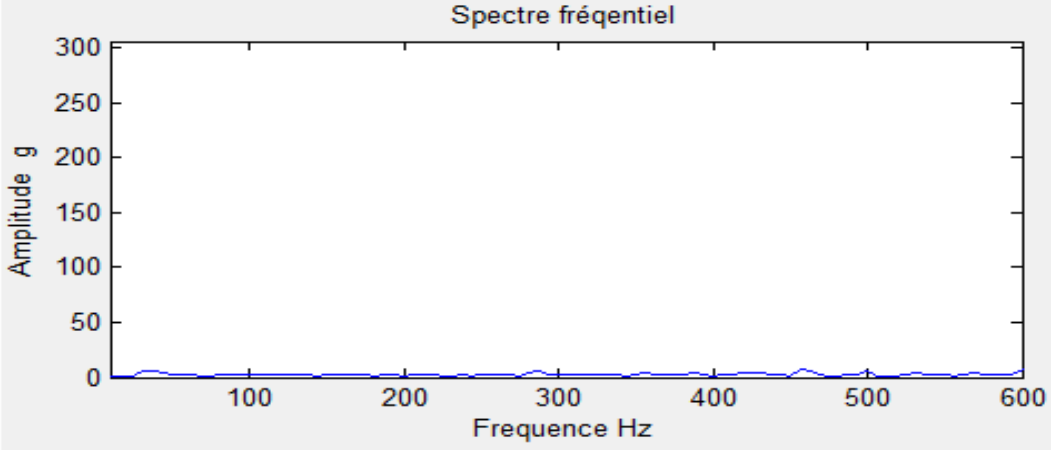


Figure 3.22 Spectre du signalfiltré,bande [0 5000] Hz, filtre chepycheff

Cas 4 : Signal filtré, gamme de fréquences [0 5000] Hz,Filtre elliptique

Les figures 3.23 et 3.24 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [0 5000] avec le filtre elliptique. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 2. Ceci signifie que le filtrage dans la bande [0 5000] Hz n'est pas convenable pour l'identification du défaut de roulement.

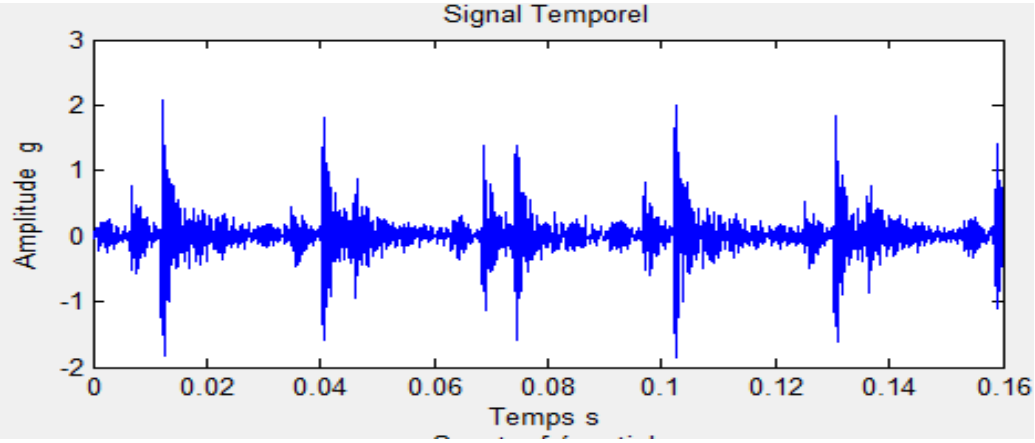


Figure 3.23 Le signal filtrée, bande [0 5000] Hz, filtre elliptique

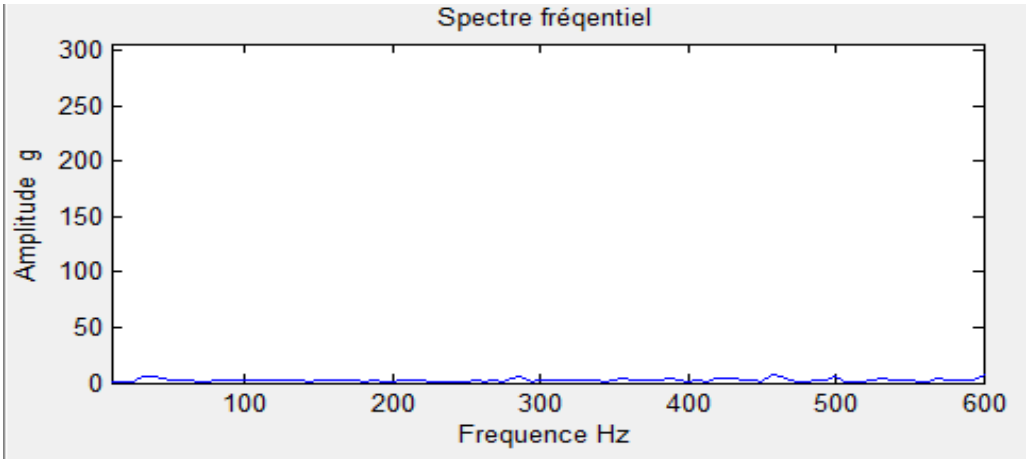


Figure 3.24 Spectre du signalfiltré,bande [0 5000] Hz, filtre elliptique

Cas 5 : Signal filtré, gamme de fréquences [0 5000] Hz,Filtre FIR

Les figures 3.25 et 3.26 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [0 5000] avec le filtre FIR. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 2. Ceci signifie que le filtrage dans la bande [0 5000] Hz n'est pas convenable pour l'identification du défaut de roulement.

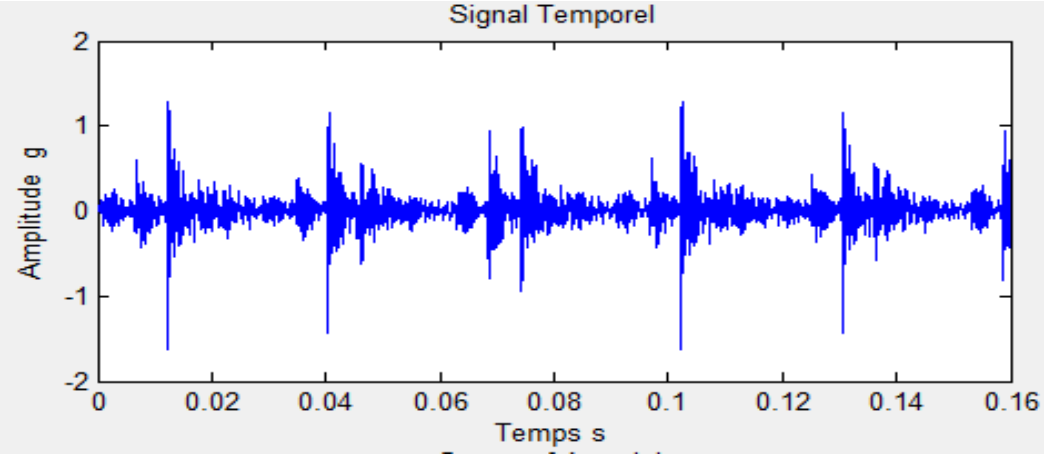


Figure 3.25 Le signal filtrée, bande [0 5000] Hz, filtre FIR

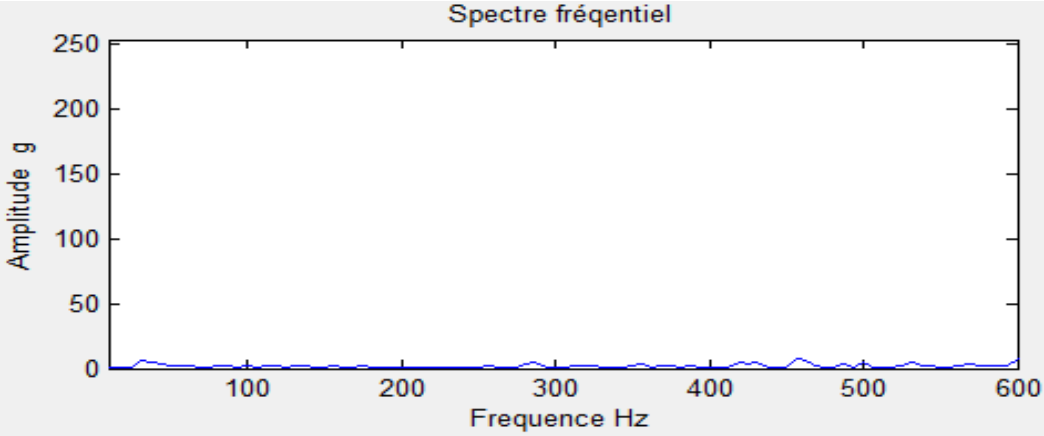


Figure 3.26 Spectre du signalfiltré,bande [0 5000] Hz, filtre FIR

Cas 6 : Signal filtré, gamme de fréquences [500010000] Hz,Filtre Butterworth

Les figures 3.27 et 3.28 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [5000 10000] avec le filtre Butterworth. La figure 3.27 montre que le signal filtré a conservé l'image réelle du signal brut. La figure 3.28 montre l'apparition d'une série de pics à la fréquence de rotation et à la fréquence caractéristique (fondamental et ces harmoniques)du défaut de roulement, ceci signifie que ce filtrage a bien identifiéle défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

