

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université M'hamed BOUGARA Boumerdes



Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département : Maintenance industrielle
Option : Génie électrique
Spécialité : Signal et communication

Mémoire de Master

Thème:

DETECTION ET CARACTERISATION DES DEFAUTS DES ROULEMENTS PAR L'ANALYSE SPECTRALE

Présenté par :

- CHAIB Sid ali
- BOUSSAIDI Azeddine

Promoteur : D^r RAHMOUNE Chemseddine

co-promoteur : RATNI Azeddine

dédicaces

je dédie ce mémoire à

Mes chers parents, que mille dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement contenu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices.

Mes chers frères Amine, Majid et Amina pour leur grand amour et leur soutien qu'ils trouvent ici l'expression de ma haut gratitude.

Mes chers amis Walid , Bob , Fatma, Biba, Hanane, Billel,Boualem, NadirFyçel et Meriéme qui sans leur encouragement ce travail ne aura Jamais vu le jour.

Et à toute ma famille et à ceux que j'aime

Sid alichaib

REMERCIEMENT

Ce travail a été réalisé à la faculté de science de l'ingénieur, université M'HAMED BOUGERA -BOUMERDES, département de maintenance industrielle.

*Nous remercions tout d'abord « **allah** » qui m'a donné la force et le courage pour terminer ce travail. Nous tenons de remercier aussi nos parents et toute la famille qui nous ont beaucoup aidé dans notre carrière scolaire.*

Nous remercions plus particulièrement mon promoteur D' RAHMOUNE Chemeddine professeur à l'université de BOUMERDES pour tous ses efforts et ses conseils qui nous a donné et pour sa confiance qui nous a fait.

Nous tenons de remercier aussi mes collègues de groupe signal et communication promotion 2015/2016, sans oublier tous nos amis avec qui j'ai passé des bons et agréables moments : Billel, Nadir Bou3lem, Yacine, Djamel, Fares, Fayçal et tous les gens qui j'ai connu à l'université pendant cinq années que ce soit des professeurs, des agents de sécurité...

Liste des tableaux

TAB (III-1) : la géométrie du roulement (en mm).....	(39)
TAB (III-2) : fréquences de défaut (multiple la fréquence de l'axe en Hz.....)	(39)
TAB (III-3) : fréquences caractéristiques des éléments défaillants de roulement.....	(41)
TAB (III-4): évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défautde la bague externe.....	(43)
TAB (III-5) : évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.....	(45)
TAB (III-6) : évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bille.....	(48)

LISTE DES FIGURES

Figure (I-1) : Différentes composantes d'un roulement à bille.....	(6)
Figure (I-2) : une variété de roulements.....	(8)
Figure(I-3) :différentes type de défaillances des roulements.....	(10)
Figure (I-4) : géométrie et dimensions d'un roulement.....	(11)
Figure (II-1) : les différentes étapes de processus de diagnostic.....	(18)
Figure (II-2) : principe de surveillance avec modèle.....	(21)
Figure (II-3) : principe de la surveillance par estimation paramétrique.....	(21)
Figure (II-4) : principe de la surveillance par observateurs.....	(22)
Figure (II-5) : a) Signal chirp, b) Sa représentation temps fréquence.....	(27)
Figure (III-1) : les différents types des signaux vibratoires	(31)
Figure (III-2) : schéma bloc de la chaine d'acquisition et de traitement de signal.....	(32)
Figure (III-3):l'échantillonnage d'un signal $s(t)$	(33)
Figure (III-4) : exemple d'un échantillonnage parfait.....	(34)
Figure(III-5) : exemple d'un mauvais echantillonnage (recouvrement).....	(34)
Figure (III-6) : signal temporel et sa représentation fréquentiel.....	(35)
Figure(III-7) :filtre passe bas.....	(36)
Figure (III-8) : a)spectre en mode sain, b) spectre en mode défaillant.....	(36)
Figure (III-9) : le banc d'essai Américain (Data bearing center).....	(38)
Figure (III-10) : signal temporel de roulement à l'état sain.....	(40)
Figure (III-11) : spectre de roulementà l'état sain.....	(40)
Figure (III-12) : spectre de roulement à l'état sain avec les fréquences caractéristiques des défauts de roulement.....	(41)
Figure (III-13) : spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égale à 0.01778 (mm).....	(42)
Figure (III-14) : spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.0356 (mm).....	(42)
Figure (III-15) : spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.03556 (mm).....	(43)

Figure (III-16) : l'évolution des amplitudes fonction de diamètre de défaut.....	(43)
Figure (III-17) : spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.01778 (mm).....	(44)
Figure (III-18) : spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.0356 (mm).....	(44)
Figure (III-19) : spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.05334 (mm).....	(45)
Figure (III-20) : spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.07112 (mm).....	(45)
Figure (III-21) : l'évolution de l'amplitude des raies en fonction de diamètre de défaut.....	(46)
Figure (III-22) : spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.01778 (mm).....	(46)
Figure(III-23) : spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.0356 (mm).....	(47)
Figure (III-24) : spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.05334 (mm).....	(47)
Figure (III-25) : spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.07112 (mm).....	(47)
Figure (III-26) : l'évolution de l'amplitude des raies en fonction de diamètre de défaut.....	(48)

Résumé

La maintenance des machines tournantes par l'analyse des vibrations a considérablement évolué ces dernières années grâce aux techniques avancées de traitement du signal. Ces techniques permettent maintenant de détecter à un stade précoce l'existence d'un défaut, d'identifier sa nature, de déterminer sa gravité et de suivre son évolution. Ce travail s'inscrit dans la thématique de la surveillance et diagnostic des défauts mécaniques et plus particulièrement des défauts de roulements.

L'étude que nous allons faire se base sur l'application d'une technique de traitement de signal qui est une solution efficace pour le diagnostic des défauts de roulements, cette méthode est l'analyse spectrale, qui s'appuie sur la FFT (Fast Fourier transformer).

Mots clés : analyse spectrale, roulement, diagnostic, transformé de Fourier, spectre, défaut.

Abstract

Maintenance of rotating machines by vibration analysis has evolved considerably in recent years thanks to advanced signal processing techniques. These techniques now used to detect at an early stage there is a fault, identify its nature, determine its severity and monitor its evolution. This work is part of the theme of monitoring and diagnostics of mechanical defects and particularly bearing defects.

The study we're going to do is based on the application of a signal processing technique is an effective solution for the diagnosis of bearing fault, this method is spectral analysis, which is based on the FFT (Fast Fourier transform).

Keywords: analysisspectrum, bearing, diagnostic, Fourier transforms, defects.

SOMMAIRE

REMERCEMENTS

DEDICACES

RESUME

ABSTRACT

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE I : ETUDE THEORIQUE SUR LES ROULEMENTS

1. Introduction	5
2.Géométrie et constitution d'un roulement.....	5
3. Différents types des roulements.....	6
4.Les facteurs essentiels pour le choix de type de roulement.....	8
5. Défauts des roulements.....	9
5.1 Causes principales des défauts.....	9
5.2 Principales défauts	9
6.Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement.....	10
6.1 Défaut sur la bague intérieur.....	11
6.2 Défaut sur la bague extérieure.....	12
6.3 Défaut sur la cage.....	12
6.4 Défaut sur l'élément roulant.....	12
7.Conclusion	13

CHAPITRE II : ETAT DE L'ART SUR LES METHODES DE DIAGNOSTIC PAR TRAITEMENT DE SIGNAL

1. Introduction	15
2.Définitions relatives au diagnostic.....	15
2.1 Le diagnostic.....	15
2.2 La détection.....	16
2.3 Le défaut.....	16
2.4 Le défaillance.....	16
2.5 La dégradation.....	17

2.6 La panne.....	17
3. Les différentes étapes de diagnostic.....	17
3.1 Etape d'acquisition de données.....	18
3.2 Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts.....	18
3.3 Etape de d'élaboration d'indicateurs de défauts.....	18
3.4 Etape de localisation.....	19
3.5 Etape de prise de décision.....	19
4. Techniques et méthodes de diagnostic.....	19
4.1 Classification des méthodes de diagnostic.....	19
4.1.1 Méthodes de diagnostic avec modèles.....	20
4.1.1.1 Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle.....	20
4.1.1.2 Les méthodes de diagnostic par modélisation physique.....	20
4.1.2 Méthodes de diagnostic sans modèles.....	22
4.1.2.1 La reconnaissance des formes.....	22
4.1.2.2 Les systèmes experts.....	24
4.1.2.3 Les méthodes par approche signal.....	24
4.2 Quelques techniques de diagnostic par approche signal.....	25
4.2.1 Analyse temporelle.....	25
4.2.2 Analyse fréquentielle.....	25
4.2.3 Analyse cepstrale.....	26
4.2.4 Analyse temps – fréquence.....	26
5. Conclusion.....	28

CHAPITRE III : DETECTION ET CARACTERISATION DE DES DEFAUTS DE ROULEMENTS PAR L'ANALYSE SPECTRALE

1. Introduction.....	30
2. Définitions.....	30
2.1 Signal vibratoire.....	30
2.2 Le traitement de signal.....	31
2.3 Types des signaux.....	31

2.3.1 Déterministe.....	31
2.3.2 Aléatoire.....	32
2.4 Chaîne d'acquisition d'un signal.....	32
2.5 Echantillonnage.....	32
2.5.1 Définition.....	32
2.5.2 Théorème Shannon.....	33
3. L'analyse spectrale.....	34
3.1 La transformée de Fourier discrète et rapide.....	34
3.2 Transformée de Fourier à fenêtre glissante.....	35
3.3 Filtre anti-repliement.....	35
3.4 Principe de détection des défauts par l'analyse spectrale.....	36
4. L'application de la méthode de l'analyse spectrale pour la détection des défauts des roulements	38
4.1 Description de l'expérience.....	38
4.2 Géométrie et caractéristiques du roulement à étudier.....	39
4.3 Caractérisation des signatures spectrales des défauts des roulements.....	39
4.3.1 Caractérisation des signatures spectrales à l'état sain.....	39
4.3.2 Caractérisation des signatures spectrales à l'état défaillant.....	40
4.3.2.1 signatures spectrales de défaut de la bague externe.....	42
4.3.2.2 signatures spectrales de défaut de la bague interne.....	44
4.3.2.1 signatures spectrales de défaut de la bille.....	46
5. Conclusion.....	49
CONCLUSION GENERALE.....	50
BIBLIOGRAPHIE	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'activité de maintenance des installations industrielles fait appel depuis une vingtained'années à des techniques de diagnostic de plus en plus sophistiquées. Plusieurs techniques dedétection de défauts sont aujourd'hui à la disposition des ingénieurs de maintenance .parmicelles-ci on peut citer la thermographie infrarouge, pour la détection de défauts d'origineélectrique ou mécanique, l'analyse des huiles pour le suivi de dégradation et la contaminationdes fluides hydrauliques ainsi que l'évaluation du stade d'usure des pièces mécanique, ladétection ultrasonore et l'analyse des vibrations mécaniques.

Parmi les outils de la maintenance conditionnelle, l'analyse des vibrations est celui qui connaît aujourd'hui un des développements les plus importants du fait de l'évolution des techniques dans les domaines de l'informatique et du traitement du signal. La finalité de ce type de surveillance est destinée à assurer la sécurité de l'installation en évitant des dégradations importantes par le déclenchement d'alarmes, lorsque le niveau des vibrations atteint des valeurs jugées excessives pour le bon fonctionnement ou l'intégrité de cette dernière. Il existe différentes techniques d'investigations utilisées dans le domaine du suivi vibratoire des machines tournantes.

L'analyse vibratoire est couramment utilisée pour le diagnostic des machinestournantes et fait appel à des outils de traitement du signal qui ont vu leur champd'application s'élargir d'année en année. Il existe plusieurs techniques pour mettre enœuvre les outils classiques de traitement du signal, tels que la transformée de Fourier (pour letracé et l'analyse du spectre), la transformation de Hilbert [1], (pour la recherche demodulations d'amplitude et/ou de fréquence utilisé souvent pour la détermination du BCU), ainsi que le calcul d'indicateurs scalaires tels que la valeur efficace, le facteur décrète etkurtosis.

L'un des problèmes les plus importants parmi ceux que pose la maintenance par analysevibratoire est celui du diagnostic des roulements (les pièces les plus sensibles dans unemachine tournante). On retrouve ces composants mécaniques dans de nombreuses machinestournantes comptes tenus de leur simplicité et leur capacité à éviter les frottements mécaniques.La détection de pannes de ces roulements se fait en analysant les vibrations enregistrées avecdes accéléromètres mis en place pour le diagnostic.

Ce travail a pour but d'appliquer le traitement de signal dans la maintenance industrielle, en faisant un diagnostic pour la détection et la caractérisation des défauts qui peuvent affecter les différents éléments de roulements par la méthode d'analyse spectrale. Ce mémoire est organisé en trois chapitres répartis comme suit :

Le 1^{ier} chapitre on décrira les constituants principaux d'un roulement, on détaillera ses modes de défaillance et les fréquences caractéristiques des défauts, et on le finira par une conclusion.

Dans le 2^{ième} chapitre nous présenterons l'état de l'art sur le diagnostic industriel et les différentes méthodes utilisées pour la détection des défauts qui existent couramment dans l'industrie.

Dans le 3^{ième} chapitre nous allons choisir une parmi les méthodes d'analyse par traitement de signal les plus utilisée pour le diagnostic et la détection des défauts, cette méthode est celle de l'analyse spectrale, dans cette partie nous étudierons quelques signaux des roulements à l'état défaillant et on les compare avec celui de l'état sain afin de détecter et identifier les défauts liés aux roulements et suivre l'évolution de ce derniers. Il est à noter que les signaux des roulements qu'on va utiliser ont été pris du banc d'essai Américain (Data bearing center).

Ce mémoire a pour but d'appliquer le traitement de signal dans la maintenance industrielle, en faisant un diagnostic pour la détection et la caractérisation des défauts qui peuvent affecter les différents éléments de roulements par la méthode d'analyse spectrale.

**CHAPITRE I :
ETUDE THEORIQUE SUR LES
ROULEMENTS**

I. Introduction

Les roulements sont plus récents par rapport aux paliers lisses, l'apparition des roulements a été conditionnée par le remplacement du frottement de glissement par celui de roulement. Ils sont largement utilisés dans le domaine de la construction mécanique, en particulier dans le domaine des machines tournantes. L'utilisation aussi de ce produit dans le domaine de l'automobile a donné l'occasion de perfectionnement de la méthode de fabrication, ainsi que l'amélioration de sa qualité.

On appelle roulement, une pièce mécanique composée de plusieurs éléments entre deux organes, un mobile et l'autre immobile, le roulement est destiné à remplacer un glissement par roulement afin de réduire le frottement, il est défini par deux critères qui sont : le type et les dimensions.

Le roulement est un organe mécanique, sa fonction est de permettre la transmission des charges (efforts) entre deux pièces en rotation relative l'une par rapport à l'autre avec un frottement très réduit. Il supporte et assure le guidage d'une charge tournante.

Dans ce chapitre, on va détailler la géométrie et la constitution du roulement, les critères du choix des roulements, les défauts principaux qui peuvent affecter un roulement et finalement les fréquences caractéristiques des défauts.

