



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Machine Electrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Berretima Mohammed Walid

Le : samedi 6 juillet 2019

Analyse vibratoire pour la détection et la diagnostic des défauts de roulement en utilisant le kurtosis spectral

Jury :

| | | | | |
|-----|-------------|-----|----------------------|------------|
| Dr. | Laala Widad | MCB | Université de biskra | Rapporteur |
| Dr. | Saadi Aicha | MCA | Université de biskra | Président |
| Dr. | Rahwa Naima | MCA | Université de biskra | Examineur |



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Machine Electrique

Présenté et soutenu par :
Berretima Mohammed Walid

Le : samedi 6 juillet 2019

Analyse vibratoire pour la détection et la diagnostic des défauts de roulement en utilisant le kurtosis spectral

Présenté par :
Berretima Mohammed Walid

Avis favorable de l'encadreur :
Dr. Laala Widad *signature*

Avis favorable du Président du Jury
Saadi Aicha *Signature*

Cachet et signature

Dédecas

Dédecas

Je dédie ce travail à

Mes parents

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude. Mon père, La miséricorde de Dieu sur lui qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.

Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit

Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de vous.

Toute la famille BERRETIMA

A vous mes chers frères **Adel** et **Ali** et **Mounir** et **Rached** et mes chers sœurs **Radhia**, **Meriem**, **Randa** et la petite **Djamila** et mes belles sœurs **Fatima Zohra** et **Soumia** et **Ghalia** et leur chers enfants **Iyad Younes Mohamed**, **Yacine** et **Aya**, **Nourcine** et **Nedjla** exemple de soutien, de courage et de générosité.

Mes chers amis **Sallah**, **Abbas**, **Nabil**, **Tarek**, **Hichem**, **Sohayeb**, **Hako**, **Saleh**, **Sid Ahmed**, **Abd Elbasset**, **Omar**, **Bashi**, **Messaoud**, **Saddam**, **Lassad**, **Djalil** Et tous ceux qui ont visité la chambre **L38** ceux qui n'ont pas mentionné son nom de près ou de loin sans oublier groupe will you marry me chacun son nom et surtout la promo machine électrique 2019 à qui je souhaite le succès et le bonheur,

Pour l'amitié qui nous a toujours unis et les bons moments que nous avons passés ensemble.

Remerciements

Le grand remerciement revient à Dieu qui m'a donné la force et le courage à réaliser et terminer ce modeste travail.

Je voudrais exprimer ma gratitude envers ma chère famille surtout mon père la miséricorde de dieu sur lui et ma mère , pour tout ce qu'il a fait pour moi

Je tiens à remercier vivement mon encadreur

Dr. Laala Widad pour m'avoir encadré encouragé

et conseillé durant la période du mémoire.

Je remercie tout le personnel Enseignant du

département Génie Electrique.

Par la même occasion, je remercie vivement tous mes amie sans exception, ainsi que tous les personnes qui de près ou de loi, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Berretima Mohammed Walid

Résumé

L'usure des roulements est l'une des principales causes de défaillance dans les machines tournantes. La technique la plus utilisée pour la surveillance et le diagnostic des roulements est l'analyse des vibrations. Cette technique connaît un grand succès pour la surveillance des machines tournantes. Toutefois, cette technique permet difficilement une détection précoce à moins d'un traitement sophistiqué du signal vibratoire autour des résonances, et par conséquent détecte plus souvent le défaut à un stade avancé, lorsque les fréquences de roulement se manifestent clairement.

Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale sur l'application des mesures vibratoires du roulement par différentes méthodes : analyse temporelle, spectrale

Mots clés: Analyse vibratoire, défauts des roulements, spectre

Abstract

Bearing wear is one of the main causes of failure in rotating machinery. The most used technique for monitoring and diagnosing bearings is vibration analysis. This technique is very successful for monitoring rotating machines. However, this technique makes it difficult to detect early unless sophisticated processing of the vibratory signal around the resonances, and therefore more often detects the defect at an advanced stage, when the frequencies of rotation are clearly manifested.