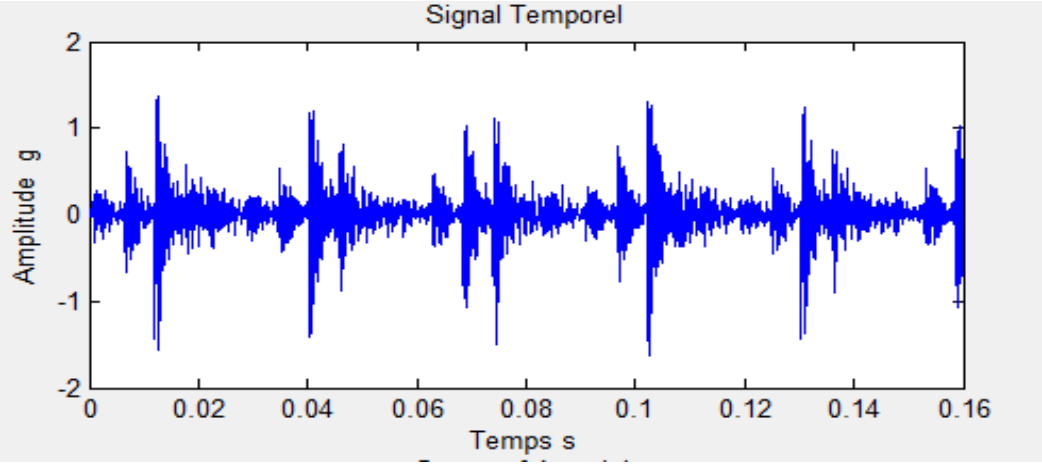


Figure 3.27 Le signal filtrée, bande [5000 10000] Hz, filtre butterworth

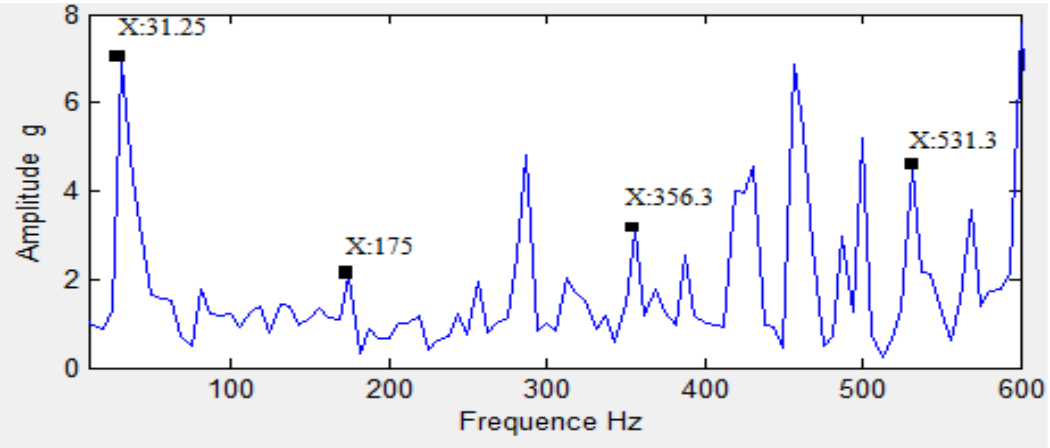


Figure 3.28 Spectre du signalfiltré, bande [5000 10000] Hz, filtre butterworth

Cas 7 : Signal filtré, gamme de fréquences [500010000] Hz,Filtre chepycheff

Les figures 3.29 et 3.30 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [5000 10000] avec le filtre chepycheff. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

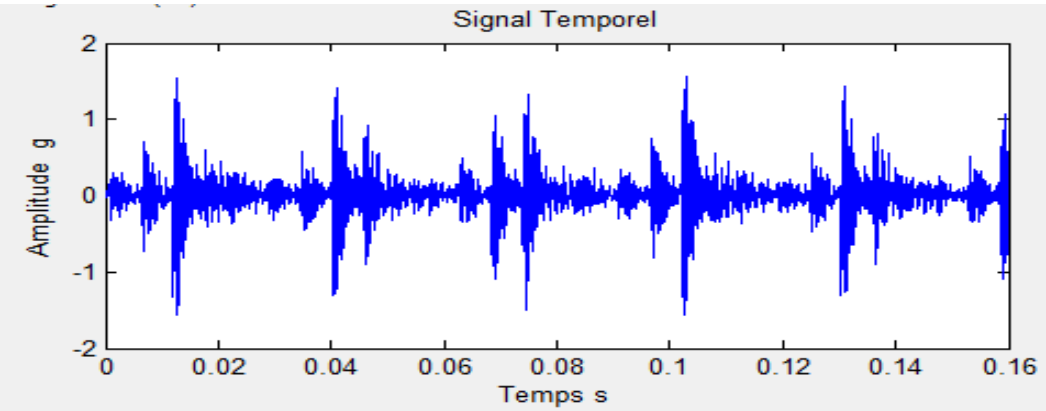


Figure 3.29 Le signal filtrée, bande [5000 10000] Hz, filtre chepycheff

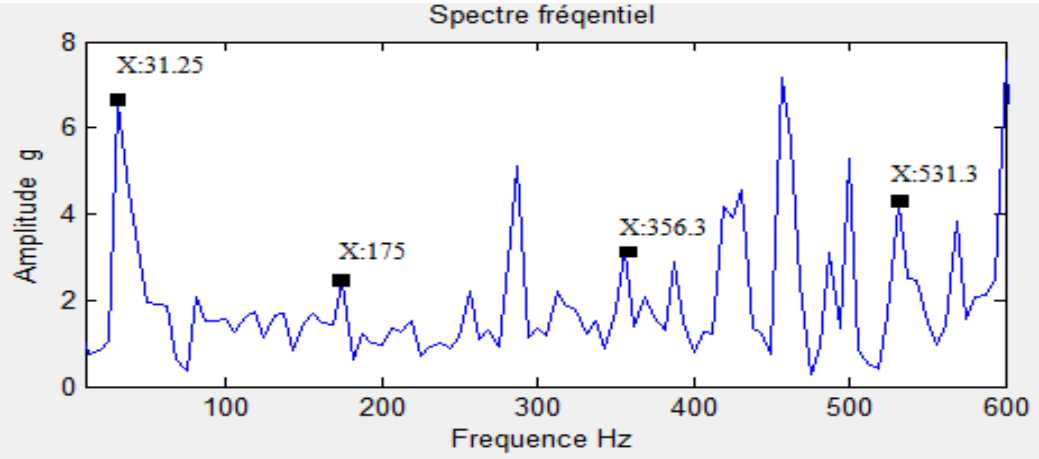


Figure 3.30 Spectre du signalfiltré, bande [5000 10000] Hz, filtre chepycheff

Cas 8 : Signal filtré, gamme de fréquences [500010000] Hz,Filtre elliptique

Les figures 3.31 et 3.32 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [5000 10000] avec le filtre elliptique. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