II. Géométrie et constitution d'un roulement

La performance des roulements est directement liée à la qualité du matériau utilisé en particulier sa propreté (qualité). En effet les concentrations de contraintes liées à la géométrie du contact sont considérablement amplifiées par la présence de défauts de type inclusions non métalliques dans la zone mécaniquement sollicitée (zone de charge).

Le roulement sans glissement des éléments roulants sur les chemins (pistes) assure la transmission de la charge (l'énergie) d'une bague à une autre. Afin d'assurer un roulement parfait[2], il faut que les éléments roulants soient complètement séparés par un cage.

De manière générale, les roulements sont constitués de quatre composants essentiels[3]:

- 1-La bague extérieure.
- 2-La bague intérieure.
- 3- La cage.
- 4- Les éléments roulants.



Figure (I-1) : Différentes composantes d'un roulement [4].

1/ La bague extérieure : C'est l'élément qui limite les dimensions extérieures du roulement. Elle sera montée dans un logement fixe (bague extérieure fixe) ou dans un moyeu tournant (Bague extérieure tournante).

2/ La bague intérieure : Elle est montée sur un arbre fixe ou mobile. C'est-à-dire, elle est fixe si la bague extérieure est mobile, et le contraire.

3/ La cage : elle a pour rôle de maintenir le même écartement entre les éléments roulants, à fin de préserver la même zone de charge du roulement, elle ne supporte aucune charge.

4/ Les éléments roulants : Ils s'agissent des billes, rouleaux et des aiguilles. Ce sont les éléments des roulements qui assurent la transmission de la charge entre les deux bagues du roulement, ils sont responsables de la rotation relative d'une bague par rapport à l'autre.

III. Différents types des roulements

Quel que soit la taille, la qualité et la matière utilisée pour la fabrication du roulement, les roulements sont classés de plusieurs manières. En premier lieu, ils sont classés d'après la forme des éléments roulant utilisés (roulements à billes ou à rouleaux), et ce d'après l'importance de la charge appliquée au roulement (si la charge est importante, il faut choisir le roulement à rouleaux, ce type de roulement est très proche de celui à billes, la cage contenant des rouleaux au lieu de billes. Selon la forme des rouleaux il peut être possible de séparer les bagues. Le problème d'assemblage du roulement n'est alors plus le même.

Le roulement à rouleaux supporte un effort radial supérieur par rapport au roulement à billes, car le contact des éléments roulants avec les bagues est linéaire.

On utilise le roulement à rouleaux pour augmenter la surface de contact afin de minimiser les contraintes ou les pressions sur les pistes. En deuxième lieu, ils sont classés d'après la direction d'application de ces charges, à cet effet, il existe les roulements radiaux s'il s'agit d'une charge radiale et des roulements axiaux (butées) dans le cas d'une charge axiale importante.

- ✓ **Les roulements rigides à billes (à rouleaux cylindriques)** : ce sont les roulements les plus répandus, ils sont conçus pour des charges radiales, mais peuvent supporter une petite charge axiale. Les roulements à rouleaux peuvent supporter des charges plus élevées.
- ✓ **Les roulements à aiguilles** : ils possèdent une forme cylindrique, et sont suffisamment fin pour résoudre le problème où l'espace radial est fin.
- ✓ **Roulements à billes à contact oblique** : l'architecture de ces roulements les rend capable de supporter des charges axiales et radiales à la fois.
- ✓ **Roulements à rotules sur billes (de même sur rouleaux)** : Ce type de roulement est célèbre, inventé en 1907 par le fondateur de SKF Sven Wingquist, a permis de résoudre l'un des problèmes industriels les plus épineux de l'époque, celui des arrêts de production récurrents dus à des défaillances de roulements. Comme l'alignement des arbres n'était pas suffisamment précis pour permettre une utilisation normale des roulements rigides à billes, les pannes étaient fréquentes. Les roulements à rotule sur billes à deux rangées, qui tolèrent un défaut d'alignement pour une durée de service identique, ont permis de résoudre le problème[5].



Figure(I-2) : *Une variété de roulements*[6].

IV. Les facteurs essentiels pour le choix de type de roulement

Le choix du type et de la taille d'un roulement est basé sur les conditions de fonctionnement et les caractéristiques de construction à fin d'assurer un bon fonctionnement à des coûts réduits [7] [8].

Les facteurs qu'il faut tenir en considération pour réaliser un choix optimal de roulement sont les suivants :

- ❖ Savoir la nature, la direction ainsi que l'intensité de la charge que doit supporter le roulement.
- ❖ La vitesse de rotation du roulement.
- ❖ La durée de vie souhaitée (demandée).
- ❖ La température à laquelle le roulement va travailler.
- ❖ La précision de fonctionnement à fin de permettre fixé le jeu interne de chaque roulement.
- ❖ Il faut tenir en compte le mode de la lubrification, ainsi que le type du lubrifiant.
- ❖ La nature de la machine pour faire le choix du type de montage du roulement.
- ❖ La matière de l'arbre et du logement qui permette de calculer le jeu résiduel (fonctionnel) du roulement.
- ❖ L'encombrement (l'espace) réservé au roulement.

V. Défauts des roulements

V.1 Causes principales des défauts

Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme:

- contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable ...
- corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides.....
- lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement.
- mauvais alignement du rotor.
- courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques[9].

V.2 Principaux défauts

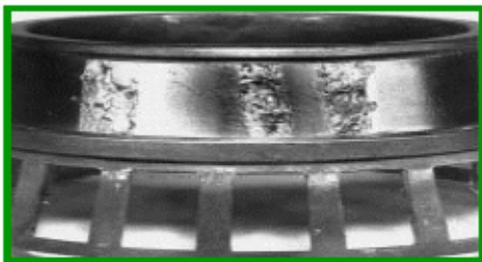
On peut noter deux types d'avaries caractéristiques de la détérioration des roulements : Les avaries dites naturelles dues à la fatigue des roulements et les avaries dues à un mauvais montage ou une mauvaise utilisation du roulement.

On qualifie les principaux défauts :

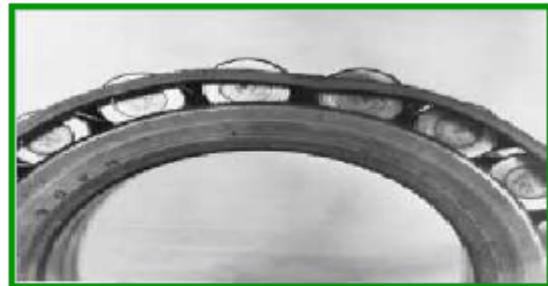
- Le grippage, dû à l'absence de lubrification, à une vitesse excessive ou un mauvais choix du type de roulement. Ceci se manifeste par un transfert de matière arrachée sur les surfaces et redéposée par microsoudure.
- Les empreintes par déformation, dues à des traces de coups, des fissures ou des cassures.
- L'incrustation de particules étrangères, due à un manque de propreté au montage ou de l'entrée accidentelle d'impuretés.
- La corrosion, due à un mauvais choix du lubrifiant, surtout quand les roulements viennent d'être nettoyés et sont contaminés par la transpiration des mains.
- La corrosion de contact, due au mauvais choix d'ajustements entre les bagues et les logements ou les arbres.
- Les criques, fissures étroites ou autres amorces de cassures dues aux contraintes exagérées au montage ou au démontage.
- L'usure par abrasion, due à une mauvaise lubrification. L'usure par abrasion donne aux roulements un aspect gris, givré.
- Le cas le plus rencontré est un défaut d'écaillage dû à la fatigue des roulements.

L'écaillage de fatigue, est un phénomène normal qui conduit à une défaillance et ce, quel que soit les conditions d'utilisation et de fonctionnement. Ce défaut survient sous l'effet de la fatigue due aux contraintes de cisaillement alternées qui sévissent en souscouche.

L'écaillage localisé et prématuré résulte d'anomalies caractérisées telles qu'un mauvais montage, une surcharge, un défaut d'alignement, une mauvaise forme de logement. Ces défauts donnent naissance à des vibrations qui les caractérisent. C'est pourquoi l'analyse vibratoire s'avère intéressante et s'est montrée très puissante d'une part pour surveiller l'état de fonctionnement et d'autre part pour diagnostiquer le défaut et suivre son évolution [10].



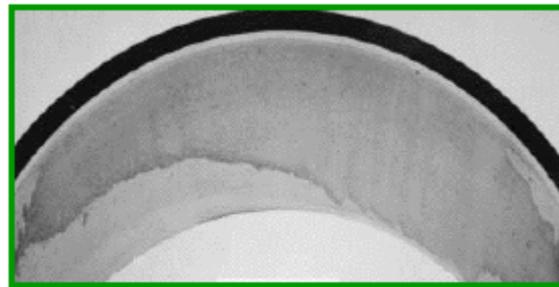
Ecaillage de fatigue



La détérioration des cages



Le grippage



La coloration

Figure (I-3) : différentes type de défaillances des roulements.

VI. Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement

Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage)...etc. 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.

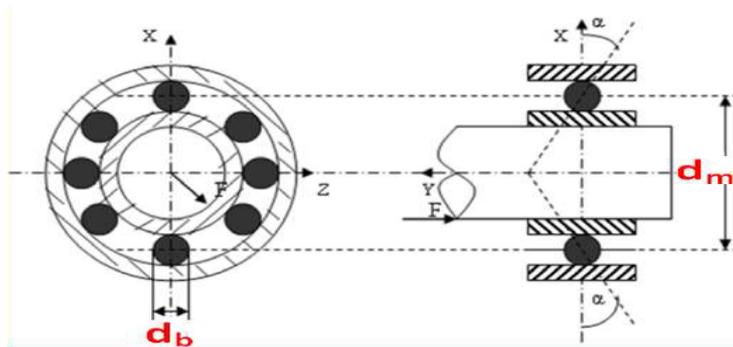


Figure (I-4) : géométrie et dimensions d'un roulement.

N Le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).

d_m Le diamètre primitif.

d_b Le diamètre des éléments roulants.

α Angle de contact.

Pour chaque type de roulement, et en fonction de ses cotes de fabrication, on peut considérer les fréquences caractéristiques données par les équations suivant :

VI.1 Fréquence de défaut sur la bague intérieure

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (Eq.1). Cette fréquence est modulée par sa fréquence de rotation de l'arbre (bandes latérales autour de la raie de défaut).

$$f_{bi} = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) (f_{rot} - f_{ext}) \right) \dots \dots \dots \text{Eq(I-1)}$$

Avec :

f_{bi} Fréquence de défaut de la bague intérieure.

f_{rot} Fréquence de rotation de la bague intérieure.

f_{ext} Fréquence de rotation de la bague extérieure.

N Le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).

d_m Le diamètre primitif.

d_b Le diamètre des éléments roulants.

α Angle de contact.

VI.2 Fréquence de défaut sur la bague extérieure

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (Eq.2). Bien que la charge appliquée sur la bague externe soit constante, on peut remarquer une modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre autour de la fréquence de défaut.

$$f_{be} = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) (f_{rot} - f_{ext}) \right) \dots\dots\dots \text{Eq(I-2)}$$

Avec :

f_{be} Fréquence de défaut de la bague extérieure.

VI.3 Fréquence de défaut sur la cage

La fréquence de passage d'un défaut de cage est donnée par l'équation (Eq.3) Ce défaut se manifeste par la présence de raies à la fréquence f_{ca} , et ses harmoniques.

$$f_{ca} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) \right) f_{rot} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) \right) f_{ext} \dots\dots\dots \text{Eq(I-3)}$$

Avec:

f_{ca} Fréquence de défaut de la cage.

VI.4 Fréquence de défaut sur l'élément roulant

La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau), sur la bague externe ou sur la première fréquence caractéristique de défaut correspond à la fréquence de rotation de l'élément roulant sur lui-même. De plus, cet élément roulant rencontre une fois la bague intérieure et une fois la bague extérieure par tour, il génère donc des chocs à 2 fois cette fréquence.

$$f_b = \frac{1}{2} \frac{d_m}{d_d} \left(1 - \left(\frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) \right)^2 \right) (f_{rot} - f_{ext}) \dots\dots\dots \text{Eq(I-4)}$$

Avec :

f_b Fréquence de défaut de la bille [11] [12] [13] [14].

VII. Conclusion

Dans ce chapitre Nous avons vu qu'il existe plusieurs types de roulements dans l'industrie, chaque type de roulements présente des caractéristiques qui dépendent de sa conception et qui la rendent plus ou moins adapté à une application donnée.

Ensuite, on a détaillé les différents défauts qui peuvent affecter les roulements, et on a mentionné les fréquences caractéristiques du chaque défaut.

Dans le chapitre suivant on verra l'état de l'art sur les méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts de roulements dans l'industrie, en se basant sur les méthodes par approche signal.

**CHAPITRE II :
ETAT DE L'ART SUR LES METHODES DE
DIAGNOSTIC INDUSTRIEL**

I. Introduction

Le diagnostic est une composante principale du module de supervision. Il consiste à déterminer chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve.

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'information prévenants d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

Le diagnostic de défaillance des systèmes industriels, s'il est réalisé avec efficacité ou s'il permet de détecter de façon précoce une dégradation, représente un des moyens pour contribuer à gagner des points de productivité, à cause de l'importance de diagnostic dans la maintenance corrective, de sa pertinence et de sa rapidité dépend l'efficacité de l'intervention au sein de l'entreprise. Pour cela, des recherches ont été effectuées autour du problème du diagnostic, que ce soit pour des systèmes dynamiques, des réseaux de distribution ou des réseaux de télécommunications

Dans ce chapitre nous présentons l'état de l'art sur les méthodes de diagnostic industriel, ou on va définir quelques concepts relatifs au diagnostic et à la défaillance industrielle, puis on cite les étapes essentielles de diagnostic et on finira par les méthodes utilisées dans le diagnostic industriel.

II. Définitions relatives au diagnostic

II.1 Diagnostic

De nombreuses définitions sont proposées pour le terme de diagnostic, celle du dictionnaire Robert est rigoureusement étymologique : « action de déterminer une maladie d'après ses symptômes ». L'origine de ce mot provient de deux mots grecs, « dia » qui signifie « par » et « gnossie » qui signifie « connaissance ».

Dans l'industrie, le diagnostic est défini par l'ensemble d'actions visant à évaluer un procédé (système) et identifier la cause probable des défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test de son fonctionnement.

Le diagnostic est en principe défini comme un processus à trois phases :

- détection du mode de fonctionnement.
- qualification du mode de fonctionnement.
- décision à partir de la reconnaissance du mode de fonctionnement.

La mission pour laquelle le système a été conçu, peut être totalement remplie, partiellement remplie ou non remplie, cela dépend du mode de fonctionnement.

Un système est dit diagnosticable s'il est susceptible d'être soumis à un diagnostic, il doit alors être muni d'organes d'observation (capteurs) et d'un système d'analyse pour étudier les informations fournies. La diagnosticabilité sera l'aptitude d'un système à être diagnostiqué[15].

Le diagnostic permet de déterminer le type, l'origine, l'endroit et l'instant de l'apparition de du défaut. L'opération de diagnostic incluse la localisation et l'identification d'un défaut.

Deux tâches essentielles en diagnostic :

- **la localisation** : permet de déterminer les ou les éléments défectueux.
- **l'identification** : estime les caractéristiques statiques et dynamiques de défaut : l'instant d'apparition de la panne, sa durée et son importance[16].

II.2 La détection

Pour détecter les défaillances d'un système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales.

Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à Considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale [17].

II.3 Défaut

Un défaut est une anomalie de fonctionnement d'un système physique. On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique.