This work presents the results of an experimental study on the application of rolling vibration measurements by different methods: temporal, spectral analysis

Key words: Vibration analysis, bearing defects, spectrum

| N° d figure | nom de figure | N° de page |
|---------------------|--|-------------------|
| Figure. I.1 | Des Eléments Constitutifs D'un Roulement | 03 |
| Figure. I.2 | Différents Types Des Roulements | 05 |
| Figure. I.3 | Cinématique De Défaut De Roulement | 10 |
| Figure I.4 | Forces Agissant Sur Un Roulement A Billes | 11 |
| Figure I.5 | Vibration Générée Par Un Défaut Localisé De Roulement | 13 |
| Figure .I.6 | Les Points De Mesure Communément Adopter Pour Le Signal Vibration | 14 |
| Figure I.7 | Défaut Localisé Sur La Bague Externe | 15 |
| Figure I.8 | Défaut Localisé Sur La Bague Interne | 15 |
| Figure I.9 | Défaut Localisé Sur Une Bille | 16 |
| Figure. I.10 | Principaux Défauts Sur Le Roulement. | 17 |
| Figure. II.1 | Image Vibratoire Théorique D'un Défaut De Type Ecaillage Sur Bague Extérieure | 19 |
| Figure. II.2 | Image Vibratoires Théorique D'un Défaut De Type Ecaillage Sur Bague Intérieure. | 19 |
| Figure. II.3 | Image Vibratoires Théorique D'un Défaut De Type Ecaillage Sur Un Élément Roulant | 20 |
| Figure. II.4 | Image Vibratoires Théorique D'un Défaut De Type Déversement De Bague | 21 |
| Figure. II.5 | Défaut De Déversement Des Bagues D'un Roulement. | 21 |
| Figure. II.6 | Evolution Du Facteur De Crête Aux Différents Stades De Dégradation Du Roulement | 23 |
| Figure. II.7 | Evolution Du Kurtosis Aux Différents Stades De Dégradation Du Roulement | 24 |

| | | |
|-----------------------|--|----|
| Figure. III.1 | Signaux Vibratoires: (A) Roulement Sain, (B) Roulement Avec Défaut De Balle, (C) Roulement Avec Défaut De Cage Interne, (D) Roulement Avec Défaut De Cage Externe. | 28 |
| Figure. III.2 | Indicateurs Scalaires En Fonction De Défauts Pour (A) Forte Charge Et (B) Faible Charge. | 31 |
| Figure. III.3 | Évolution De Des Indicateurs Statistiques En Fonction Du Diamètre D'un Défaut Bague Externe | 32 |
| Figure. III.4 | Le Spectre Vibratoire Pour Un Roulement Avec Défaut D Bagues Interne | 35 |
| Figure. III.5 | Zoom De Spectre Vibratoire Pour Un Roulement Avec Défaut De Bagues Interne. | 35 |
| Figure. III.6 | Zoom De Spectre Vibratoire Pour Un Roulement Avec Défaut De Bagues Interne | 36 |
| Figure. III.7 | Le Spectre Vibratoire Pour Un Roulement Avec Défaut De Bagues Externe | 37 |
| Figure. III.8 | Zoom De Spectre Vibratoire Pour Un Roulement Avec Défaut De Bagues Externe. | 37 |
| Figure. III.9 | Zoom De Spectre Vibratoire Pour Un Roulement Avec Défaut De Bagues Externe | 38 |
| Figure. III.10 | Spectre De Vibration Avec Défaut De Bille(0.21inch) Pour Une Vitesse De 1796 Tr/Mn | 39 |
| Figure III.11 | Défaut De Bague Externe | 40 |
| Figure III.12 | Défaut De Bague Interne | 40 |
| Figure III.13 | Défaut De Ball | 41 |

| N° de tableau | Nom de tableau | N° de page |
|-----------------------|--|-------------------|
| Tableau. III.1 | Caractéristique De Roulement (DE). | 29 |
| Tableau III.2 | Indicateurs Statistiques Avec Roulements Sain Et ctueux Pour Une Vitesse 1796 Tr/Mn. | 29 |
| Tableau III.3 | Indicateurs Statistiques Avec Roulements Sain Et Défectueux Pour Une Vitesse 1725 Tr/Mn. | 29 |
| Tableau III.4 | Fréquences Caractéristiques Des Différents Eléments Du Roulement Pour Une Vitesse De 1796tr/Mn | 34 |
| Tableau III.5 | Fréquences Caractéristiques Des Différents Eléments Du Roulement Pour Une Vitesse De 1725tr/Mn. | 34 |

Table des matières

| | |
|-----------------------------|-----|
| Dédicace | I |
| Remerciement | II |
| Résumé | III |
| Abstract | IV |
| listes des figures | V |
| listes des tableaux | VI |
| Introduction générale | 1 |