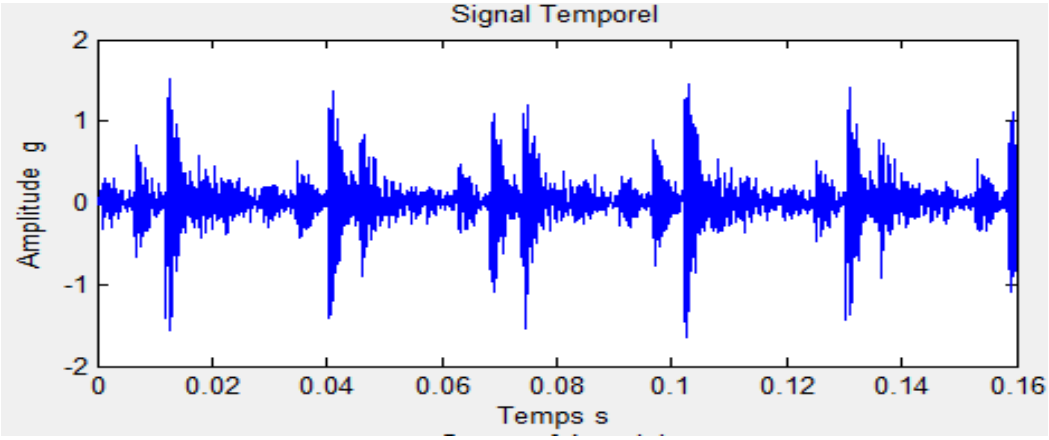


Figure 3.31 Le signal filtrée, bande [5000 10000] Hz, filtre elliptique

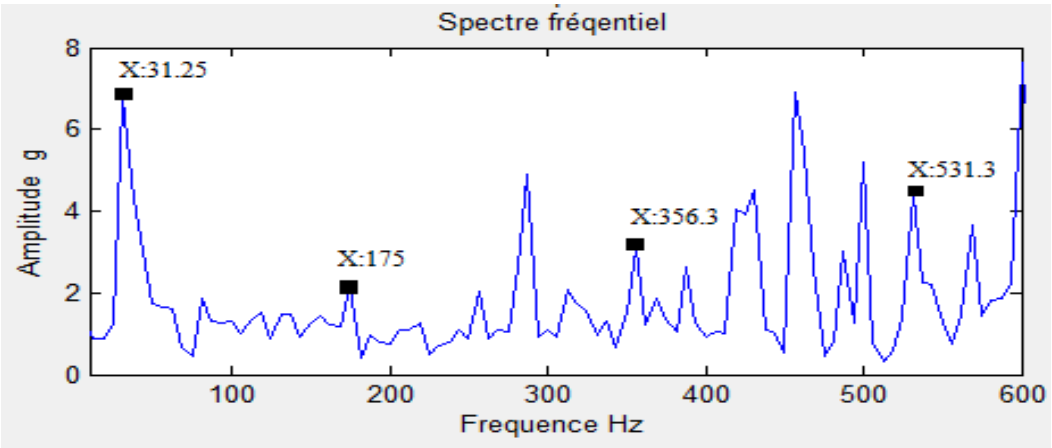


Figure 3.32 Spectre du signalfiltré, bande [5000 10000] Hz, filtre elliptique

Cas 9 : Signal filtré, gamme de fréquences [500010000] Hz,Filtre FIR

Les figures 3.33 et 3.34 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [5000 10000] avec le filtre FIR. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

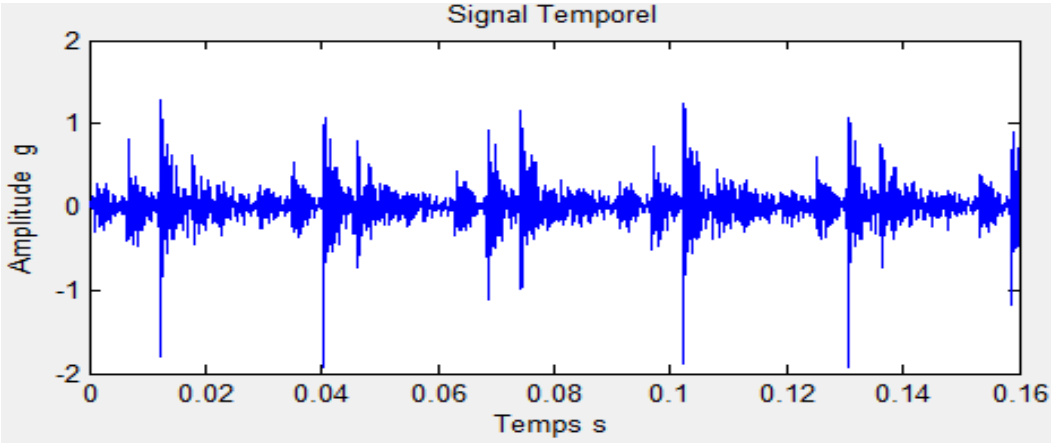


Figure 3.33 Le signal filtrée, bande [5000 10000] Hz, filtre FIR

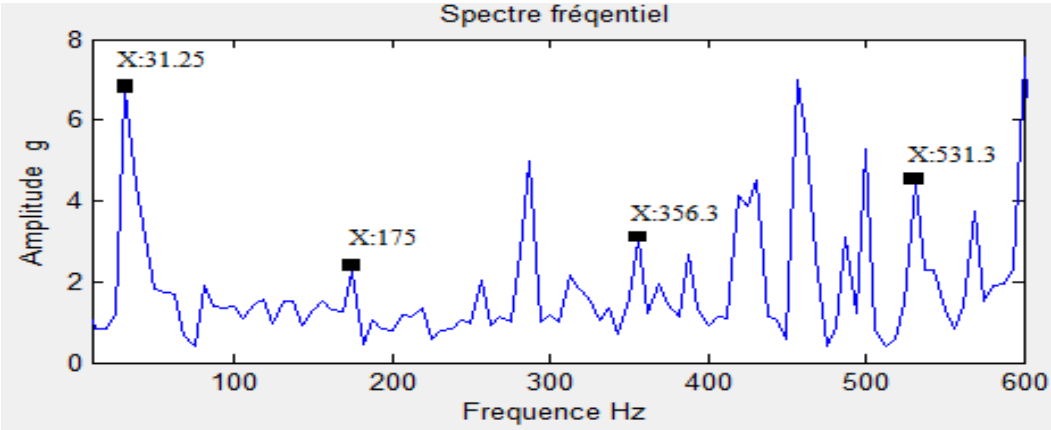


Figure 3.34 Spectre du signalfiltré, bande [5000 10000] Hz, filtre FIR

Cas 10 : Signal filtré, gamme de fréquences [1000015000] Hz,Filtre Butter Worth

Les figures 3.35 et 3.36 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [10000 15000] avec le filtre Butter Worth. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

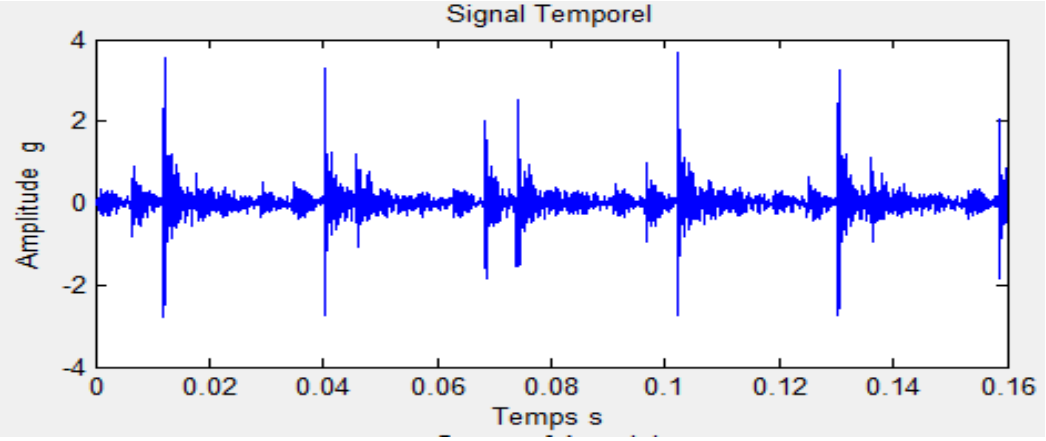


Figure 3.35 Le signal filtrée, bande [10000 15000] Hz, filtre butter Worth

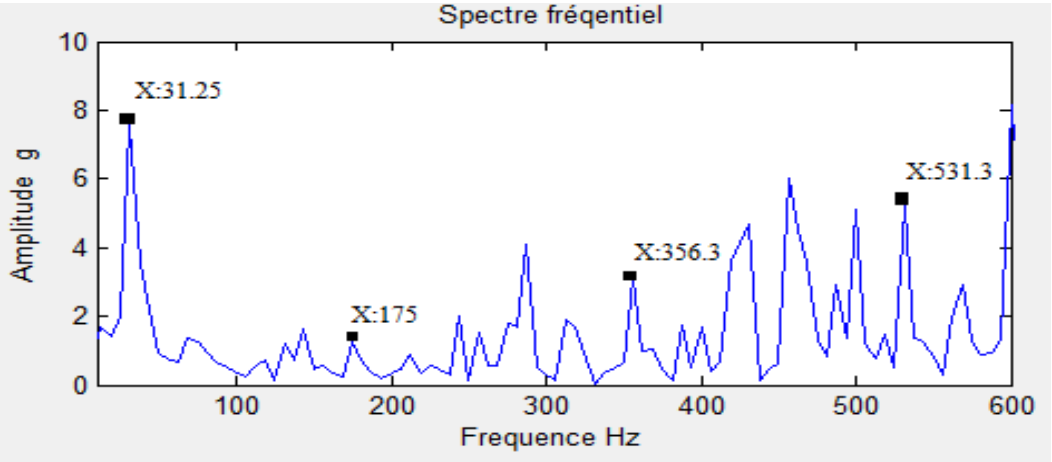


Figure 3.36 Spectre du signalfiltré, bande [10000 15000] Hz, filtre butter Worth

Cas 11 : Signal filtré, gamme de fréquences [1000015000] Hz,Filtre chepycheff

Les figures 3.37 et 3.38 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [10000 15000] avec le filtre **chepycheff**. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