Cet écart est idéalement nul en absence de défauts. Les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs ou au niveau du système lui-même.

II.4 Défaillance

Événement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement ses fonctions. Il est clair qu'une défaillance implique l'apparition d'un défaut puisqu'il existe un écart entre la caractéristique mesurée et la caractéristique théorique. Par

contre, un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance puisque le dispositif peut très bien continuer à assurer sa mission principale [15].

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonction requise avec les performances définies dans les spécifications techniques, on peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité par :

- **Défaillance absorbable** : pouvant être ignorée dans un premier temps.
- **Défaillance significative** : nécessite un processus de traitement.
- **Défaillance critique** : nécessite une intervention d'urgence.

II.5 Dégradation

Une dégradation représente une perte de performance d'une des fonctions assurées par un équipement, Si les performances sont au-dessous du seuil défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, Il n'y a plus dégradation mais défaillance [17].

II.6 Panne

C'est la conséquence d'une défaillance affectant le système, aboutissant à une interruption permanente de sa capacité à remplir une fonction requise et pouvant provoquer son arrêt complet .C'est la cause de l'apparition de symptômes.

Deux types de pannes peuvent être distingués :

- **Les pannes permanentes** : une fois la panne est produite, elle nécessite une action de réparation.
- **Les pannes intermittentes** : le système peut retrouver son fonctionnement normal après l'occurrence de la panne. Une panne intermittente est généralement le résultat d'une dégradation partielle et progressive d'un composant du système, pouvant aboutir à une panne permanente [16].

III. Les différentes étapes de diagnostic

Effectuer un diagnostic nécessite un certain nombre d'étapes qui s'enchaînent :

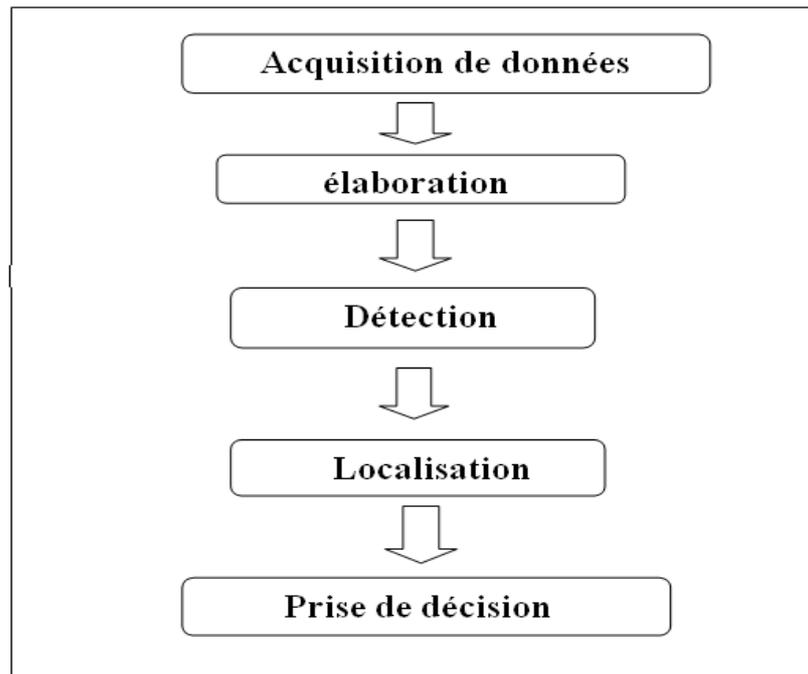


Figure (II-1) : les différentes étapes de processus de diagnostic.

III.1 Etape d'acquisition de données

La procédure de diagnostic nécessite une disponibilité d'informations sur le fonctionnement du système à surveiller. Ces informations sont recueillies lors d'une phase d'acquisition de données suivie d'une validation.

Cette étape implique l'utilisation de capteurs appropriés permettant de mesurer les différentes variables du processus.

III.2 Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts

A partir des mesures réalisées et des observations issues des opérateurs en charge de l'installation, il s'agit de construire des indicateurs permettant de mettre en évidence les éventuels défauts pouvant apparaître au sein du système. Dans le domaine du diagnostic, les indicateurs de défauts sont couramment dénommés les résidus ou symptômes.

III.3 Etape de détection

Cette étape doit permettre de décider si le système se trouve ou non dans un état de fonctionnement normal. Il ne suffit pas de tester la non nullité des résidus pour décider de l'apparition d'un défaut car, dans la pratique, les grandeurs mesurées sont toujours entachées de bruits et le système à surveiller est toujours soumis à des perturbations. Par conséquent,

cette étape fait le plus souvent appel aux tests statistiques ou, de manière plus simple, est réalisée à l'aide d'un seuillage.

III.4 Etape de localisation

Il s'agit à partir des résidus non nuls statistiquement, de localiser le défaut, c'est-à-dire de déterminer le ou les éléments défailants. La procédure de localisation nécessite l'utilisation d'un ensemble (ou vecteur) de résidus, qui doivent avoir des propriétés permettant de caractériser de manière unique chaque défaut. Pour ce faire, deux méthodes peuvent être utilisées :

- la construction de résidus structurés.
- la construction des résidus directionnels.

III.5 Etape de prise de décision

Il s'agit de décider de la marche à suivre afin de conserver les performances souhaitées, du système sous surveillance. Cette prise de décision doit permettre de générer, éventuellement sous le control d'un opérateur humain, les actions correctrices nécessaires à un retour à la normale du fonctionnement de l'installation.

En résumé, quelle que soit la méthode employée, la procédure de diagnostic comprend deux Principales étapes, une étape de génération de résidus et une étape d'évaluation des résidus [14].

IV. Techniques et méthodes de diagnostic

IV.1 Classification des méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic se distinguent selon différents critères :

- la dynamique du procédé (discret, continu ou hybride).
- la complexité du procédé, l'implémentation du diagnostic en ligne et/ou hors ligne.
- la nature de l'information (qualitative et/ou quantitative).
- la profondeur de l'information (structurelle, fonctionnelle et/ou temporelle), sa distribution (centralisée, décentralisée ou distribuée) [18].

L'existence d'un modèle formel ou mathématique de l'équipement détermine la méthode de surveillance utilisée. Le diagnostic avec modèle se compose essentiellement de deux techniques :

Technique basée sur une modélisation fonctionnelle et matérielle, et la technique basée sur une modélisation physique.

D'un autre côté, les méthodes qui ne se basent pas sur l'existence du modèle se divisent en trois catégories : méthodes utilisant des outils statistiques (méthodes de traitement de signal), et celles utilisant la reconnaissance des formes, et celles qui utilisent les systèmes experts.

IV.1.1 Méthodes de diagnostic avec modèles

Les méthodes de diagnostic avec modèle ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par le modèle. Tout écart est synonyme de défaillance. Ces méthodes peuvent être séparées en deux :

Méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle, Les méthodes de diagnostic par modélisation physique [19].

IV.1.1.1 Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle

Le principe de ces méthodes consiste à établir à priori et de la manière la plus complète possible, les liens entre les causes initiales des défaillances et leurs effets mesurables. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) et les ADD.

IV.1.1.2 Les méthodes de diagnostic par modélisation physique

Les méthodes de surveillance avec modèle physique ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par le modèle [20]. Tout écart est alors synonyme d'une défaillance. Les outils de la théorie de la décision sont ensuite utilisés pour déterminer si cet écart est dû à des aléas normaux, comme par exemple le bruit de mesure ou s'il traduit une défaillance du système.

Ces méthodes utilisent un modèle décrit par des relations mathématiques représentant les différentes relations physiques du procédé. Généralement, ces relations physiques découlent de l'application de lois fondamentales de divers domaines (physique, chimie, électricité, thermodynamique, mécanique, etc.). Ainsi, il est possible de créer une modélisation du système qui, en lui appliquant les entrées similaires au système réel (lois de commande, paramètres du procédé, etc.), fournit une réponse estimée du système. Il est alors possible de calculer l'écart entre la réponse réelle du système et sa réponse estimée, comme indiqué sur la Figure (II-2). Cet écart est usuellement appelé résidu (R).

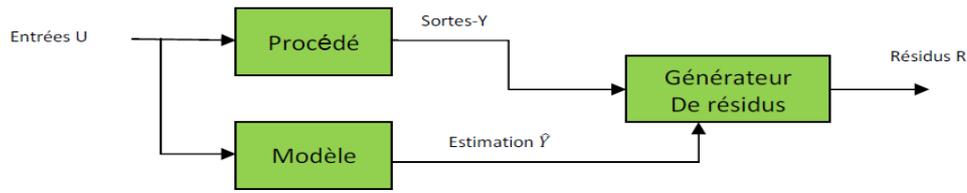


Figure (II-2) : Principe de surveillance avec modèle

En d'autres termes, on peut dire que les résidus sont les écarts entre les observations du système et le modèle mathématique. L'objectif de ce type d'approche est de réussir à faire la distinction entre les résidus causés par des défauts et les résidus causés par les autres sources de variation. Les résidus sont relativement élevés lorsqu'un défaut est présent dans le procédé, et sont plutôt faibles en l'absence du défaut. Dans ce cas, la présence du défaut est détectée en appliquant des seuils adéquats sur les résidus.

Il existe plusieurs approches de génération de résidus, cependant trois sont vraiment essentielles [21], il s'agit de :

a) Estimation des paramètres :

Les résidus sont la différence entre les paramètres nominaux du modèle et les paramètres estimés du modèle [22].

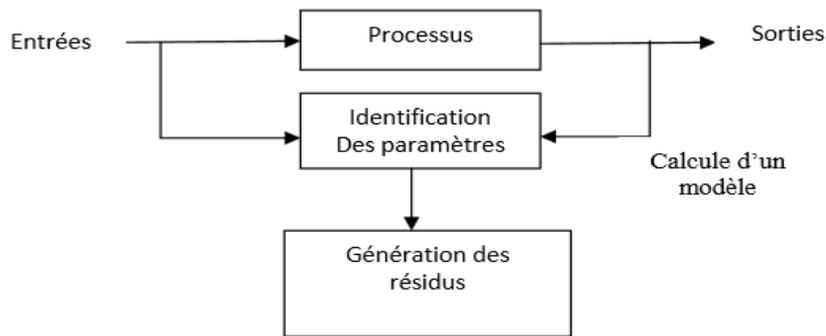


Figure (II-3) : Principe de la surveillance par estimation paramétrique.

b) Observateurs :

Les méthodes à base d'observateurs reconstruisent une estimation de la sortie à partir de toutes ou parties des sorties réelles du système. Les résidus sont alors classiquement la différence entre les sorties mesurées et les sorties estimées [23].

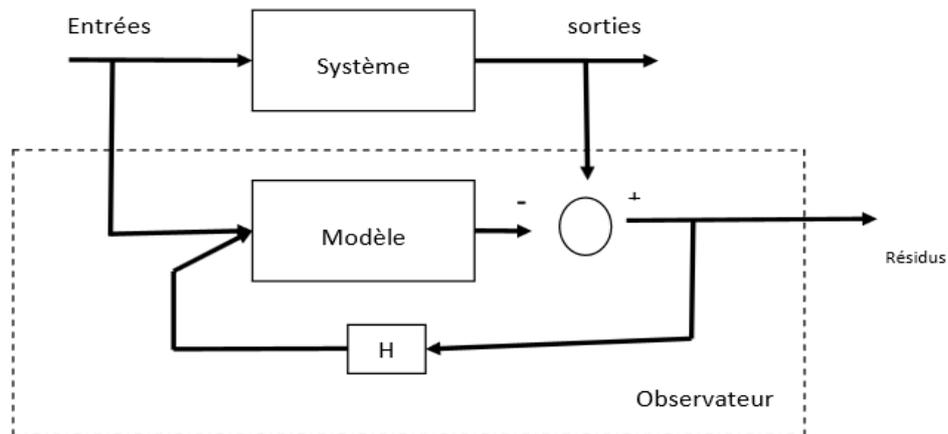


Figure (II-4) : Principe de la surveillance par observateurs

c) Equations de parité :

Cette méthode consiste à vérifier l'exactitude des équations mathématiques du modèle en se basant sur les sorties du procédé [24].

IV.1.2 Méthodes de diagnostic sans modèles

Nombreuses sont les applications industrielles dont le modèle est difficile, voire impossible à obtenir suite à une complexité accrue ou à de nombreuses reconfigurations intervenantes durant le processus de production. Pour ce type d'applications industrielles, les seules méthodes de diagnostic opérationnelles sont celles sans modèle. Deux techniques existent dans ce cas : technique par les outils de traitement de signal (approche signal) et celle par reconnaissance de formes [25], et la méthode des systèmes experts. Pour des raisons de simplicité le diagnostic par approche signal est la technique la plus utilisée actuellement en diagnostic industriel [26], c'est pour cela on essaiera de le détailler un peu dans ce qui suit.

IV.1.2.1 La reconnaissance des formes

Ces méthodes reposent sur l'utilisation des algorithmes de classification des formes et des mesures (continues ou discrètes). Le fonctionnement d'un système de diagnostic par reconnaissance des formes se déroule en trois phases:

_ Une phase d'analyse qui consiste à déterminer et à réduire l'espace de représentation des données et à définir l'espace de décision permettant de spécifier l'ensemble des classes possibles.

_ Une phase de choix d'une méthode de décision permettant de définir une règle de décision qui a pour fonction de classer les nouvelles observations dans les différentes classes de l'ensemble d'apprentissage.

_ Une phase d'exploitation qui détermine, en appliquant la règle de décision, le mode de fonctionnement du système en fonction de chaque nouvelle observation recueillies sur le processus.

Ils existent trois techniques de reconnaissance des formes. La première technique est une technique classique de discrimination basée sur les outils de la probabilité. Cette technique peut se montrer insuffisante car elle suppose une connaissance à priori de tous les états de fonctionnement et ne prend pas en compte révolution du système [26]. Les deux autres techniques reposent sur la théorie de l'intelligence artificielle. Ces techniques ont l'avantage de ne pas se baser sur les connaissances à priori des états de fonctionnement mais plutôt sur une phase d'apprentissage. Ces deux techniques sont la reconnaissance des formes par la logique floue et la reconnaissance des formes par réseaux de neurones.

a) Les réseaux de neurones artificiels

Imitent la structure neuronale d'un cerveau humain : ils sont formés par un réseau complexe de blocs arithmétiques simples. Ils peuvent facilement représenter les systèmes non linéaires multi-entrées/multi-sorties. Cette technique a largement été utilisée dans le domaine du diagnostic des machines électriques. Selon plusieurs démarches et techniques :

- apprentissage à partir de signaux temporels ou fréquentiels issus de simulation ou d'expérimentation.
- diagnostic en temps réel et autonome.
- mise à jour dynamique de la structure du réseau.
- filtrage des transitoires, des perturbations et du bruit.
- détection des défauts dès leur naissance.

b) La logique floue

Traduit la perception humaine des valeurs. Elle ne se limite pas à des valeurs «vrai. Faux» comme la logique traditionnelle. Elle offre une large fourchette de valeurs intermédiaires. Les systèmes flous sont capables de traiter des variables naturelles via

des conditions floues «si-alors». Les systèmes flous adaptatifs exploitent les facultés d'apprentissage des réseaux de neurones ou la robustesse des algorithmes génétiques dans le domaine de l'optimisation des paramètres du système à étudier. Afin de prendre en considération les connaissances à priori et l'expertise humaine dans le domaine. Nous pouvons trouver dans la littérature [27] [28], plusieurs articles exploitant cette technique dans le domaine du diagnostic et de la surveillance des machines électriques. Avec des objectifs variés :

- détection d'un fonctionnement anormal et localisation de la défaillance.
- évaluation des indices de performance.
- construction de bases des données issues de l'expertise humaine. et formulation sous forme de règles conditionnelles «si-alors».
- conception de systèmes adaptatifs pour le diagnostic.