Chapitre 01 : Etude Théorique Sur Les Roulements

| | |
|--|-----------|
| I.1. Introduction | 3 |
| I.2. Généralité sur les roulements | 3 |
| I.2.1 Géométrie et constitution d'un roulement | 3 |
| I.2.2 Caractéristiques des roulements | 4 |
| I.2.3 Différents types des roulements | 4 |
| I.3. Défaut de roulement | 9 |
| I.3.1 Cinématique de défaut de roulement et Fréquences caractéristiques | 10 |
| I.3.2 Causes principales des défauts | 12 |
| I.3.3 Différent type de défauts de roulements | 12 |
| I.4. Conclusion | 17 |

Chapitre 02 : Methodes De Traitement De Signale

| | |
|--|-----------|
| II.1 Introduction | 18 |
| II.2 Relation entre les défauts de roulements et les vibrations | 18 |
| II.3 Signatures vibratoires des principaux défauts | 18 |
| II.3.1 Défaut de type écaillage affectant la bague externe | 18 |
| II.3.2 Défaut de type écaillage affectant la bague interne | 19 |
| II.3.3 Défaut de type écaillage sur un élément roulant | 20 |
| II.3.4 Défauts de type déversement de bague | 20 |
| II.3.5 Remarque | 21 |
| II.4 Méthodes de détection des défauts de roulements | 22 |
| II.4.1 Principe de la mesure | 21 |
| II.4.2 Indicateurs vibratoires spécifiques scalaires aux roulements | 22 |
| II.4.2.1 Facteur de crête FC | 22 |
| II.4.2.2 : Facteur de défaut de roulement FD | 23 |
| II.4.2.3 Le kurtosis | 24 |
| II.4.2.4 Le facteur k | 25 |
| II.4.3 L'analyse spectrale | 25 |
| II.4.3.1 Analyse par la transformé de Fourier (FFT) | 25 |
| II.4.3.2 Analyse par le kurtosis spectrale (SK) | 25 |

| | |
|---|----|
| II.4.4 La transformée de Hilbert et le spectre d'enveloppe | 26 |
| II.4.5 La transformée en ondelettes et les paquets d'ondelettes | 27 |
| II.5 Conclusion | 27 |

Chapitre 03 : Résultats Expérimentaux

| | |
|---|----|
| III.1 Introduction | 28 |
| III.2 Analyse du signal vibratoire | 28 |
| III.2.1 Analyse dans le domaine temporel | 28 |
| III.2.2 Les caractéristiques du roulement | 29 |
| III.2.3 Limite de l'approche temporelle | 32 |
| III.3 L'approche fréquentielle | 32 |
| III.3.1 Analyse par la transformé de Fourier rapide | 32 |
| III.3.2 Analyse par spectrale kurtosis | 37 |
| III.4. Conclusion | 39 |
| Conclusion générale | 40 |
| Bibliographies | 41 |

Introduction générale

Les machines tournantes à basses vitesses peuvent être considérées comme des éléments essentiels dans la chaîne de production. Elles sont généralement de grandes tailles avec de hautes inerties de rotation. Le roulement est un des organes mécaniques les plus sensibles des machines tournantes dans des conditions idéales d'utilisation.

Les défauts dans les roulements à billes sont l'une des raisons principales des défaillances des entraînements électriques et la réduction de leur durée de vie. L'analyse et le traitement des grandeurs mesurables dans le système électrique, notamment des vibrations et des courants statoriques, a pris une place prépondérante dans les approches de détection et diagnostic de défauts des roulements. L'analyse des signaux vibratoires temporels permet de détecter la présence du défaut à partir des indicateurs scalaires. L'analyse fréquentielle permet d'identifier l'élément défaillant du roulement à partir des fréquences caractéristiques générées par le défaut. En effet, quatre fréquences caractéristiques sont générées par le roulement défaillant en fonction de la localisation du défaut, à savoir sur l'une des bagues, sur les billes ou la cage. Ces fréquences peuvent être fournies par le constructeur ou estimées analytiquement à partir des considérations cinématiques.

L'utilisation d'analyse vibratoire pour surveiller des machines opérant à basses vitesses est une technique développée depuis un bon nombre d'années. Pour cela on constate que la méthode la plus communément utilisée dans le suivi d'un défaut de roulement est l'analyse vibratoire.

Ce travail présente une étude sur la surveillance des défauts des roulements par analyse vibratoire spectrale kurtosis [1].