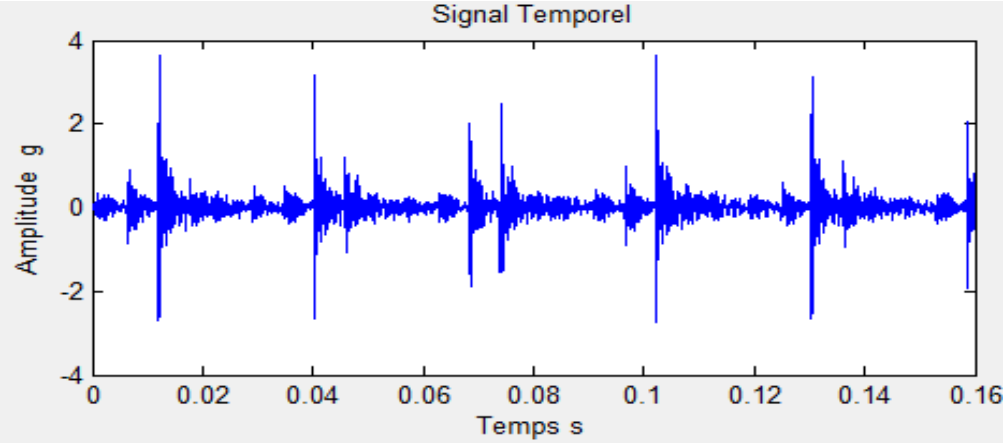


Figure 3.37 Le signal filtrée, bande [10000 15000] Hz, filtrechepycheff

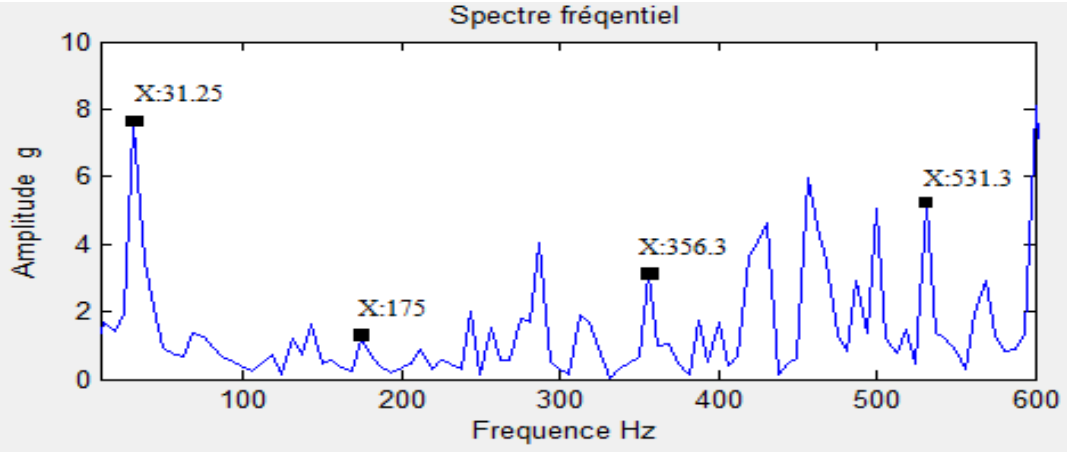


Figure 3.38 Spectre du signalfiltré, bande [10000 15000] Hz, filtrechepycheff

Cas 12 : Signal filtré, gamme de fréquences [1000015000] Hz,Filtre elliptique

Les figures 3.39 et 3.40 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [10000 15000] avec le filtre elliptique. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

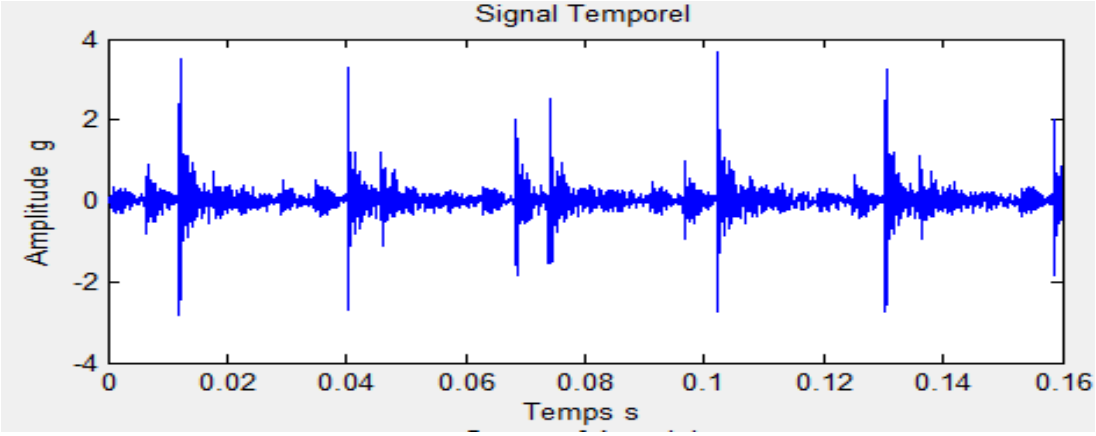


Figure 3.39 Le signal filtrée, bande [10000 15000] Hz, filtre elliptique

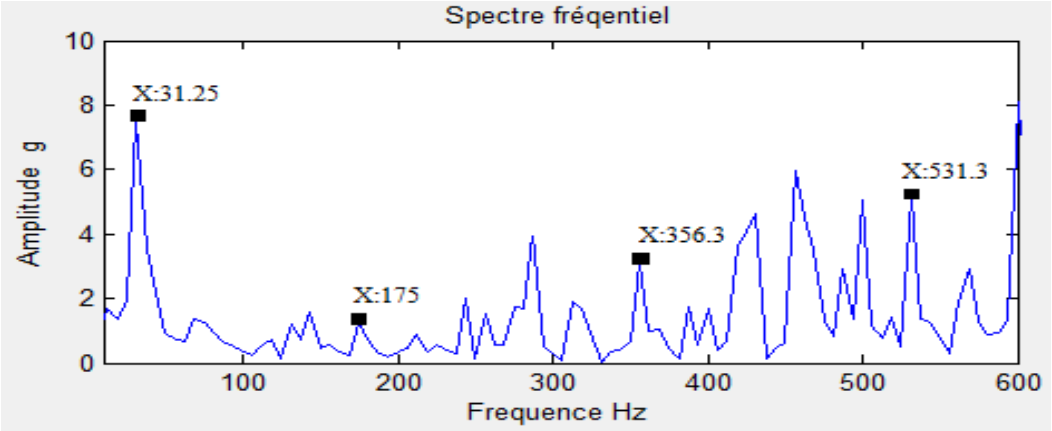


Figure 3.40 Spectre du signalfiltré, bande [10000 15000] Hz, filtre elliptique

Cas 13 : Signal filtré, gamme de fréquences [1000015000] Hz,Filtre FIR

Les figures 3.41 et 3.42 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [10000 15000] avec le filtre **FIR**. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