IV.1.2.2 Les systèmes experts :

Les systèmes experts utilisent une information heuristique pour lier les symptômes aux défauts. Ce sont des systèmes à base de règles qui établissent des associations empiriques entre effets et causes.

Ces associations sont généralement fondées sur l'expérience de l'expert plutôt que sur une connaissance de la structure et/ou du comportement du système. Leur fonctionnalité est de trouver la cause de ce qui a été observé en parcourant les règles par un raisonnement inductif par chaînage avant ou arrière.

IV.1.2.3 Les méthodes par approche signal

Le traitement et l'analyse d'un signal peuvent être parfois utiles dans le domaine de diagnostic, en effet, La mesure d'un signal indique des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. La variation de ces signaux peut être reliée aux défauts.

Ainsi, d'une manière générale, on peut déterminer les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut en déterminant par exemple son amplitude. Il existe toutefois d'autres possibilités qui consistent à déterminer les fonctions d'auto corrélation, les transformées de Fourier ou la densité spectrale .

La première étape dans cette approche concerne l'acquisition des signaux en les caractérisant dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral, leur variance... etc.[29].L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que l'échauffement, les vibrations,...etc. ces symptômes sont la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques.

Cette étape est basée sur la connaissance du système sain (par mesure ou par modèles numériques). La deuxième étape consiste ensuite en une création(artificielle) de défauts (à nouveau sur maquettes physiques ou par modèle numérique). La signature du défaut, c'est-à-dire sa répercussion sur certaines grandeurs, est alors identifiée.

Une observation est ensuite réalisée sur un convertisseur réel. Une analyse est portée sur les grandeurs consistant en la reconnaissance de signatures de défaut déjà connues.

IV.2Quelques techniques de diagnostic par approche signal

IV.2.1 Analyse temporelle

L'analyse temporelle peut se faire soit à l'échelle du signal, c'est à dire en utilisant des indicateurs obtenus à partir d'une fenêtre glissante sur le signal, cela permet la détection et la localisation du défaut, soit à l'échelle d'un ensemble de signaux, les indicateurs ont une valeur scalaire calculée directement sur la totalité d'un signal. Cette analyse s'applique à des machines simples et consiste à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevée. Cet outil est aisé à employer lorsque le signal est simple (vibration de type sinusoïdal du balourd d'un rotor par exemple), mais devient inexploitable dans le cas de sollicitations multiples et de faible influence sur les défauts [30].

IV.2.2 Analyse fréquentiel

Le second type de représentation est la représentation du domaine de fréquence (fréquence, amplitude) appelé spectre ou représentation spectrale. Le signal complexe $F(t)$ qui est difficile à interpréter, est décomposé en une série de composants élémentaires définis par leurs fréquences et leurs amplitudes.

L'outil mathématique utilisé dans ce cas est la décomposition du signal à l'aide de la transformée de Fourier. Si cette décomposition est possible, sa représentation dans le domaine temporel est encore inutilisable. Il consiste à représenter dans un diagramme appelé spectre la

fréquence et l'amplitude. Avec ce type de représentation, chaque composante sinusoïdale est définie par son amplitude et sa fréquence. La représentation spectrale devient plus nette et réalisable. Le spectre final contient toutes les fréquences sinusoïdales (lignes discrètes) formant le signal de vibration d'origine. A noter que le spectre d'un choc périodique comporte un peigne de lignes à la fréquence de choc.

IV.2.3 Analyse cepstale

Le cepstre se définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier [31]

$$C[s(t)] = TF^{-1} \log |TF[s(t)]| \quad -2 \dots \dots \dots \text{Eq(II-5)}$$

Il a pour but d'identifier et de quantifier toutes les structures périodiques contenues dans le spectre. Il permet de définir des indicateurs adaptés à la détection précoce des défauts induisant, à des stades plus ou moins avancés, des énergies vibratoires que les indicateurs issus de techniques traditionnelles mettraient difficilement en évidence. Le cepstre et ses dérivées représentent les amplitudes des composantes dont les quéfrences correspondent aux périodes de répétition des chocs induits par les défauts de la machine surveillée. Il est largement utilisé pour la détection de défauts d'engrenage et dans une moindre mesure pour les défauts de roulements [32].

IV.2.4 Analyse temps – fréquence

Les méthodes d'analyse temps fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non-stationnaires [33] [34] [35]. Cette notion de non stationnarité peut s'appliquer aussi bien à des signaux aléatoires qu'à des signaux certains. Plus généralement, elles s'appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques évoluent au cours du temps, Elle permet une localisation des périodicités dans le temps et indiquera aussi la période varie d'une façon continue, si elle disparaît puis réapparaît par la suite, etc.

L'analyse temps-fréquence concilie les avantages de l'analyse spectrale et de l'analyse temporelle, en caractérisant le signal vibratoire à la fois en temps et en fréquence. C'est une Analyse fine qui permet de détecter des changements anormaux dans la répartition fréquentielle d'une signature vibratoire à un instant précis dans le cycle. Elle apporte par

ailleurs une solution pour séparer des signatures vibratoires proches qui se recouvrent en temps et/ou en fréquence.

L'analyse temps–fréquence traditionnelle utilise des distributions qui représentent l'énergie ou puissance des signaux en deux dimensions de temps et de fréquence pour révéler les meilleurs modèles de diagnostic.

La Figure (II-5) montre un signal chirp et sa représentation temps fréquence, on peut voir que sa fréquence est variable dans le temps. Uniquement cette présentation donne une bonne localisation pour les fréquences [36].

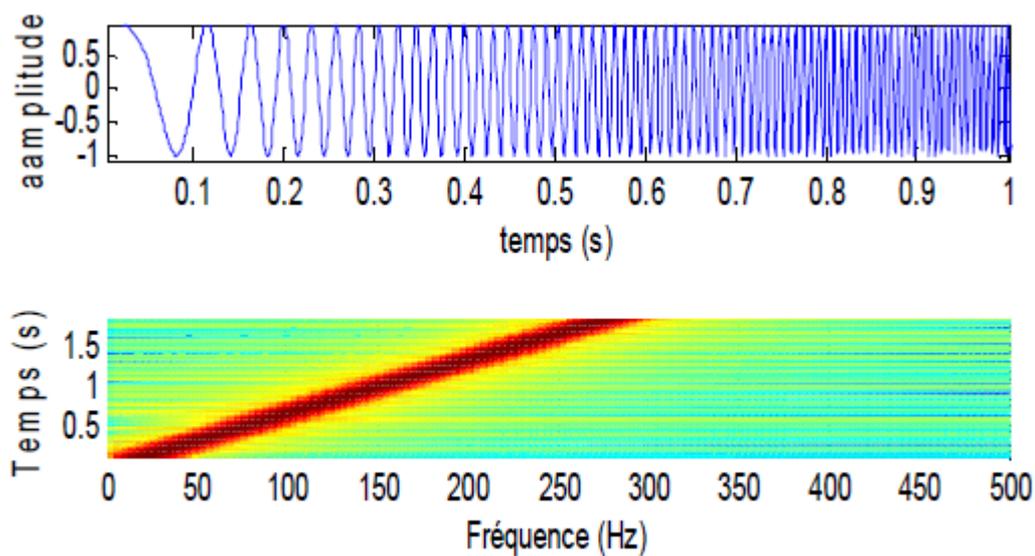


Figure (II-5) : a) Signal chirp, b) Sa représentation temps fréquence.

Les méthodes temps-fréquence permettent alors de fournir une représentation du signal en trois dimensions (amplitude-temps-fréquence), et de détecter et de suivre le développement des défauts qui génèrent une faible puissance vibratoire.

V. Conclusion

Dans ce chapitre on a été consacré à une présentation de quelques définitions relatives au diagnostic dans le domaine industriel, suivie par les différentes étapes utilisées dans un diagnostic et on a terminé par les méthodes d'analyses utilisées pour la détection et le diagnostic des défauts.

Le choix d'une méthode d'analyse s'effectue suivant des critères par exemple la nature des signaux acquis de la machine, l'environnement industriel etc....

Grâce à sa simplicité et sa rapidité d'extraire les résultats, la méthode par approche signal est parmi les méthodes les plus utilisées pour la détection et le diagnostic des défauts, surtout les défauts des engrenages, les défauts de roulements par exemple...

Dans le chapitre qui suit on s'intéressera à la détection des défauts de roulements en appliquant la méthode de l'analyse spectrale sur des signaux réels.

**CHAPITRE III :
DETECTION ET CARACTERISATION DES
DEFAUTS DE ROULEMENT PAR
L'ANALYSE SPECTRALE**

I. Introduction

Le traitement du signal est une discipline indispensable de nos jours. Il a pour objet l'élaboration ou l'interprétation des signaux porteurs d'informations. Son but est donc de réussir à extraire un maximum d'information utile sur un signal perturbé par du bruit en s'appuyant sur les ressources de l'électronique et de l'informatique.

Le diagnostic industriel basé sur le traitement de signal est parmi les méthodes les plus efficaces et les plus utilisées dans l'industrie, surtout ce qui concerne la détection des défauts affectant les machines tournantes (les défauts des roulements, les défauts des engrenages...etc.)

Le diagnostic par approche signal consiste à étudier les contenus des signaux relevés afin d'extraire leurs propriétés temporels, fréquentiels ou bien leurs amplitudes, ça dépend la méthode d'analyse à suivre.

Dans ce qui suit nous nous intéressons par la détection des défauts des roulements à billes par la méthode d'analyse spectrale, ou on va donner quelques définitions sur le signal vibratoire et ses caractéristiques, la transformée de Fourier rapide et le principe de détection des défauts par l'analyse spectrale, et on finira par l'application de cette méthode sur quelques signaux obtenus du banc d'essai American.

II. Définitions

II.1 Signal vibratoire

Un signal est la représentation physique de l'information, qu'il convoie de sa source à son destinataire. La description mathématique des signaux est l'objectif de la théorie du signal, Elle offre les moyens d'analyser, de concevoir et de caractériser des systèmes de traitement de l'information.

Les signaux vibratoires ont une structure complexe, et sont constitués de différentes composantes :

- une partie du signal provient des phénomènes cycliques (déterministes ou non) se produisant dans le système, comme la rotation des arbres, les chocs des engrenements, les mouvements existants au sein d'un roulement...,
- une partie aléatoire, due aux phénomènes parasites générés lors du fonctionnement d'un système (jeu, frottement, ...) Ces signaux ne sont globalement pas stationnaires. En effet, ils ne sont pas indépendants du temps même si la vitesse de fonctionnement reste constante. Cette non-stationnarité a plusieurs origines :
- vieillissement du système.

- excitation du système en vibration due aux chocs internes successifs voire chaotiques (engrenages, roulements...),
- non-stationnarité des efforts transmis à travers le système,
- imperfection des surfaces de contact, et contact variable entre dentures.

II.2 Le traitement de signal

Le traitement du signal est la théorie permettant d'effectuer une description (une modélisation) et une analyse des signaux et des systèmes. Le traitement du signal a pour objectif la réalisation et l'interprétation des signaux porteurs d'information. Le but du traitement du signal est en effet d'extraire le maximum d'information utile sur un signal perturbé par le bruit [37].

II.3 Type des signaux

La figure (III-1) représente les différents types des signaux:

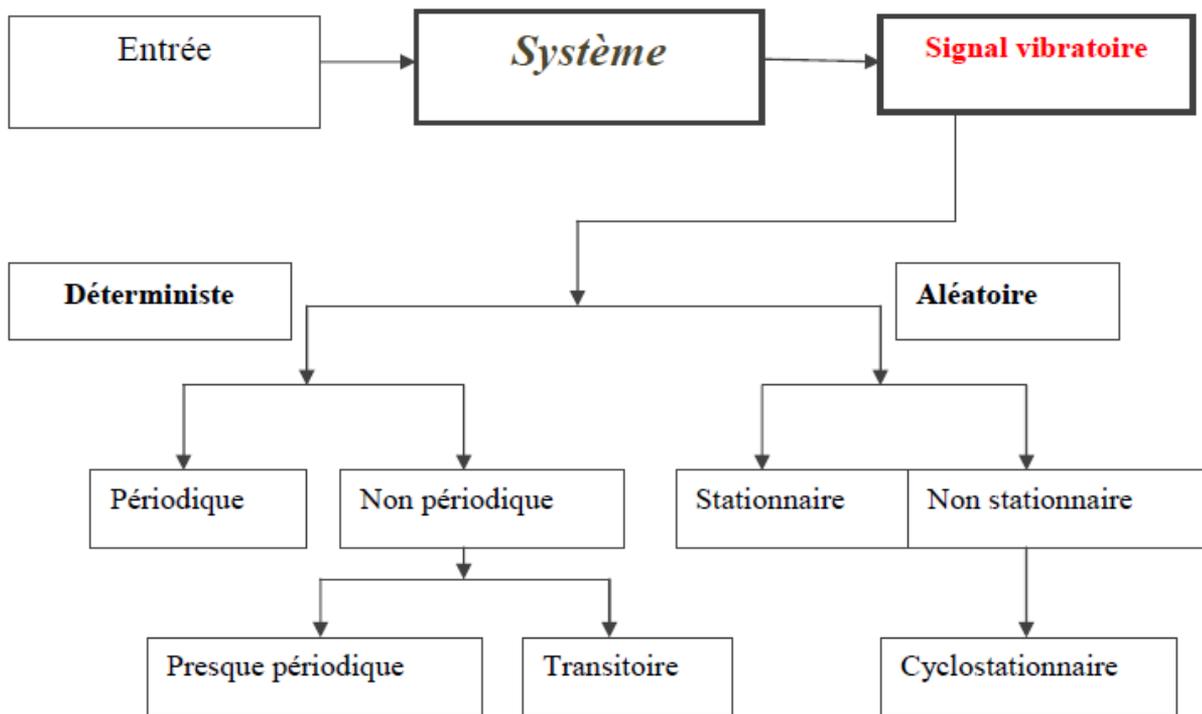


Figure (III-1) : les différents types des signaux vibratoire [38].

II.3.1 Déterministe

Des signaux (périodique ou non périodique) dont l'évolution en fonction du temps peut être parfaitement décrite par un modèle mathématique. Ces signaux proviennent de phénomènes pour lesquels on connaît les lois physiques correspondantes et les conditions initiales, permettant ainsi de prévoir le résultat. Les signaux non périodiques se composent d'une part des signaux pseudopériodiques formés d'une somme de sinusoides de périodes différentes et d'autre part des

signaux transitoires dont l'existence est limitée dans le temps. Ces signaux "certains" peuvent en principe être reproduits rigoureusement identiques à eux-mêmes [39].

II.3.2 Aléatoire

Le signal aléatoire fait intervenir deux notions :

- La notion de signal c'est à dire une mesure qui dépend d'un ou plusieurs paramètres d'espace, le plus souvent le temps.
- La notion d'aléatoire qui fait que, à un instant t donné, la mesure n'est pas certainement dépend du hasard. Cet aspect est appelé l'aspect stochastique et on parle indifféremment de signal aléatoire ou de signal stochastique.