Ce mémoire est organisé en trois chapitres répartis comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous allons rappeler le contexte de notre étude : Une synthèse très générale sur la constitution du roulement, les différents types de roulement, les défauts principaux qui peuvent affecter un roulement et finalement les fréquences caractéristiques des défauts.

- Le deuxième chapitre sera consacré à la relation entre les défauts de roulements et les vibrations et présente quelques techniques pour analyser et traiter les signaux vibratoires en vue de la détection des défauts de roulements.

Introduction Général

- Le troisième chapitre regroupera les résultat expérimentaux. Tout d'abord, nous avons débuté notre étude par l'analyse temporelle ensuite nous allons appliquer deux techniques d'analyse vibratoire : la transformé de Fourier rapide et le kurtosis spectrale.

Enfin, nous clôturons notre travail par une conclusion.

I.1. Introduction

En mécanique, un roulement est un dispositif destiné à guider un assemblage en rotation, c'est-à-dire à permettre à une pièce de tourner par rapport à une autre selon un axe de rotation défini. Le roulement est donc un palier. Par rapport aux paliers lisses, le roulement permet d'avoir une très faible résistance au pivotement tout en supportant des efforts importants. Nous pouvons en trouver dans les machines à café, les skateboards, les trottinettes, les machines électriques.....

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 de choix des roulements, les défauts principaux qui peuvent affecter un roulement et finalement les fréquences caractéristiques des défauts.

I.2. Généralité sur les roulements:

I.2.1 Géométrie et constitution d'un roulement

La majorité des roulements sont composés d'une bague intérieure et d'une bague extérieure, d'éléments roulants (billes ou rouleaux), et d'une cage. Les éléments roulants situés entre les deux bagues du roulement sont maintenus à égale distance les uns des autres par la cage qui les guide et facilite leur rotation.

La surface sur laquelle roulent les éléments roulants est appelée « chemin de roulement ». Elle supporte les charges appliquées aux roulements. En général, la bague intérieure est montée sur l'arbre et la bague extérieure dans le logement.



Fig I.1 Des Eléments Constitutifs D'un Roulement[1].

I.2.2 Caractéristiques des roulements

Les roulements sont produits sous de diverses formes et variantes ayant chacune des caractéristiques distinctes.

En comparaison avec les paliers lisses, les roulements ont les avantages suivants :

- Le couple de frottement au démarrage est plus faible et de plus n'est que légèrement supérieur au couple de frottement dynamique.
- Ils sont fabriqués suivant des normes internationales, sont interchangeables et facilement disponibles.
- Le graissage est simple et la quantité de graisse consommée très faible.
- En règle générale, ils acceptent à la fois des charges radiales et des charges axiales.
- Leur utilisation à basse comme à haute température est possible.
- La rigidité des roulements peut être augmentée par un pré charge.

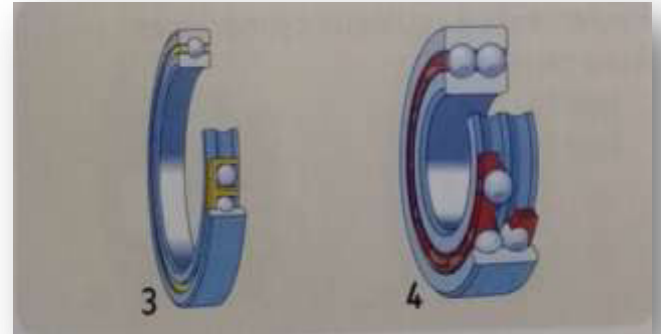
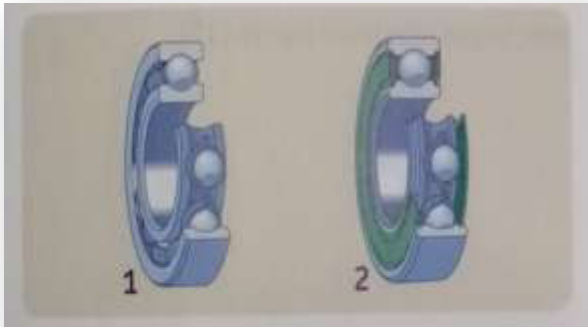
I.2.3 Différents types des roulements

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 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 bagues. Le problème d'assemblage du roulement n'est alors plus le même.