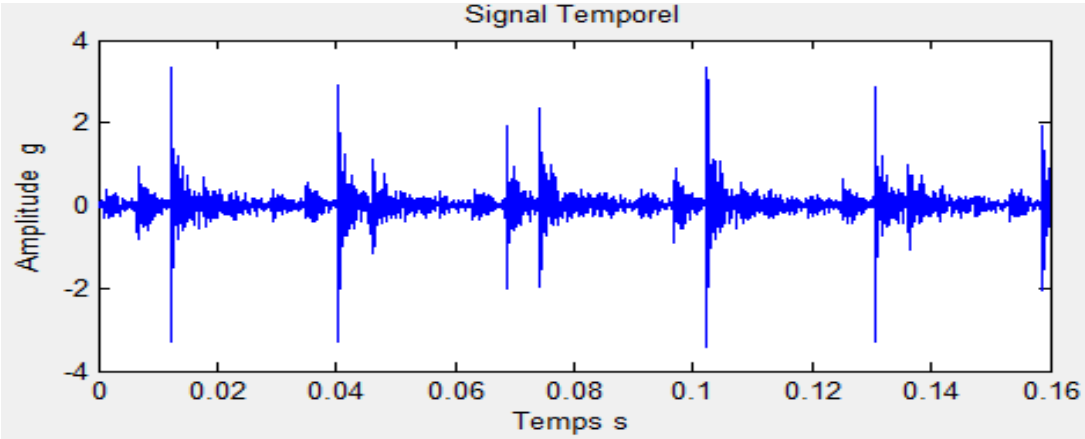


Figure 3.41 Le signal filtrée, bande [15000 15000] Hz, filtreFIR

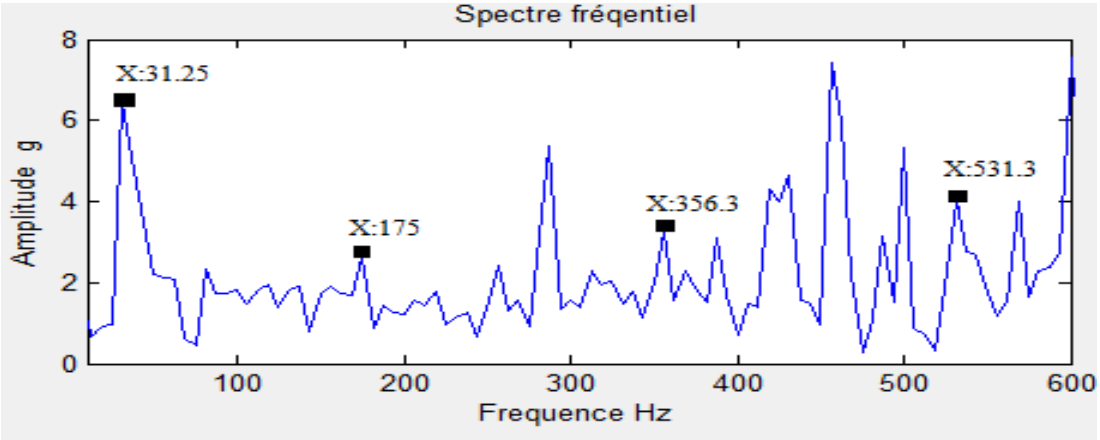


Figure 3.42 Spectre du signalfiltré, bande [15000 15000] Hz, filtreFIR

Cas 14 : Signal filtré, gamme de fréquences [1500020000] Hz,Filtre butter Worth

Les figures 3.43 et 3.44 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [15000 20000] avec le filtre **butter Worth**. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

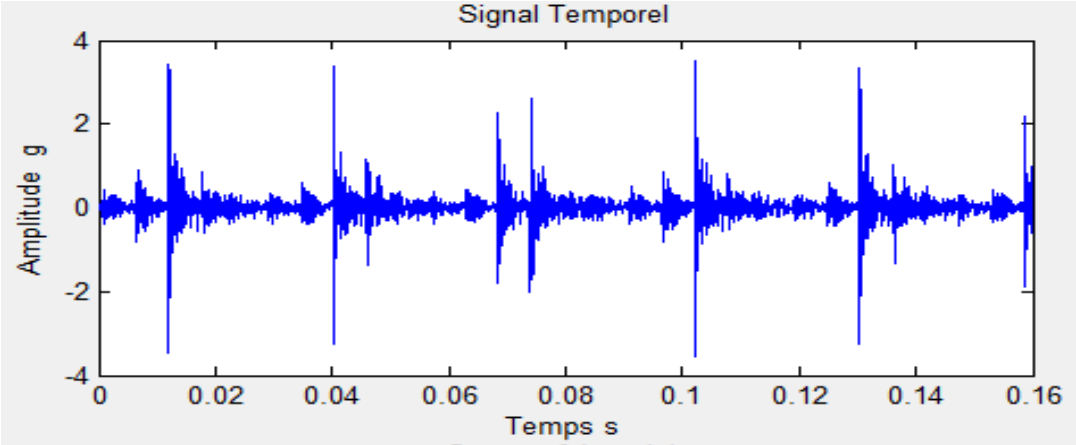


Figure 3.43 Le signal filtrée, bande [15000 20000] Hz, filtrebutter Worth

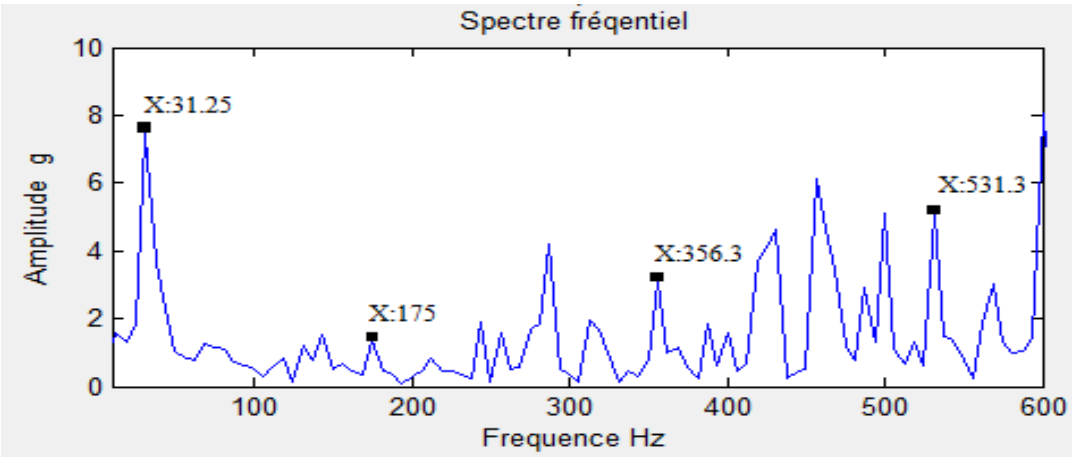


Figure 3.44 Spectre du signalfiltré, bande [15000 20000] Hz, filtre butterWorth

Cas 15 : Signal filtré, gamme de fréquences [1500020000] Hz,Filtre chepycheff

Les figures 3.45 et 3.46 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [15000 20000] avec le filtre **chepycheff**. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

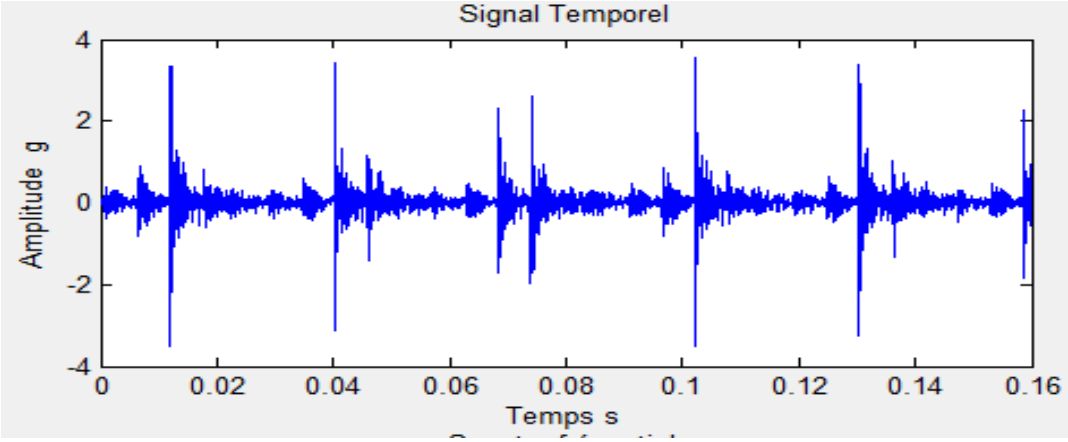


Figure 3.45 Le signal filtrée, bande [15000 20000] Hz, filtre chepycheff

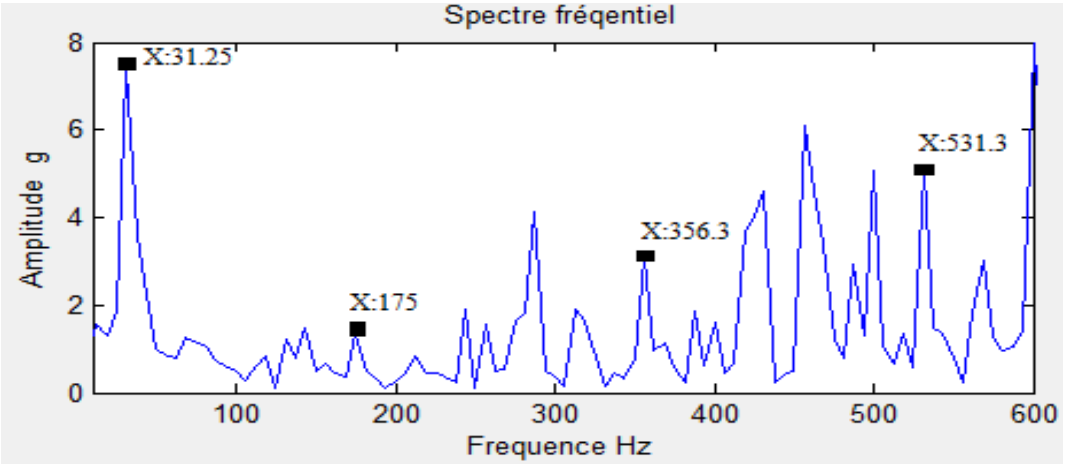


Figure 3.46 Spectre du signalfiltré,bande [15000 20000] Hz, filtre chepycheff

Cas 16 : Signal filtré, gamme de fréquences [1500020000] Hz,Filtre elliptique

Les figures 3.47 et 3.48 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [15000 20000] avec le filtre **elliptique**. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