Ce sont les signaux qui ont caractère non reproductible et imprévisible.

II.4 La chaîne d'acquisition d'un signal

La chaîne d'acquisition figure(III-2) est l'élément essentiel de toute technique. Elle permet de transformer un phénomène physique en un signal exploitable via le capteur. Son intérêt est d'améliorer le signal émis en un signal retravaillé pour faire ressortir ses caractéristiques.

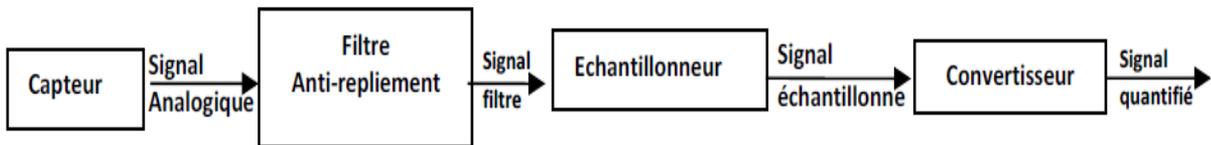


Figure (III-2) : schéma bloc de la chaîne d'acquisition et de traitement de signal.

II.5 Echantillonnage

II.5.1 Définition

L'échantillonnage consiste à prélever à des instants précis, le plus souvent équidistants, les valeurs instantanées d'un signal. Le signal analogique $S_e(t)$, continu dans le temps, est alors représenté par un ensemble de valeur discrète :

$$S_e(t) = s(n.T_e) \dots \dots \dots \text{Eq(III.6)}$$

Avec :

n Entier.

T_e période d'échantillonnage.

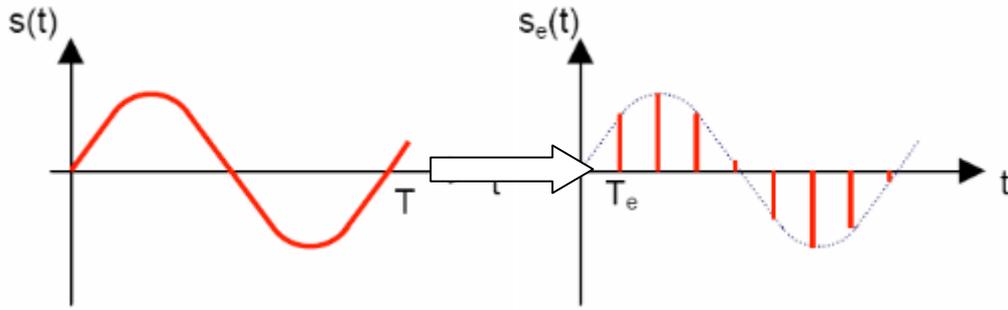


Figure (III-3) : L'échantillonnage d'un signal $s(t)$.

On appelle période d'échantillonnage T_e (en s), le temps entre deux mesures successives. La fréquence d'échantillonnage F_e , correspond au nombre de mesures effectuées par seconde. On a :

$$F_e = 1/T_e \dots \dots \dots \text{Eq(III-7)}$$

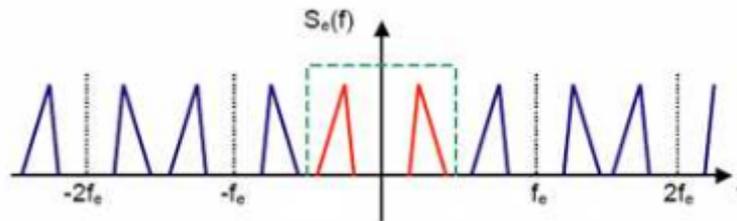
Le choix de la fréquence d'échantillonnage est crucial afin de reproduire fidèlement le signal étudié. En effet si le signal analogique varie trop vite par rapport à la fréquence d'échantillonnage, la numérisation donnera un rendu incorrect.

II.5.2 Théorème de Shannon :

Pour un signal périodique la fréquence d'échantillonnage F_e doit être au moins le double de la fréquence maximale F_{max} du signal [40] :

$$F_e > 2 * F_{max} \dots \dots \dots \text{Eq(III-8)}$$

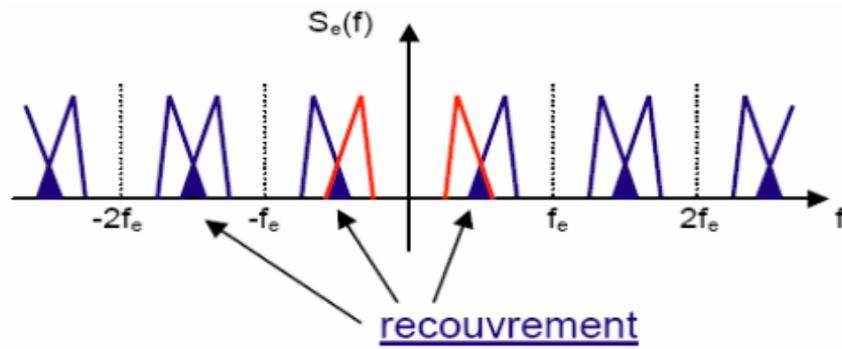
En pratique, la valeur couramment choisie pour la fréquence d'échantillonnage est : $F_e = 2.56 * F_{max}$



Figure(III-4) : exemple d'un échantillonnage parfait.

Le théorème de SHANNON montre que la reconstitution correcte d'un signal nécessite que la fréquence d'échantillonnage F_e soit au moins deux fois plus grande que la plus grande des fréquences F_{max} du spectre du signal : $F_e > F_{max}$

- Si F_{max} , la fréquence maximale du spectre du signal à échantillonner, est supérieure à $F_e / 2$, la restitution du signal original sera impossible car il va apparaître un **recouvrement spectral** lors de l'échantillonnage. On dit qu'on est en **sous-échantillonnage**.



Figure(III-5) : *exemple d'un mauvais echantillonnage (recouvrement).*

III. L'analyse spectrale

L'analyse « en fréquence » est devenue l'outil fondamental pour le traitement des signaux Vibratoires. Elle s'appuie sur la transformée de Fourier, qui permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître le contenu spectral d'énergie ou de puissance, présent dans le signal à la fréquence F , et donc de détecter la présence d'un défaut générant un choc périodique à une fréquence de défaut. La comparaison de cette fréquence avec celles des défauts théoriques potentiels (fréquences caractéristiques des défauts) sur le roulement permet sa localisation [41]. Dans la pratique, on utilise la transformée de Fourier discrète rapide (FFT).

III.1 La Transformée de Fourier Discrète et Rapide

La transformée de Fourier est parmi les méthodes les plus robustes pour le traitement des signaux en régime stationnaire. Ses dérivées discrète (TFD) et rapide (TFR) comptent parmi les outils fondamentaux pour le calcul des caractéristiques spectrales des signaux et utilisent des programmes efficaces moyennant les systèmes numériques [19].

L'analyse dans ce domaine est basée sur la transformation du signal de domaine temporel au domaine fréquentiel, l'avantage de l'analyse dans ce domaine par rapport au domaine temporel, est son aptitude d'identification et d'isolation facile de certains composants fréquentiels d'intérêt. Ainsi cette analyse de spectre permet de mettre en évidence les différentes périodicités dans le signal original, alors la transformée de Fourier permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel, suivant la relation :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \dots \dots \dots \text{Eq(III-9)}$$

Où :

$X(f)$ est la transformée de Fourier.

t est la variable temps.

f est la variable fréquence.

Exemple :

Si on prend un signal sinusoïdal périodique simple avec une fréquence de 120 Hz. L'analyse spectrale permet d'extraire la fréquence fondamentale qui existe dans ce signal.

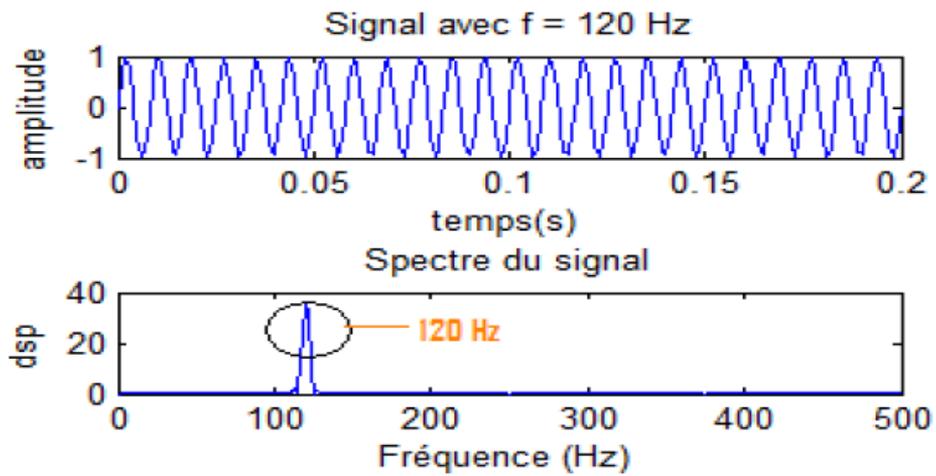


Figure (III-6) : signal temporel et sa représentation fréquentiel.

III.2 Transformation de Fourier à fenêtre glissante

Pour donner un pouvoir de localisation aux fonctions analysantes de la transformée de Fourier, qui oscillent avec la même amplitude sur tout l'axe des réels, on pondère ces fonctions par une fonction fenêtre de manière à sélectionner uniquement la partie utile du signal. La fenêtre est bien sûr translatée de manière observer toutes les parties utiles du signal.

Concrètement, la transformée de Fourier à fenêtre glissante s'exprime par:

$$X(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft}w^*(t - \tau)dt \dots \dots \dots \text{Eq(III-10)}$$

Où $w(t)$ est la fonction fenêtre qui est à choisir et " τ " est le paramètre de translation de la fenêtre. On notera que la transformée dépend maintenant de deux variables: une variable de fréquence et une variable de localisation temporelle du contenu fréquentiel. Cette transformée nous permet donc bien d'atteindre le but recherché qui était d'avoir des informations sur le signal en temps et en fréquence à partir de la transformation réalisée.

III.3 Filtres anti-repliement

Un filtre anticrénelage, filtre anti aliasing (en anglais), parfois appelé filtre antirepliement, est un filtre passe-bas analogique que l'on retrouve dans les dispositifs de numérisation, qui permet de nettoyer le signal avant de l'étudier. Ce type de filtre ne laisse passer que les composantes dont les fréquences sont en dessous d'une valeur donnée, il est utilisé pour éviter le repliement du spectre.

Ce dispositif chargé d'éliminer, autant que faire se peut, les parties du signal qui ne contiennent aucune information pertinente, parce que leur fréquence est supérieure à la fréquence maximale qu'on envisage de transmettre, s'appelle un filtre anti-repliement.

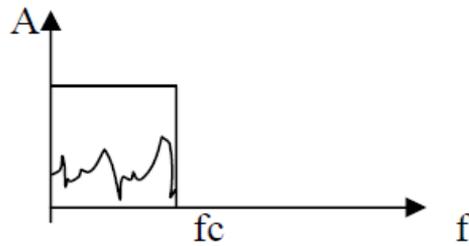
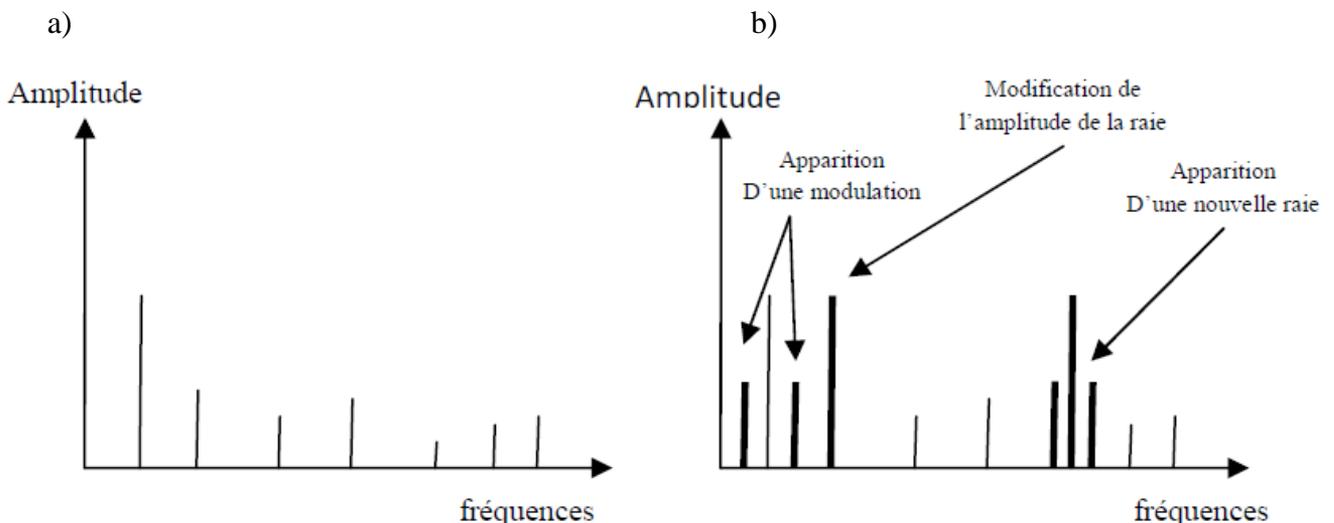


Figure (III-7) : filtre passe-bas.

III.4 Principe de détection d'un défaut de roulement par l'analyse spectrale

La détection des défauts des roulements par la méthode de l'analyse de spectre repose principalement sur l'étude des fréquences et leurs amplitudes existantes dans le spectre. Comme dans toutes les machines tournantes, l'apparition d'une anomalie provoque directement une modification du spectre de signal de référence :

- Soit par l'apparition des raies spectrales dont les fréquences associées sont directement liées à une fréquence caractéristique d'un défaut de roulement bien précis (exemple : défaut de la bague extérieure).
- Soit par la modification de l'amplitude des raies spectrales déjà existées dans le spectre à l'état sain.



Figure(III-8) : a) spectre en mode sain, b) spectre en mode défaillant.

Alors , la détection des défauts de roulement par l'analyse spectrale consiste à comparer le spectre de roulement à l'état sain avec celle de l'état défaillant , s'il y aura des modifications des amplitudes des raies des fréquences déjà existées , ou bien il y a une apparition des nouvelles fréquences dont elles n'existent plus dans le signal de référence (à l'état sain) , on conclut qu'il y a une anomalie ou bien un défaut de roulement.

IV. L'application de la méthode de l'analyse spectrale pour la détection des défauts des roulements

IV.1 Description de l'expérience

Pour mesurer les effets des vibrations engendrées par le fonctionnement ou les dysfonctionnements d'un roulement à billes, il faut placer des capteurs externes au roulement. La méthode la plus couramment utilisée est de placer sur le carter de la machine, auprès des roulements à surveiller, des accéléromètres mesurant les accélérations subies. Notons que le positionnement des capteurs revêt un caractère essentiel pour une bonne détection des défauts. Les accéléromètres sont souvent de nature piézo-électrique : une masse est utilisée pour convertir une accélération en effort qui, lui-même, est converti en charge électrique par un cristal piézo-électrique. Cette charge est ensuite intégrée par un conditionneur pour donner une tension représentative de l'accélération mécanique.