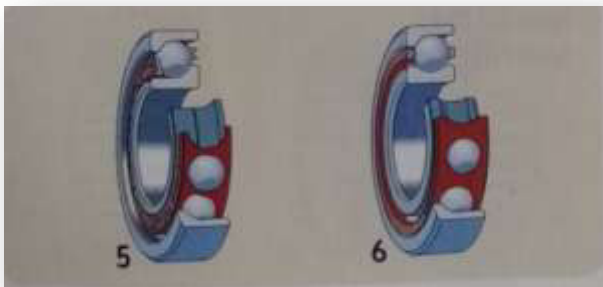
Le roulement à rouleaux supporte un effort radial supérieur par rapport au roulement à billes, car le contact des éléments roulants avec les bagues est linéaire. On utilise le roulement à rouleaux pour augmenter la surface de contact afin de minimiser les contraintes ou les pressions sur les pistes. 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.[2]

Différents type de roulements (1-25) [3] :

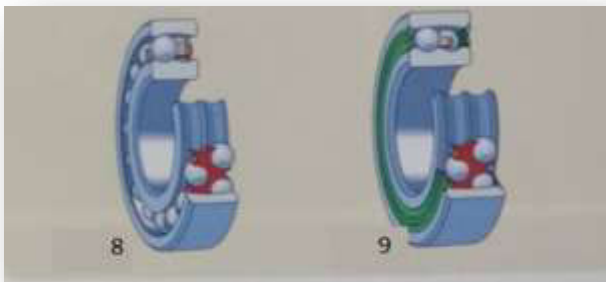
La Figure I.2 Présente :



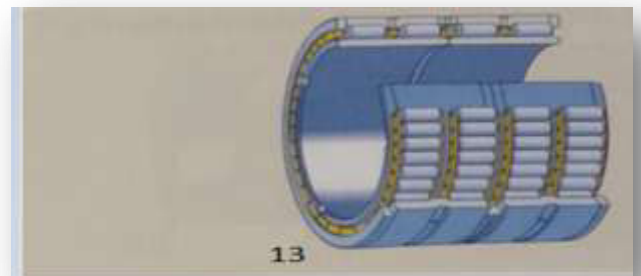
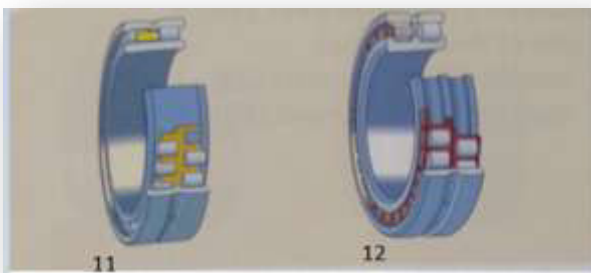
- (1,2,3 et 4) les roulements rigides à billes à une rangée avec ou sans encoches de remplissage , Modèle de base ouvert (1) avec flasque, et avec joints à frottement (2) avec rainure et/ou sans segment d'arrêt . à une rangée avec section fixe modèle de base ouvert(3) avec joints à frottement à deux rangées(4)



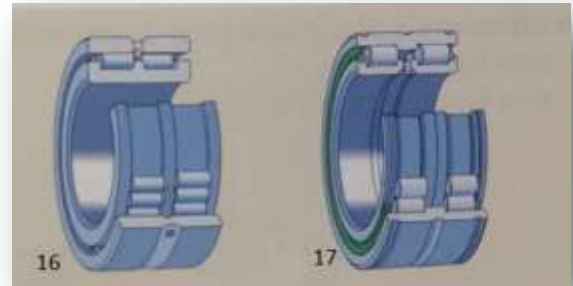
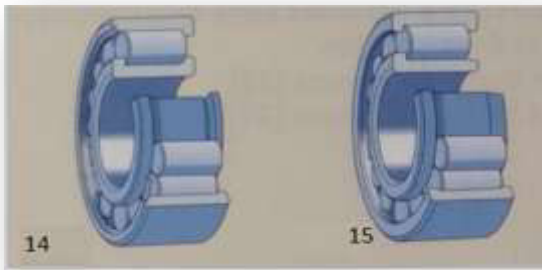
- (5, 6 et 7) présente roulements à billes à contact oblique à une rangée , exécution de base pour montage simple modèle pour appariement universel (5) exécution de précision. exécution standard pour montage simple (6) modèle pour appariement universel ensembles de roulements appariés. A deux rangées , avec bague intérieure en une pièce (7) modèle de base ouvert avec flasque avec joints à frottement avec bague intérieure en deux pièces.