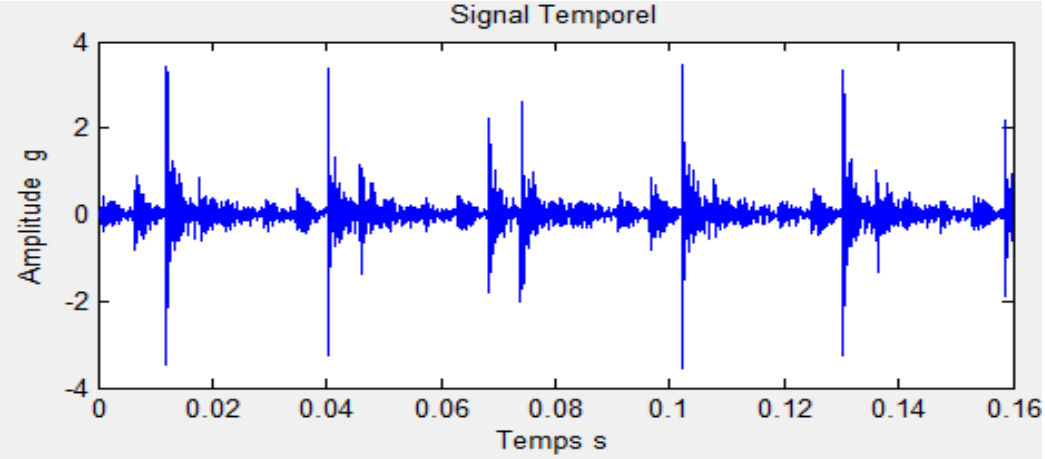


Figure 3.47 Le signal filtrée, bande [15000 20000] Hz, filtre elliptique

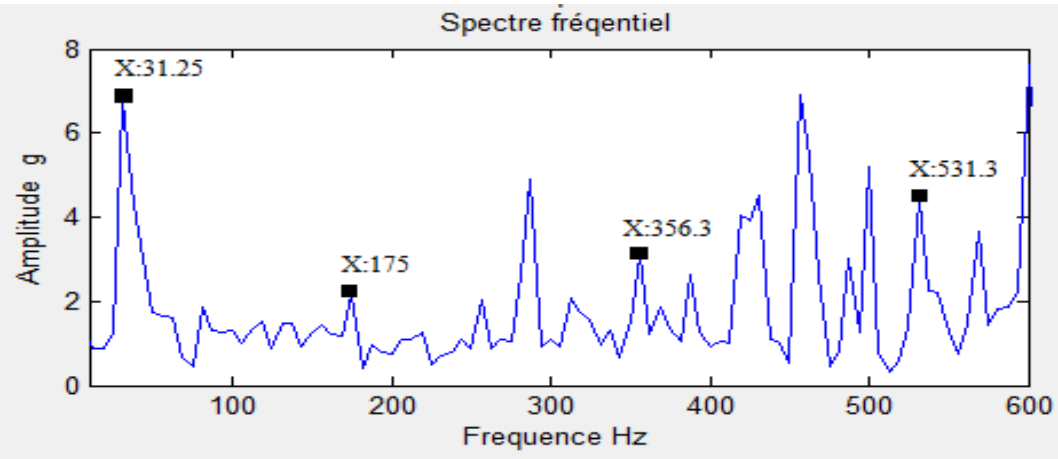


Figure 3.48 Spectre du signalfiltré,bande [15000 20000] Hz, filtre elliptique

Cas 17 : Signal filtré, gamme de fréquences [1500020000] Hz,Filtre FIR

Les figures 3.49 et 3.50 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [15000 20000] avec le filtre **FIR**. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

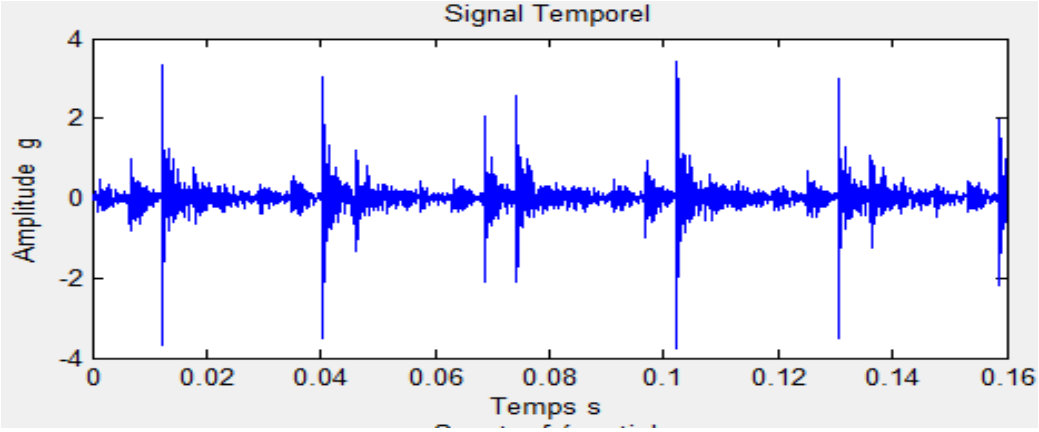


Figure 3.49 Le signal filtrée, bande [15000 20000] Hz, filtre FIR

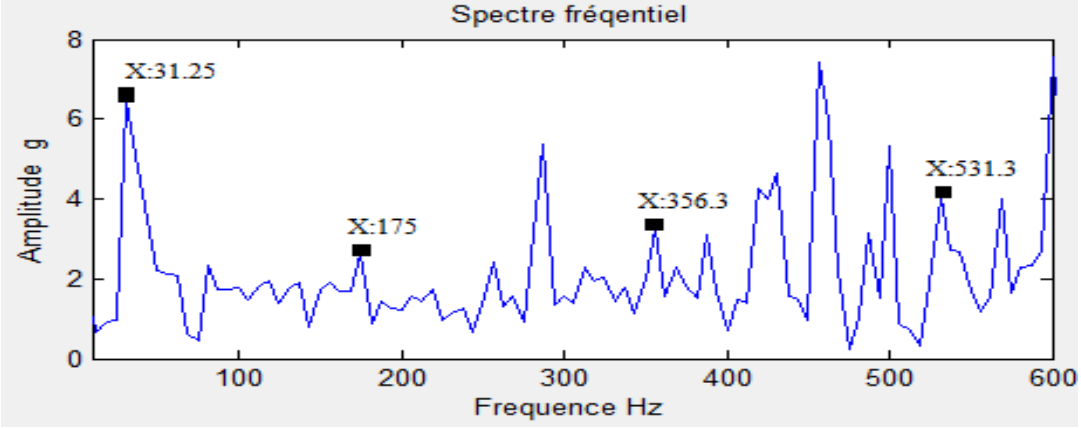


Figure 3.50 Spectre du signalfiltré,bande [15000 20000] Hz, filtre FIR

Cas 18 : Signal filtré, gamme de fréquences [750012500] Hz,Filtre butter Worth

Les figures 3.51 et 3.52 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [7500 12500] avec le filtre **butter Worth**. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