Les accéléromètres piézo-électriques sont de nature très sensible, ce qui permet une mesure efficace. Cependant, ils nécessitent un étalonnage très précis. Il en va de même pour les conditionneurs.

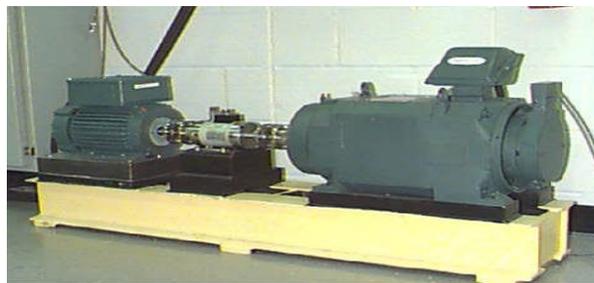


Figure (III-9) : Le banc d'essai Américain (*Data bearing center*).

Le banc d'essai américain Figure (III-9) se compose d'un moteur (à gauche), un capteur de couple / le codeur (au centre), un dynamomètre (à droite), et un circuit électronique de commande (non représentée). Les roulements ont été utilisés pour des défauts de diamètres 0.01778 , 0.03556 , 0.05334 et 0.07112 (mm). Les essais ont été réalisés sur le palier côté accouplement (Drive End bearing) de type 6205-2RS JEM SKF [42].

IV.2 Géométrie et caractéristiques du roulement à étudier

Les caractéristiques et la géométrie de roulement à étudier coté accouplement, et les multiples de fréquences des défauts sont mentionnés dans les tableaux ci-dessus :

Taille : (mm)

Diamètre intérieur	Diamètre extérieur	Epaisseur	Diamètre de bille	Diamètre moyen de roulement
25	52	15	8	39

TAB (III.1) : La géométrie du roulement (en mm).

Fréquences des défauts : (coefficient multiplié par la fréquence de rotation en Hz)

Bague intérieure	Bague extérieure	Cage	Élément roulant
5.4152	3.5848	0.39828	4.7135

TAB (III.2) : Fréquences de défaut (multiple la fréquence de l'axe en Hz).

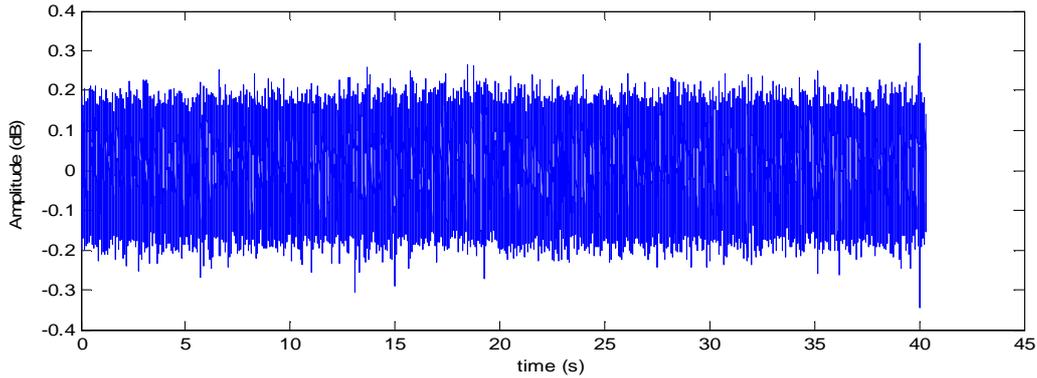
Les signaux vibratoires ont été acquis à l'aide des accéléromètres, qui ont été attachés sur le boîtier avec des bases magnétiques. Des accéléromètres ont été placés à la position 6 heures sur le palier côté accouplement. Les signaux vibratoires ont été recueillis en utilisant un enregistreur DAT à 16 canaux, et ont été post-traités dans un environnement MATLAB. Les données numériques ont été recueillies à 12 KHz (fréquence d'échantillonnage de signal).

L'étude a été faite pour une vitesse de rotation égale à 1772 tr/min.

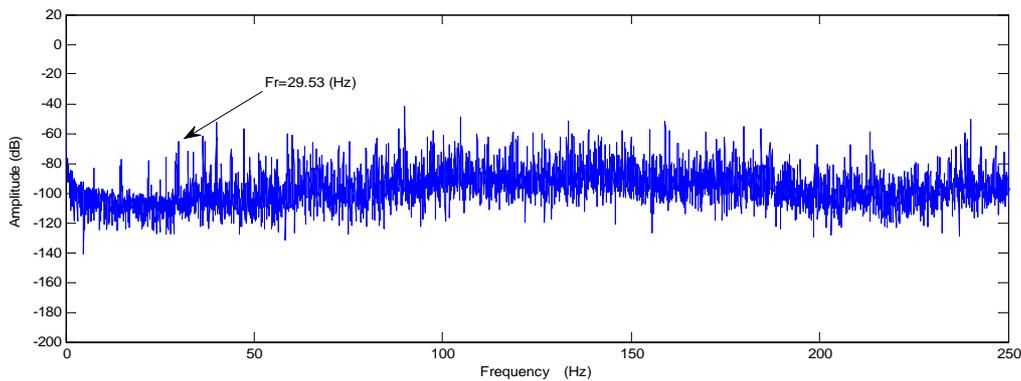
IV.3 Caractérisation des signatures spectrales des défauts des roulements

IV.3.1 Caractérisation des signatures spectrales de roulement à l'état sain

Dans cette première étape, nous allons analyser le spectre de signal de roulement dans son état sain. Ce spectre sera considéré comme la référence de tous les prochains tests.



Figure(III-10) : *signal temporel de roulement à l'état sain.*



Figure(III-11) : *spectre de roulement à l'état sain.*

IV.3.2 Caractérisation des signatures spectrales à l'état défailant

Dans cette étape, il faut tout d'abord calculer les fréquences caractéristiques des défauts grâce à des formules qu'on a citées dans le chapitre précédent, ces dernières sont liées à la vitesse de rotation et les caractéristiques de roulement.

Dans notre étude on va calculer directement ces fréquences caractéristiques de chaque défaut en multipliant la vitesse de rotation par les coefficients des défauts déjà cités :

$$f_{\text{defaut}} = f_r * C_{\text{defaut}} \dots \dots \dots \text{Eq(III-11)}$$

- f_{defaut} fréquence caractéristique de défaut.
- f_r fréquence de rotation.
- C_{defaut} coefficient multiple de fréquence de défaut.

Pour une charge de moteur égale à 1 HP la vitesse de rotation égale à 1772 tr/min ce qui correspond à une fréquence de rotation $f_r=29.53\text{Hz}$.

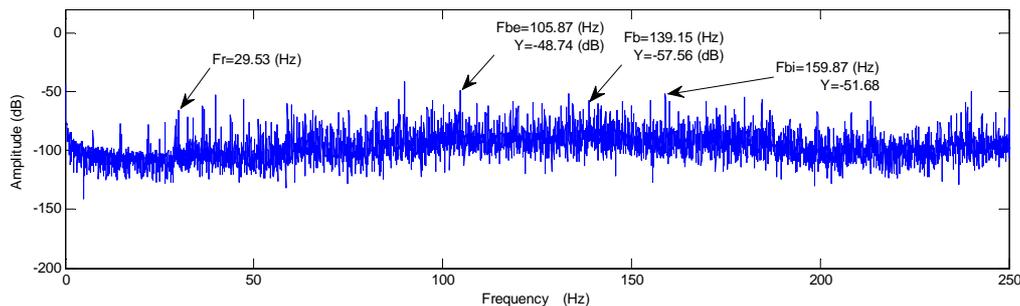
Les fréquences caractéristiques de chaque défaut sont les suivantes:

- Fréquence de la bague intérieure : $f_{bi} = 5.415 * f_r$
- Fréquence de la bague extérieure : $f_{be} = 3.584 * f_r$
- Fréquence de la bille : $f_b = 4.713 * f_r$

Les fréquences caractéristiques des défauts des éléments défectueux sont notées sur le tableau suivant :

L'élément défectueux	La bague externe	La bague interne	L'élément roulant (la bille)
La fréquence caractéristique de défaut en (Hz)	105.87	159.87	139.157

Tab(III-3) : fréquences caractéristiques des éléments défectueux de roulement.



Figure(III-12) : spectre de roulement à l'état sain avec les fréquences caractéristiques des défauts de roulement.

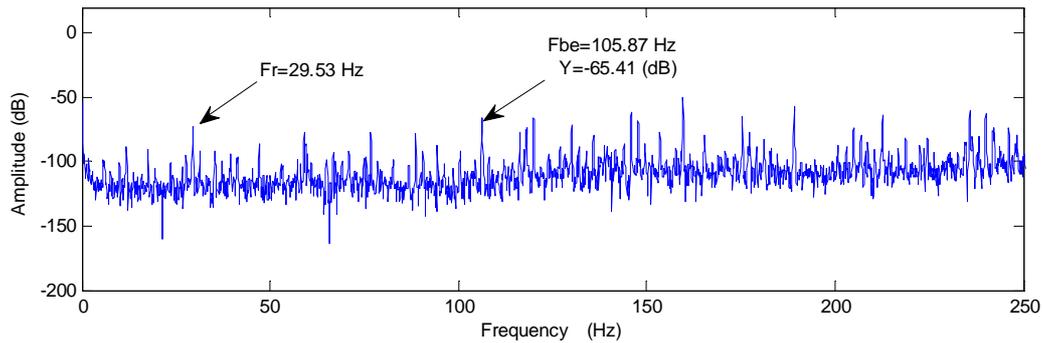
La figure présente le spectre de roulement à l'état sain, elle montre des raies des fréquences correspondantes respectivement à la :

- $f_r = 29.53$ Hz : fréquence de rotation de moteur.
- $f_{bi} = 105.87$ Hz : fréquence caractéristique de défaut de la bague interne, son amplitude est -48.74 dB.
- $f_{be} = 159.87$ Hz : fréquence caractéristique de défaut de la bague externe, son amplitude est : -51.68 dB.
- $f_b = 139.15$ Hz : fréquence caractéristique de défaut de la bille, son amplitude est : -57.56 dB.

Ces résultats seront les références pour tous les cas suivants.

Remarque

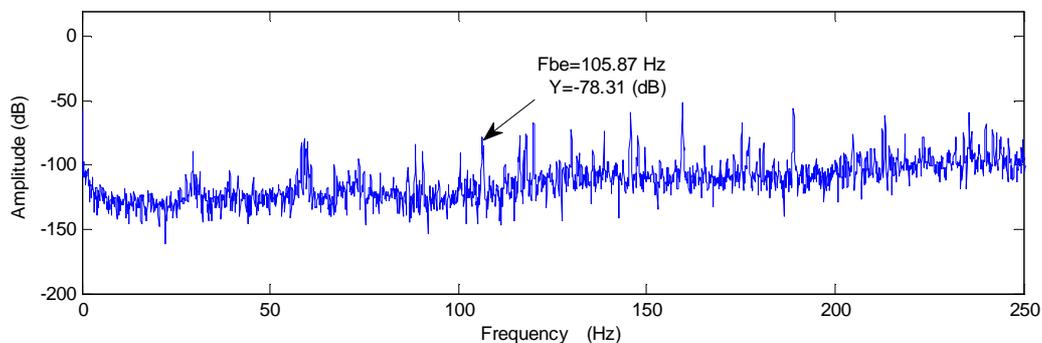
Pour la détection et l'identification d'un défaut il suffit juste de faire une comparaison entre les spectres obtenus dans chaque cas avec celui de référence. Cette comparaison nous montre s'il y a une variation des amplitudes de certaines raies ou bien l'apparition des nouvelles fréquences.

IV.3.2.1 Signatures spectrales de défaut de la bague externe

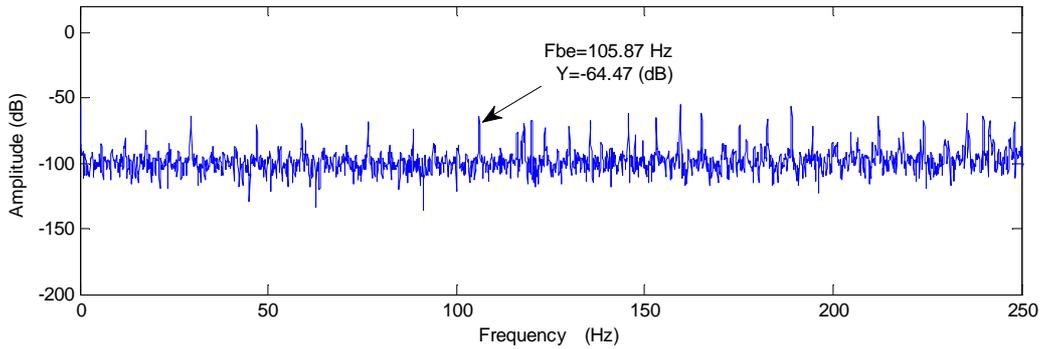
Figure(III-13) : spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égale à 0.01778 (mm).

Cette figure présente le spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égale à 0.01778 (mm), en comparant ce spectre avec celui de la référence on voit qu'il y a une variation d'amplitude de raie de fréquence $f_{be} = 105.87 \text{ Hz}$ de -48.74 dB dans l'état sain à -65.41 dB dans l'état défaillant, ce qui nous montre l'existence d'un défaut sur la bague externe de diamètre 0.01778 (mm).

Dans ce qui suit on présentera l'évolution d'amplitude de raie de fréquence $f_{be} = 105.87 \text{ Hz}$ en fonction de diamètre de défaut.



Figure(III-14) : spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.03556 (mm).