- **(8, 9, et 10)** présente roulements à rotule sur billes à alésage cylindrique ou conique modèle de base ouvert (8) Avec joints à frottement (9) Avec bague intérieure élargie (10)

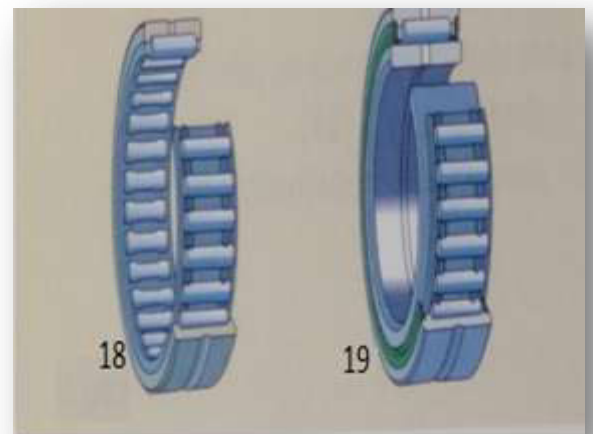


- **(11,12 et 13)** présente roulements à rouleaux cylindriques à deux rangées , à alésage cylindrique ou conique Type NNU(11) Type NN(12) à quatre rangées , à alésage cylindrique ou conique Modèle ouvert(13) avec joints à frottement.

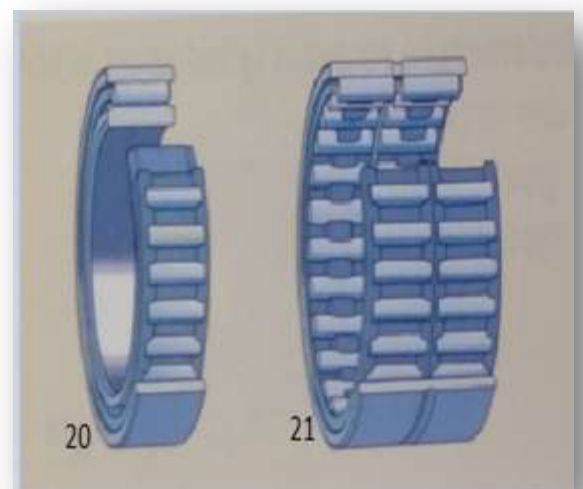


- (14, 15, 16 et 17) présente roulement à rouleaux cylindriques jointif à une rangée Type NCF(14) Type NJG(15) à deux rangées avec épaulements fixes sur la bague intérieure(16) avec épaulements sur les bagues intérieure et extérieure avec joint à frottement(17).

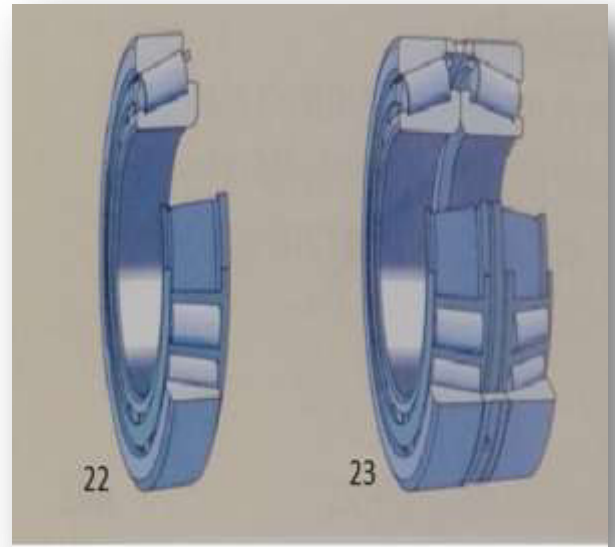
- (18,19) présenté roulements à aiguilles avec épaulements à une et deux rangées sans bague intérieure (18) avec bague intérieure modèle de base ouvert avec joint à frottement(19)



- (20,21) présente roulement à aiguilles sans épaulements à une et deux rangées avec bague intérieure (20) sans bague intérieure (21).



- (22,23) présente roulements à rouleaux conique à une rangée Roulements simples(22) Ensembles de roulements appariés Disposés en X(23) Disposés en O Disposés en T.