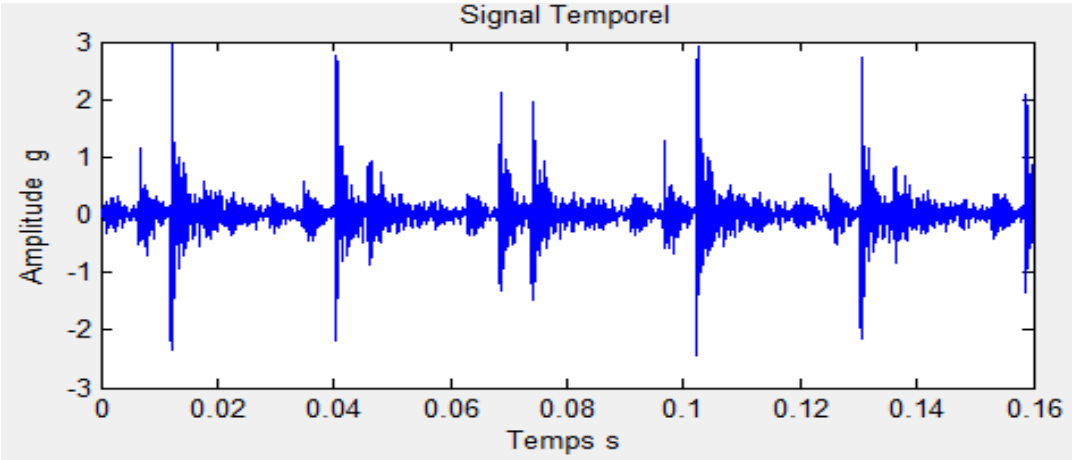


Figure 3.51 Le signal filtrée, bande [7500 12500] Hz, filtre butter Worth

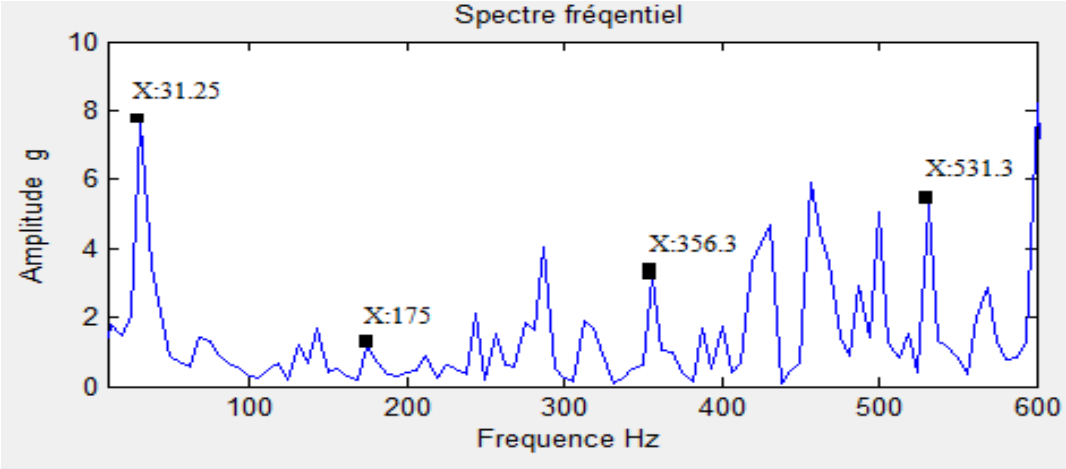


Figure 3.52 Spectre du signalfiltré,bande [7500 12500] Hz, filtre butter Worth

Cas 19 : Signal filtré, gamme de fréquences [750012500] Hz,Filtre chepycheff

Les figures 3.53 et 3.54 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [7500 12500] avec le filtre **chepycheff**. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

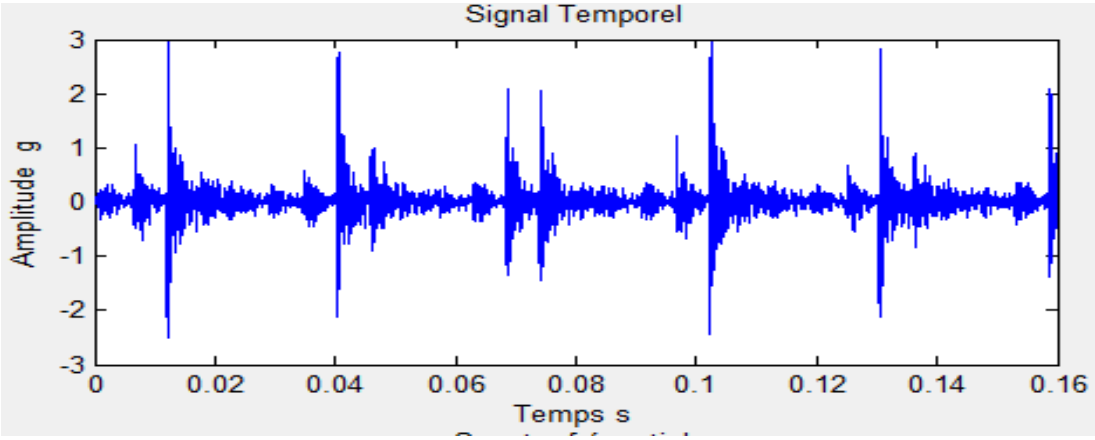


Figure 3.53 Le signal filtrée, bande [7500 12500] Hz, filtre chepycheff

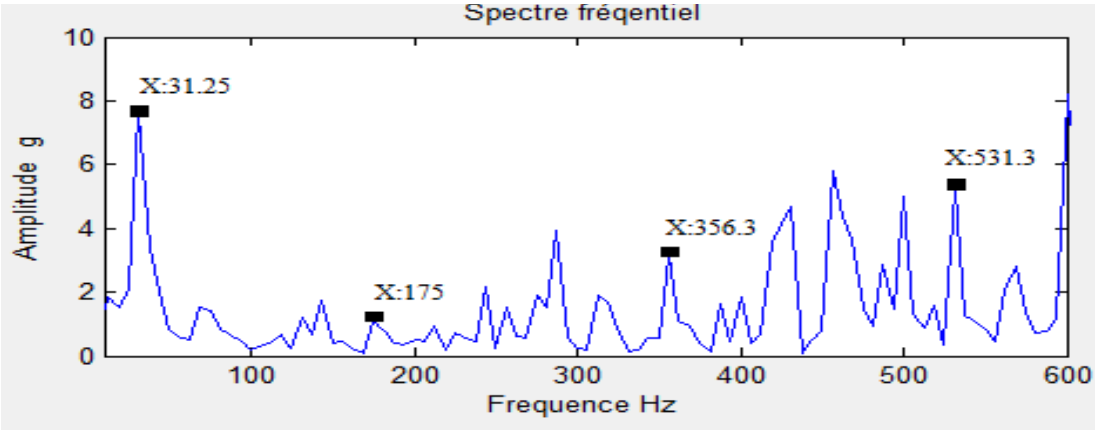


Figure 3.54 Spectre du signalfiltré,bande [7500 12500] Hz, filtre chepycheff

Cas 20 : Signal filtré, gamme de fréquences [750012500] Hz,Filtre elliptique

Les figures 3.55 et 3.56 représentent respectivement le signal temporel filtré et son spectre fréquentiel. On a utilisé un filtrage passe-bande autour de la bande [7500 12500] avec le filtre **elliptique**. D'après ces figures, on constate que ce cas est identique au cas 6. Ceci signifie que ce filtrage a bien identifié le défaut d'écaillage sur la bague intérieure.