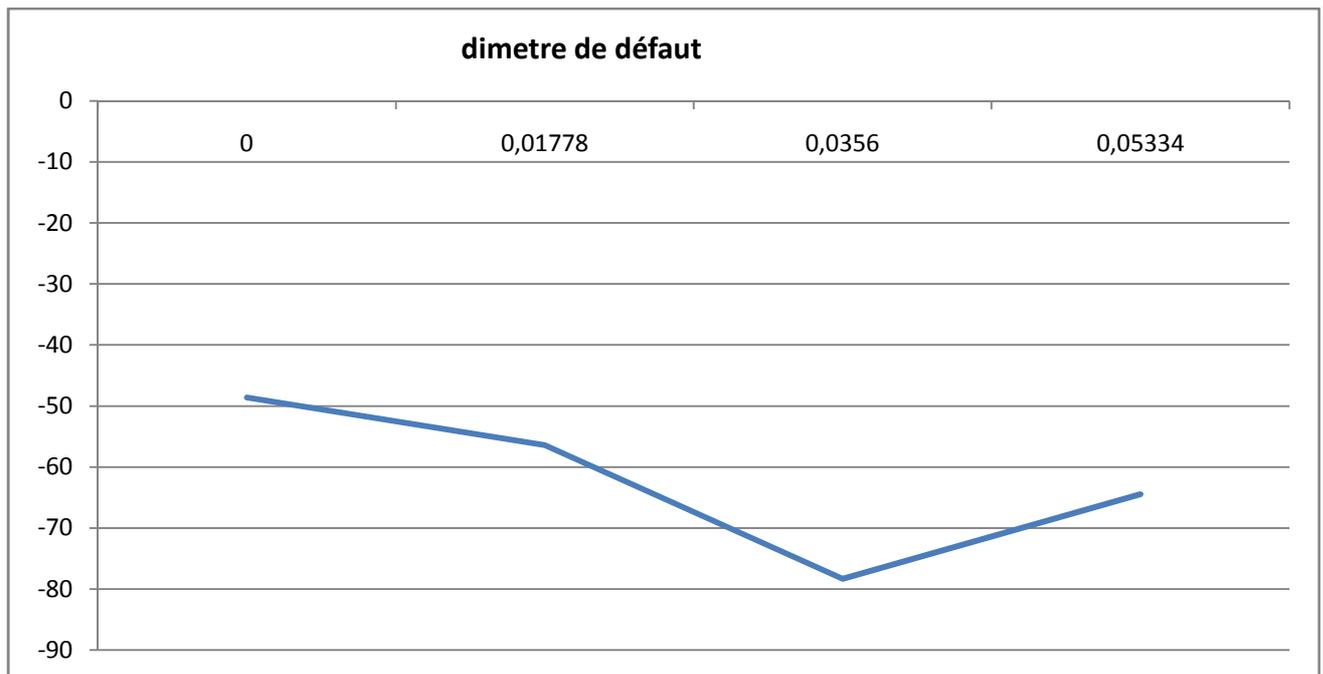


Figure(III-15) : *spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.05334 (mm).*

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.01778	0.03556	0.05334
Amplitude (dB)	-48.64	-65.41	-78.31	-64.47

Tab (III-4) : *évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.*

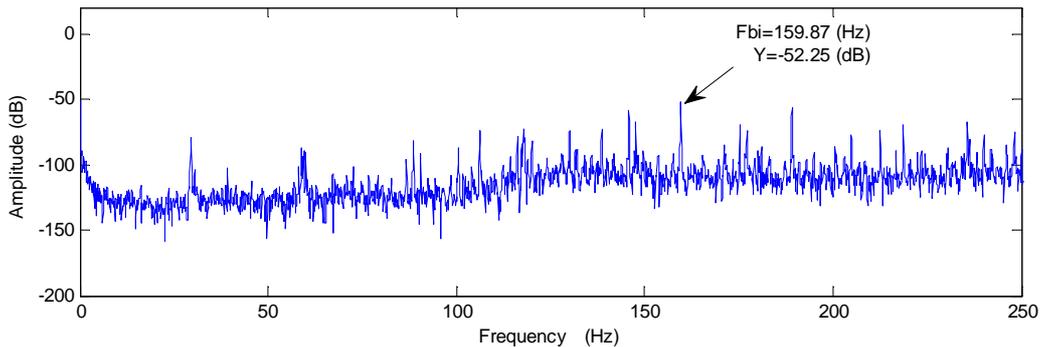
La figure ci-dessous donne l'évolution de l'amplitude de raie de fréquence $f_{be}=105.87$ Hz en fonction de diamètre de défaut.



Figure(III-16) : *l'évolution des amplitudes fonction de diamètre de défaut de la bague externe.*

D'après les spectres précédents et les résultats résumés dans le tableau et présentés dans la figure (III-16), l'amplitude de la raie de fréquence caractéristique de défaut de la bague externe varie aléatoirement suivant une fonction non linéaire, et cela par rapport à l'augmentation de diamètre de défaut.

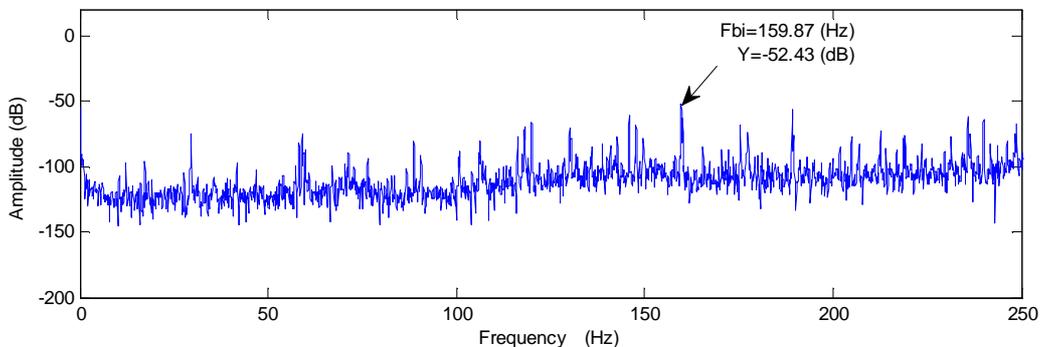
IV.3.2.2 Signatures spectrales de défaut de la bague interne



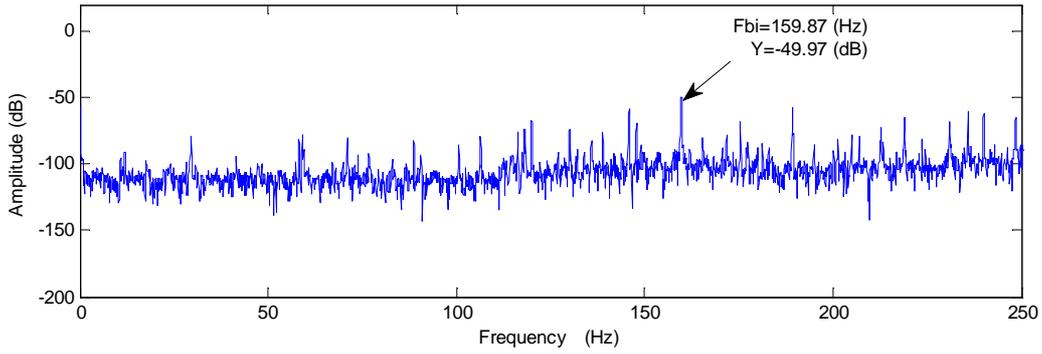
Figure(III-17) : *spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.01778 (mm).*

Cette figure présente le spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égale à 0.01778 (mm).

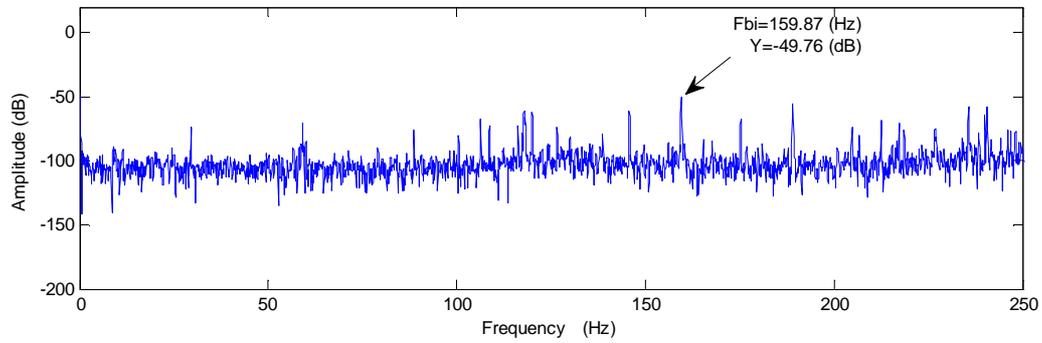
La comparaison entre ce spectre avec celui de la référence montre une variation d'amplitude de raie de fréquence $f_{bi}=159.87 \text{ Hz}$ de -57.56 dB dans l'état sain à -52.25 dB dans l'état défaillant, ce qui nous montre l'existence d'un défaut de la bague externe de diamètre 0.01778 (mm).



Figure(III-18) : *spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.0356 (mm).*



Figure(III-19) : *spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.05334 (mm).*

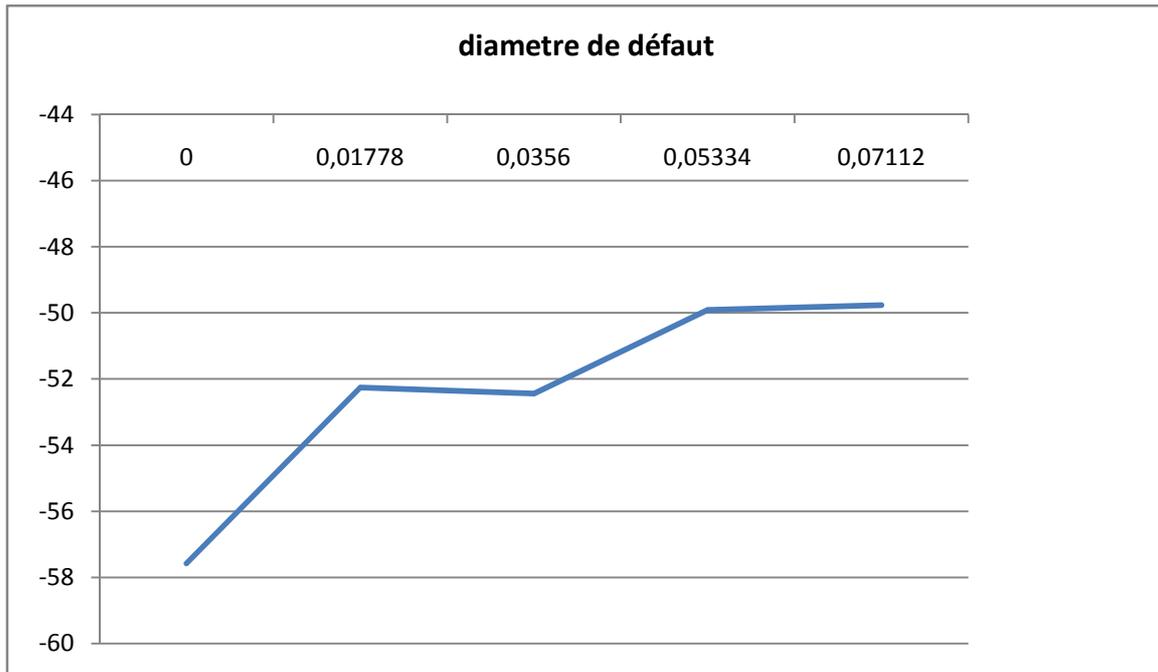


Figure(III-20) : *spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.07112 (mm).*

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.01778	0.0356	0.05334	0.07112
Amplitude (dB)	-57.57	-52.25	-52.43	-49.97	-49.76

Tab(III-5) : *évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.*

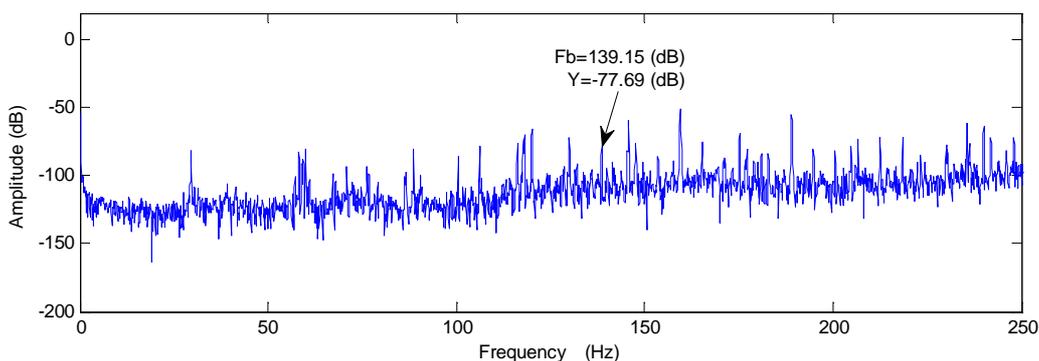
La figure ci-dessous donne l'évolution de l'amplitude des raies en fonction de diamètre de défaut.



Figure(III-21) : l'évolution de l'amplitude des raies en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.

D'après les spectres précédents et les résultats résumés dans le tableau et présentés dans la figure (III-21), l'amplitude de la raie de fréquence caractéristique de défaut de la bague interne augmente suivant l'augmentation de diamètre de défaut.

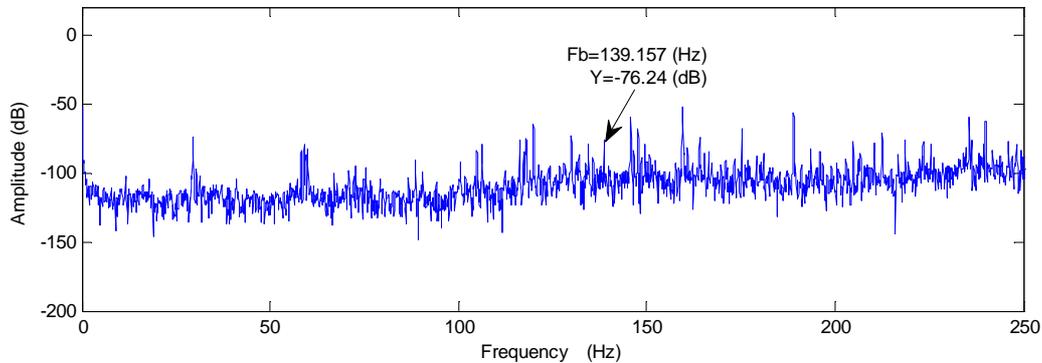
IV.3.2.3 Signatures spectrales de défaut de la bille



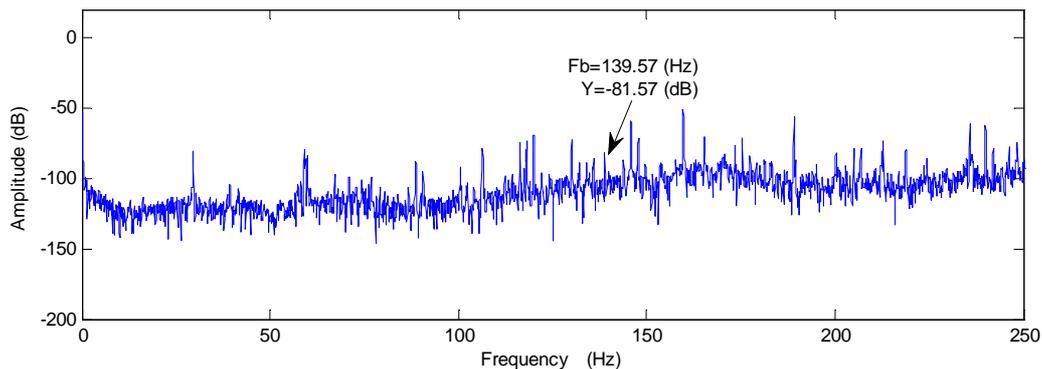
Figure(III-22) : spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.01778 (mm).

Cette figure présente le spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.01778 (mm), en comparant ce spectre avec celui de la référence on voit qu'il

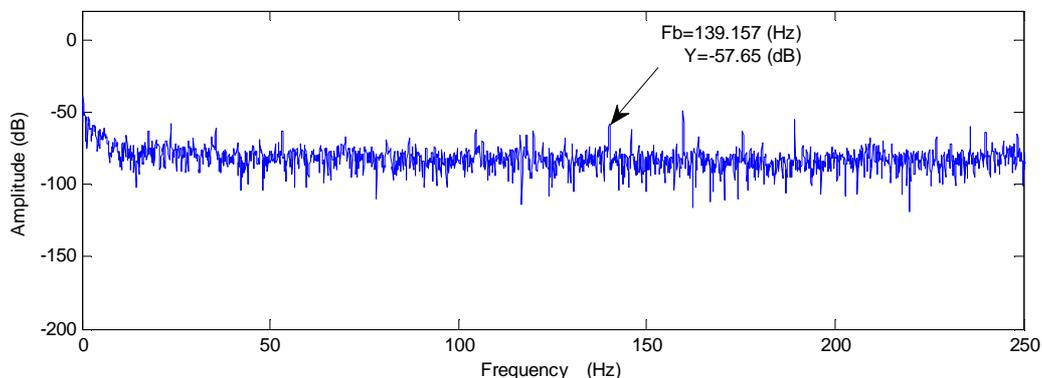
y a une variation d'amplitude de raie de fréquence $f_b = 159.87 \text{ Hz}$ de -51.68 dB dans l'état sain à -77.69 dB dans l'état défaillant, ce qui nous montre l'existence d'un défaut de la bague externe de diamètre 0.01778 (mm) .