- (24,25) présente roulements CARB à rouleaux toroïdaux à alésage cylindrique ou conique Modèles de base ouverts à jeu de rouleaux guidées par la cage (24) à rouleaux jointifs avec joints à frottement(25)

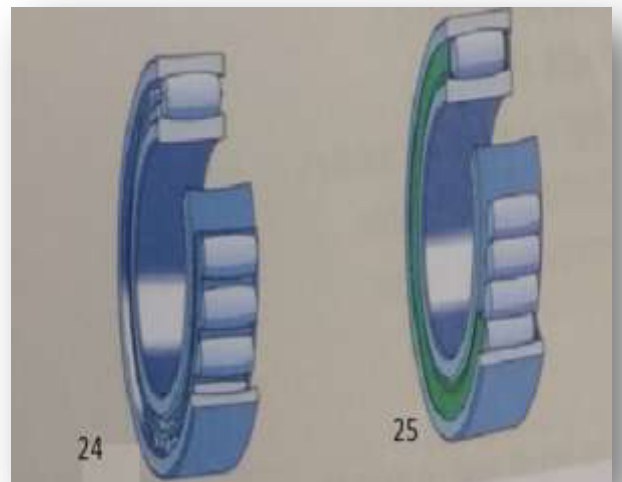


Fig I. 2 Différents Type De Roulements (1-25) [3]

I.3. Défaut de roulement :

Les défauts de roulements à une incidence sur les vibrations du système, car les roulements sont des organes de liaisons et de rigidité. Les vibrations générées au sein d'un roulement sont de faible amplitude, ressemblant à un bruit aléatoire. Lors de l'apparition d'une avarie, une impulsion se produit chaque fois que le défaut participe à un contact. L'avarie a donc une fréquence caractéristique qui dépend de la géométrie du roulement et de l'emplacement de l'écaillage (sur la bague intérieure, sur la bague extérieure ou sur un élément roulant). Cependant, les amplitudes des vibrations induites par les défauts ne sont pas d'un niveau très élevé. Elles sont noyées parmi les composantes plus énergétiques du système comme celles des engrenages ou celles liées à un déséquilibre ou un balourd [4].

I.3.1 Cinématique de défaut de roulement et Fréquences caractéristiques

Chaque type de défaut a sa propre signature et est caractérisé par une fréquence fondamentale, qui peut être calculée à partir de la structure et des dimensions du roulement et de la fréquence de rotation de l'arbre. En analyse vibratoire, il est donc possible d'observer certaines bandes de fréquences et d'identifier le type de défaut. Les expressions analytiques de ces fréquences caractéristiques sont développées d'après et qui sont données les équations (I.1.) à (I.4) [5] :

➤ Défaut sur la bague extérieure

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (I.1). Dans la littérature, pour une charge constante, on trouve que ce type de défaut engendre une modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre autour de la fréquence de défaut, cette dernière est donnée par:

$$f_{BE} = \frac{nf_r}{2} \left(1 - \frac{d \cos \beta}{d_e} \right) \quad (\text{I.1})$$

➤ Défaut sur la bague intérieure

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (I.2). Cette fréquence est modulée par sa fréquence de rotation de l'arbre (bandes latérales autour de la raie de défaut).

$$f_{BI} = \frac{nf_r}{2} \left(1 + \frac{d \cos \beta}{d_e} \right) \quad (\text{I.2})$$

➤ **Défaut sur la cage**

La fréquence de caractéristiques d'un défaut de cage est donnée par l'équation (I.3) :
Cette fréquence représente la fréquence de rotation de la cage.

$$f_{cage} = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d \cos \beta}{d_e} \right) \quad (I.3)$$

➤ **Défaut sur l'élément roulant :**

La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau), sur la bague externe ou sur la bague intérieure, est donnée par l'équation (I.4) :

$$f_{bille} = \frac{d_e f_r}{2d} \left(1 - \left(\frac{d \cos \beta}{d_e} \right)^2 \right) \quad (I.4)$$