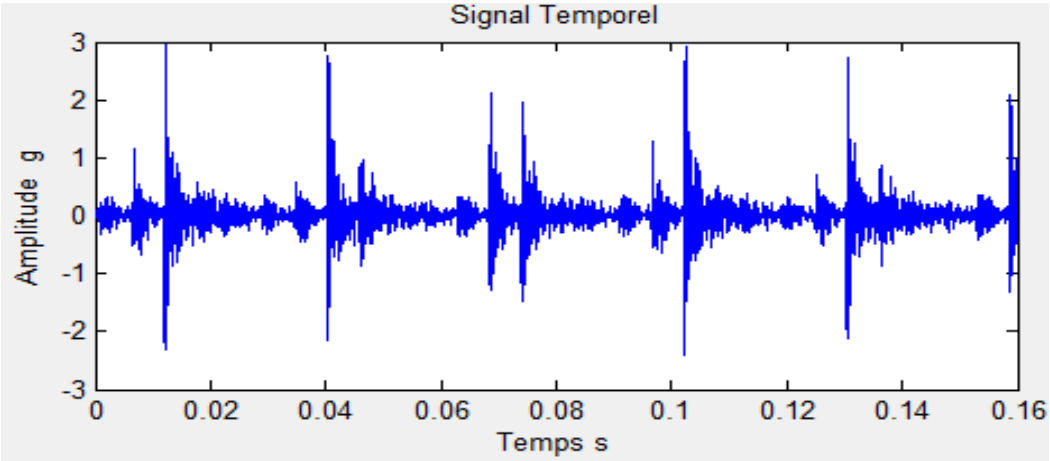


Figure 3.55 Le signal filtrée, bande [7500 12500] Hz, filtreelliptique

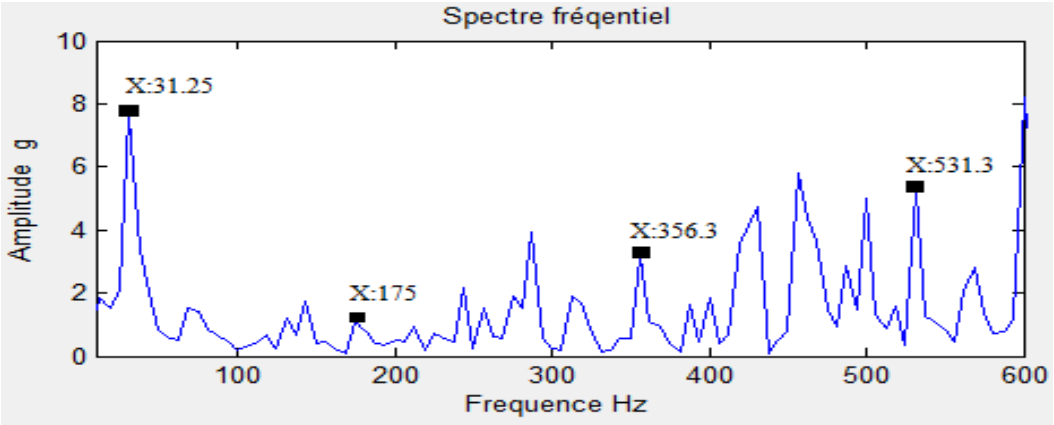


Figure 3.56 Spectre du signalfiltré bande [7500 12500] Hz, filtreelliptique

3.10 Conclusion

Le développement de l'interface graphique nous a simplifié l'analyse du signal vibratoire brut par différentes méthodes de filtrage. Les spectres du signal filtré dans les bandes [5000 10000], [10000 15000] , [15000 20000] et [7500 12500] ont montré l'apparition d'une série de pics à la fréquence de rotation et à la fréquence caractéristique (fondamental et ces harmoniques) du défaut de roulement, ceci signifie que les différents filtrage ont aidé à bien identifier le défaut d'écaillage sur la bague intérieure. Parcontre, le spectre fréquentiel issu du filtrage dans la bande [0 5000] Hz n'a pas indiqué des pics aux fréquences du défaut.

Conclusion générale

Les machines tournantes en fonctionnement produisent des vibrations et leur dysfonctionnement se traduit souvent par la dégradation de ses composants. L'analyse des vibrations permet d'obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine.

Dans cette étude, nous avons concentré sur le filtrage des signaux vibratoires. Deux méthodes de filtrage ont été utilisées : IIR et FIR. Afin de simplifier et accélérer l'analyse des signaux, une interface graphique a été développée. Dans cette dernière, les outils intégrés sont :

- Calcul des indicateurs de vibration à partir du signal temporel,
- Calcul des spectres fréquentiels,
- Calcul des fréquences caractéristiques des défauts de roulement,
- Calcul des signaux filtrés par différentes méthodes.

L'utilisation de cette interface avec un signal réel prélevé par des accéléromètre fixé sur un palierd'un banc d'essai, a permis de localiser le défaut sur la bague intérieure du roulement.

Les spectres des signaux filtrés dans les bandes [5000 10000], [10000 15000], [15000 20000] et [7500 12500] ont montré l'apparition d'une série de pics à la fréquence de rotation et à la fréquence caractéristique (fondamental et ses harmoniques) du défaut de roulement, ceci signifie que les différents filtrages ont aidé à bien identifier le défaut d'écaillage sur la bague intérieure. Par contre, le spectre fréquentiel issu du filtrage dans la bande [0 5000] Hz n'a pas indiqué des pics aux fréquences du défaut. En plus, le pic à la fréquence fondamentale du défaut dans les spectres des signaux filtrés sont plus claires par rapport à celui du spectre du signal brut. Ces résultats indiquentl'importance du choix de la bande de fréquence et du filtrage dans l'analyse des signaux vibratoires.

.

[1] MARTIN J.N. Signaux et système, débuter en traitement du signal Application au filtrage et au traitement des sons cours et exercices résolus, éd., Elipses Marketing, Paris,(2005).

[2] KPALMA K et HAESE-COAT V. Traitement numérique du signal, éd. Ellipses Marketing. Paris.(2003).

[3] Www.ferdinandpiette.com. Vu le mai 2017

[4] Étienne Tisserand, Jean-François Pautex, Patrick Schweitzer," Analyse et traitement des signaux ", dunod, 2008

[5] Alain Boulenger, Christian Pachaud, " Aide- mémoire surveillance des machines par analyse des vibrations", dunod, 2009.

[6]Boulenger, Alain et Pachaud, Christian. Analyse vibratoire enmaintenance - surveillance et diagnostic des machines. Dunod,2003

[7] Guy Marie RAKOTO RAZAFINDRAZATO, « méthodes numériques pour la caractérisationvibratoire de structures complexes, Thèse de Doctorat,Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo – MADAGASCAR, Paris, Septembre 2010

[8] SKF, Les outils de la maintenance, 1998

[9] QUERTIER-DAGORN.B. (2004). Système de Filtrage Numérique pour le Corrélateur de l'interféromètre ALMA. Thèse de Doctorat. Université Bordeaux I. Paris.

[10] DUMARTIN T. (2005). Rappels traitement du signal, Note de cours. Licence Professionnel Optronique.

[11] Gaberson, H.A. ***A*** compréhensive Windows tutorial. Journal of Sound and Vibration 2006, 40 (3) pp 14-23

[12] Boulenger Alain et Pachaud Christian. Surveillance des machines par analyse des vibrations - du dépistage au diagnostic. AFNOR, 1995

[13]M.SidAhmed – Simulation numérique du comportement dynamique d'une transmission par engrenage en présence de défauts de denture – 2006, Mécaniques § Industries 6, p625-633

[14] Ph. Estocsq**,** une approche méthodologique numérique et expérimentale d'aide à la détection et au suivi vibratoire de défauts d'écaillage de roulement à billes – Thèse doctorat, Université de Reims champagne Ardenne, 2004. P7-9

[15] Projet MQTM, Fiabilité- qualité : La maintenance systématique.

[16] D. AUGEIX, “Analyse vibratoire des machines tournantes”, Techniques de l’Ingénieur, traité Génie mécanique, BM 5- 145, pp. 1-22, 2002.

[17]R. Chaib, “ Contribution a l’optimisation de la maintenance conditionnelle par l’analyse vibratoire”, Thèse de Doctorat, Université Mentouri De Constantine, Algérie, 2010.

[18] I. Toufik, “ Extraction d’indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques :Comparaison de L’EMD et des ondelettes (WT)”, Thèse de Magister, Université FerhatAbbas - Sétif, Algérie, 2013.19

[19] J. Morel, “ Vibrations des machines et diagnostic de leur étatmécanique ”, Edition Eyrolles (Paris) 1992.

[20] G. Zwingelstein, “ Diagnostic des défaillances. Théorie et pratique pour les systèmes industriels ”, Traite des Nouvelles Technologies - Série Diagnostic et Maintenance. Editions Hermès, Paris 1995.

[21] H .Bendjama, “ Contribution a la détection et au diagnostic des défauts Application auxsystèmes dynamiques et aux matériaux ”, Thèse de Doctorat, Ecole national polytechniqueUSTHB, Algérie, 2012.

[22] Z. Ghemari, “ Modélisation, simulation et analyse expérimentale du capteur de vibration(accéléromètre)”, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2013.

[23] F. Landolsi , “ Cours De Techniques De Surveillance”,2010.

[24] Z. Ghemari, “ Modélisation Et Simulation D’un Capteur De Vibration (Accéléromètre)”,Thèse de Magister, Université BadjiMokhtar , Annaba, Algérie, 2006.

[25] T. Bensana, “ Diagnostic des défaillances base sur l’analyse vibratoire d’une turbine avapeur.”, These de Magister, universitéBadji Mokhtar -Annaba, Algérie, 2008.

[26] PoizatFramatone Ph., "Diagnostic, le facteur défaut pour la surveillance des roulements", Maintenance & entreprise, N° 458, janv.- fév. (1993).

[27]Arques P., "Diagnostic prédictif de l’état des machines", Masson (1996).

[28] H. Cherif, “ Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone enutilisant l’analyse par FFT et ondelettes”, Thèse de Magister, Mohamed Khider-Biskra,Algérie, 2014.

[29] www.mathworks.com / vu le juin 2017

[30] CHAIR Youcef, TRIFI Mohamed "Conception et développement d'une interface graphique pour l'analyse des signaux vibratoires, Thèse de Magister, université Yahia Fares Médéa 2016.

[31] Arques P., « Diagnostic prédictif de l'état des machines ». Éditons Masson, 1996.