Figure(III-23) : *spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.0356 (mm) .*



Figure(III-24) : *spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.05334 (mm) .*



Figure(III-25) : *spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.07112 (mm) .*

Diamètre de défaut (mm)	Etat sain	0.01778	0.0356	0.05334	0.07112
Amplitude (dB)	-51.68	-77.69	-76.24	-81.57	-57.65

Tab(III-6) : évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bille.

La figure ci-dessous donne l'évolution de l'amplitude de raie de fréquence $f_b=105.87$ Hz en fonction de diamètre de défaut.

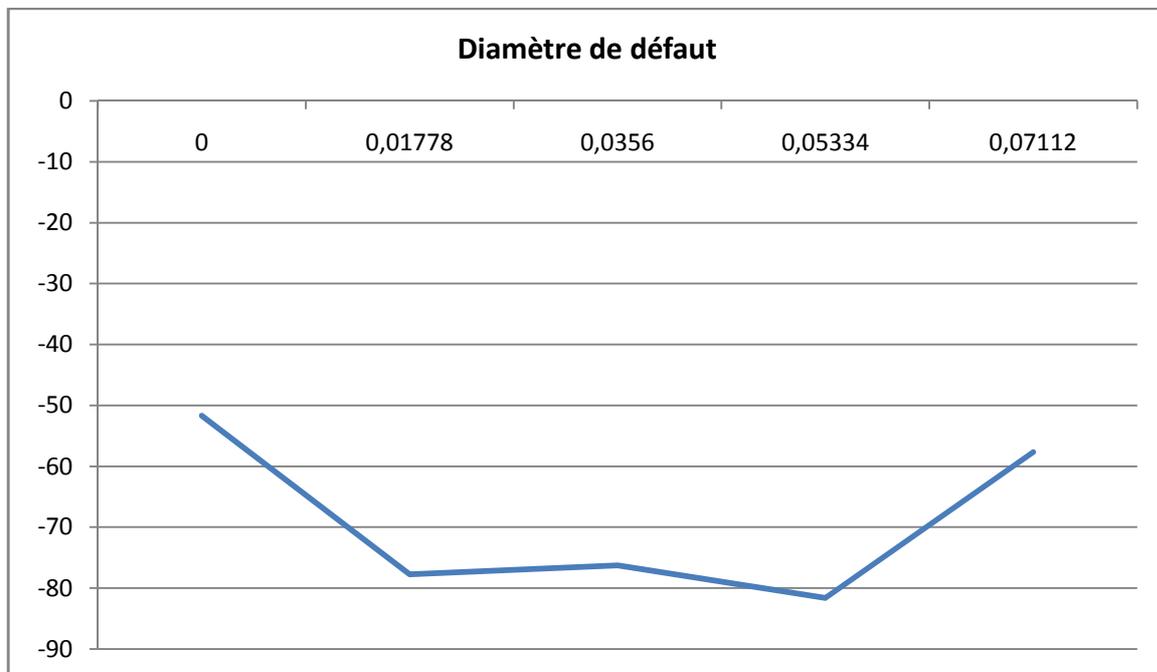


Figure (III-26) : évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bille.

D'après les résultats résumés dans le tableau et présentés dans la figure (III-26), l'évolution l'amplitude de la raie de fréquence caractéristique de défaut de la bille est perturbée. Des fois il augmente et des fois il diminue.

V. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthode de traitement du signal utilisable pour la surveillance et le diagnostic de systèmes à l'aide de mesures vibratoire, pour la détection des défauts des roulements, cette méthode est l'analyse spectrale.

Dans cette partie on a analysé quelques signaux vibratoires des roulements à l'état sain et à l'état défaillant, afin de détecter et caractériser les défauts, ces signaux ont été obtenus du banc d'essai American et on les a étudiés dans un environnement Matlab, où on a suivi l'évolution de défaut en fonction de son diamètre.

Cette dernière est très efficace dans le diagnostic et la maintenance, car non seulement elle permet de détecter qu'il existe un défaut, mais elle permet aussi de définir et de caractériser le type de défaut, cette méthode est très adaptée à la détection des défauts qui génèrent un choc périodique.

CONCLUSION GENERALE

Avec les progrès technologiques considérables l'être humain est entouré d'outils, de machines et de systèmes de plus en plus sophistiqués. Cette complexité croissante des systèmes rend la tâche de diagnostic plus difficile et son accomplissement implique une grande perte de temps.

Le diagnostic des défaillances dans l'industrie est une solution qui avant tout, garde les employés loin des risques qui surviennent lors de l'apparition d'un défaut mécanique sévère et qui peuvent être dangereux, De même elle réduit les pertes en matières premières qui peuvent être endommagées à cause de la panne, et augmente la productivité de la chaîne de production.

Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver la cause d'une défaillance ou d'un défaut, il est défini par les instances internationales de normalisation comme étant un processus d'identification de la cause probable des défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

De manière générale, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers. Cette procédure nous permet d'avoir des informations sur l'apparition d'un défaut et sur sa provenance le plus rapidement possible. Les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70 .

En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications.

Dans ce mémoire nous avons intéressé au diagnostic des défauts lié aux roulements. Le roulement est l'un des éléments essentiels dans presque chaque machine tournante. Son intérêt réside sur le fait que cet élément forme un support de lien entre deux structures tout en facilitant leur mouvement en réduisant les forces de frottements entre eux. Le roulement dont on ne peut jamais négliger l'importance est l'élément le plus susceptible de tomber en panne dans une machine tournante, ce qui oblige une détection et un diagnostic précoce de ces pannes. Les défauts essentiels qui peuvent affecter un roulement sont : Le grippage dû à l'absence de lubrification, La corrosion due à un mauvais choix du lubrifiant, La corrosion de contact due au mauvais choix d'ajustements entre les bagues etc.

l'analyse vibratoire qui a donné des bons résultats depuis des années. Cette méthode est basée essentiellement sur le traitement des signaux vibratoires.

Le 1^{er} chapitre de notre travail a permis de donner une idée générale sur la constitution et la conception des roulements, on a aussi cité les différents types des roulements et les défauts qui peuvent les affecter en indiquant les défauts de chaque défaut.

Le 2^{ème} chapitre a été consacré à un état de l'art sur le diagnostic dans l'industrie, on a vu les étapes essentielles à suivre pour faire un diagnostic, puis on a présenté les différentes techniques de diagnostic, ou on a basé sur la technique qui utilise les outils de traitement de signal.

Le 3^{ème} chapitre a été divisé en deux parties, la première c'était un rappel relatif au traitement de signal (signal, échantillonnage, type des signaux, théorème de Shannon), puis on a parlé suffisamment sur l'analyse spectrale qui est la transformée de Fourier en indiquant le principe de détection des défauts des roulements par cette analyse.

Dans la 2^{ème} partie on a fait une simulation sous Matlab dans le but d'extraire des signatures spectrales d'un roulement à l'état sain (fonctionnement normal), et à l'état défaillant. Une comparaison a été faite entre le spectre de référence et les spectres des états défaillants afin de suivre l'évolution de chaque défaut d'un élément de roulement en fonction de son diamètre.

La méthode d'analyse spectrale est très efficace pour le diagnostic des pannes surtout lorsque on parle des défauts liés aux éléments des machines tournantes qui produisent des chocs périodiques comme les roulements, les engrenages...

Cette méthode est rapide car il suffit juste d'avoir le signal vibratoire en lui caractérisant dans le domaine fréquentiel (transformée de Fourier) afin d'obtenir son spectre, puis on le compare avec celui de référence, s'il y a des apparitions de nouvelles fréquences des défauts ou bien des modifications des amplitudes des raies des fréquences des défauts, cela signifiera qu'un défaut est apparu au niveau de roulement.

BIBLIOGRAPHIE

[1] :ISO Norme "Vibrations m mécaniques-Evaluation des vibrations des machines par mesurages sur les parties non tournantes".

[2] : SKF -<<catalogue technique France >>1981 .

[3] : AFNOR. Norme AFNOR X 60 - 010. Paris Afnor(1990).

[4] :Q. Meng, L. Qu, Rotating machinery fault diagnosis using Wigner distribution, Mechanical Systems and Signal Processing, pp 155-166, 1991.

[5] : SKF : fournisseur de produits et de solutions sur les marchés des roulements, des systèmes de lubrification, de la mécatronique, de l'étanchéité et des services.
<http://www.skf.com/> .

[6] :ISO Norme "Vibrations m mécaniques- Evaluation des vibrations des machines par mesurages sur les parties non tournantes".

[7]: Gilles DUDRAGNE, Daniel GIRODIN'application of a new model for calculating the fatigue life of rollig bearings.SNR-roulement.1999.

[8] :www.skf.com/skf/support/html/dictionary.

[9] : «Contribution au diagnostic de machines électromécaniques exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée». Thèse de Doctorat 10 Mars 2009. [Alain Boulenger, Christian Pachaud] «Analyse vibratoire en maintenance».

[10] : CHIEMENTIN Xavier thèse de doctorat en mécanique «Localisation et quantification des sources vibratoires dans le cadre d'une maintenance préventive conditionnelle en vue de fiabiliser le diagnostic et le suivi de l'endommagement des composants mécaniques tournants : application aux roulements à billes»octobre 2007.

[11] :Breneur Claire « Éléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenage et de roulements », Thèse de l'INSA de Lyon, Décembre 2002.

[12]:Ericssona Stefan, NiklasGripa, ElinJohanssona, Lars-Erik Perssona, Ronny Sjobergb, Jan-OlovStr .ombergc : (Towards automatic detection of local bearing defects in rotating machines). Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) 509–535

[13]:KiralZeki, HiraKaragulle :(Vibration analysis of rolling element bearings with various defects under the action of an unbalanced force).MechanicalSystems and Signal Processing 20 (2006) 1967–1991.

[14]: Boulenger A, Pachaud C : « Aide mémoire : Surveillance des machines par analyse des vibrations ». Edition Dunod, Paris 2009.

[15]:Venkatasubramanian V, Rengaswamy R. Yin K., Kavuri S., "a review of process fault detection and diagnosis part quantitative model-based methods", Computer and Chemical Engineering, 2003.

[16] : Zwingelstein, G., (1995).Diagnostic des défaillances : Théorie et pratique pour les systèmes industriels, Editions Hermès.

[17] : BOUTICHE hamza(2015) « modélisation et diagnostic d'un réducteur de vitesse à un seul étage par analyse cepstrale »Thèse de master présenté à UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES

[18] :M. ZEMOURI, « contribution a la surveillance des systèmes de production a l'aide desréseaux de neurones dynamiques : application a la maintenance »,Thèse de doctorat présenté à l'université de Franche-Comte, France.2003.

[19] :D'RAHMOUNEChemseddine (2011), « Analyse et traitement du courant statoriquepour ladétection des défauts dans les systèmes électromécaniques ».Mémoire de magister présentéUNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES.

[20]: Frank, P.M., (1990).Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge Based Redundancy – A survey and New Results, Automatica, Vol. 26, pp. 459-474.

[21]:Leo H. Chiang, Evan L. Russell, et Richard D. Braatz (2001). Fault detection and diagnosis in industrial systems. New York : Springer-Verlag, 2001.

[22]:R. Isermann (1993). Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing - tutorial paper. Automatica, 29(4) :813-835, 1993.

[23]: Frank, P.M., (1990).Fault Diagnosis in Dynamic Systems UsingAnalytical and Knowledge Based Redundancy – A survey and New Results, Automatica, Vol. 26, pp. 459-474.

[24]: J. Gertler (1997). Fault detection and isolation using parity relations. *Control Engineering Practice*, 5(5) :653–661, 1997.

[25] :Dubuisson, B., E. Boutleux, P. Dague, T. Denoeux, E. Didelet, Y. Gandvalet et M. Masson (2001). *Diagnostic, Intelligence Artificielle et reconnaissance de formes*, Ed. Hermes.

[26] : buivietphuong (2007). « Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite. Application à l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide ». Thèse de doctorat à l'INPGRENOBLE .

[27]: Ballal M. S., Khan Z. J., Suryawanshi H. M., Sonolikar R. L. (2007), « Adaptive neural fuzzy inference system for the detection of inter-turn insulation and bearing wear faults in induction motor », *IEEE Transaction on Industry Electronics*, vol. 54, n°1, p. 250-258, 2007.

[28]: Zidani F., Diallo D., Benbouzid M. E. H., Nait-Said R. (2008), « A fuzzy based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage-fed PWM inverter induction motor drive », *IEEE Transaction on Industry Electronics*, vol. 55, n°2, p. 586-593, Feb. 2008.

[29]: babakvaseghi, (2009), contribution à l'étude des machines électriques en présence des défauts entre-spires, modélisation – réduction du courant du défaut. Thèse de doctorat présentée à l'institut national polytechnique de lorraine.

[30]: Mr. TOUAFEK Ishak « Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L'EMD et des ondelettes (WT) » Mémoire de magister présenté à l'UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF UFAS (ALGERIE).

[31] : Boullenger, A., & Pachaud, C. "Diagnostic vibratoire en maintenance préventive", Dunod (1998).

[32] : Cousinard O. " Contribution à l'étude et au développement d'un système intégré de suivi de l'endommagement des composants mécaniques sur machines tournantes : Application au développement et au choix des outils d'analyse et de mesure vibratoire " Thèse de doctorat de l'Université de Reims (2002).

[33]: Ville J., « Théorie et applications de la notion de signal analytique », *Câbles et transm.*, 2ème A., N°1, 1948, pp. 61-74.

[34] : Flandrin P., « Temps-fréquence », traité des nouvelles technologies, coll. Hermes 1993.

[35] : Choy F.K, Polyshchuk V., Zakrajsek J. J. et al., « Analysis of the effects of surface pitting and wear on the vibration of a gear transmission system », *tribology international*, vol. 29 N°1 1996, pp.77.

[36]:Djouada Mohamed : « Etude des performances de la classification par couplage réseaux de neurones artificiels (RNA) – algorithmes génétiques (AG) : application au diagnostic vibratoire ». Thèse magister UFAS. 2008.

[37] : james l. crowley, «TRAITEMENT DU SIGNAL», 8 octobre 2001.

[38]: ADBI ZOHRA (2010), « étude des effet vibratoires sur la durée de vie de roulement a rouleaux » Mémoire de magister présenté à BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA.

[39]: Serge Dos Santos «COURS DE TRAITEMENT DU SIGNAL» École Nationale d'Ingénieurs du Val de Loire Année 2008-2009.

[40] : Schenk S A « vibrations équilibrage sur le site : Application à la maintenance industrielle ». Edition Schenk S A. 1994.

[41]: Dron J.P., " Elaboration et adaptation d'outils pour l'étude et le suivi de L'endommagement de composants mécaniques par analyse vibratoire ", Thèse de Doctorat de l'Université de Reims (1995).

[42] : <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/home>.