Pour les roulements où le nombre de billes est compris entre 6 et 12, il a été montré que les fréquences vibratoires des défauts de la bague externe et interne peuvent être approchées à :

$$f_{BE} = 0.4n f_r.$$

$$f_{BI} = 0.6n f_r.$$

$$f_C = 0.4 f_r.$$

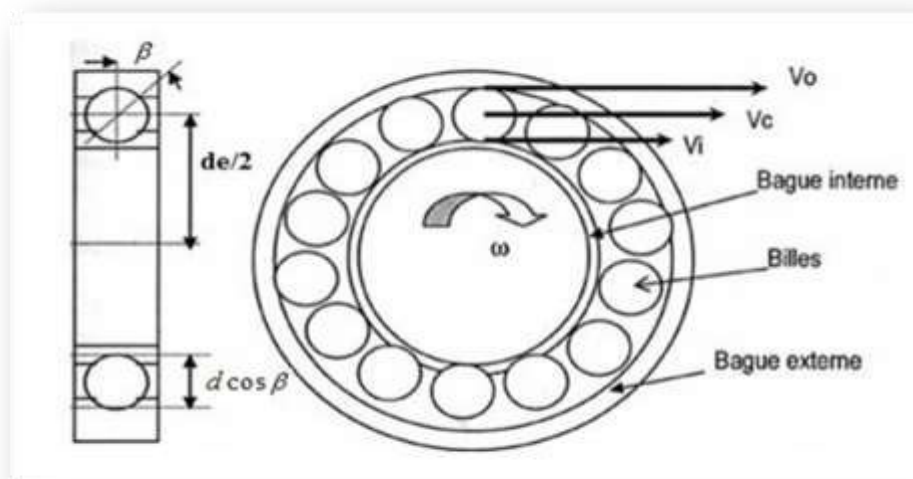


Fig. I.3 Cinématique De Défaut De Roulement [6].

Avec :

n : Nombre de bille.

d : Diamètre de billes [m].

d_e : Diamètre moyen du roulement [m] .

β : Angle de contact [rad].

f_r : La vitesse de rotation de partie tournante(ω) [tr/s].

La durée de vie d'un roulement s'exprime par le nombre de tours ou le nombre d'heure de fonctionnement à vitesse constante du rotor qu'il supporte avant l'apparition de défauts sur les bagues ou sur l'élément roulant.

Les logiciels édités par les constructeurs de roulements permettent de déterminer rapidement et sans calcul les fréquences de défauts des roulements de la machine surveillée.

I.3.2 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.

I.3.3 différent type de défauts de roulements [7]:

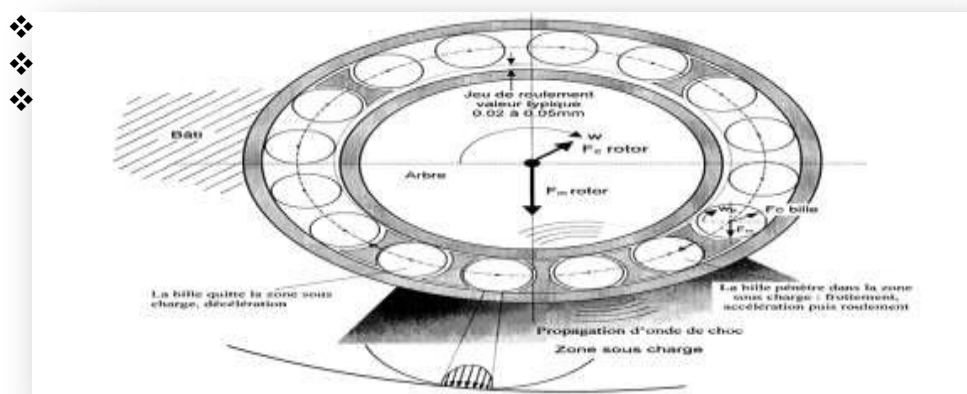


Fig I. 4 Forces Agissant Sur Un Roulement A Billes[7].

❖ **forces agissant sur un roulement à billes :**

La force centrifuge F_c due au balourd du rotor se superpose à la force statique F_s exercé par la masse du rotor sur le palier. On admet on général que la force centrifuge ne devrait pas dépasser 20% de la force due à la masse du rotor :

$$F_c = m_b \cdot \omega^2 \cdot r_b \quad (1.5)$$

$$F_s = 9.81 \cdot m_{rotor} / 2 \quad (1.6)$$

$$F_c \leq 0.2 F_s \quad (1.7)$$

$$m_b \cdot \omega^2 \cdot r_b \leq 0.2 \cdot (9.81 \cdot \frac{m_{rotor}}{2}) \quad (1.8)$$

Avec :

m_b : la masse de bille

ω : La vitesse de rotation de partie tournante (ω) [rad/s].

F_s : la force statique

F_c : La force centrifuge

Lorsque la bille pénètre dans la zone sous charge ,il y a un léger frottement ,accélération angulaire puis roulement de la bille . lorsque la bille quitte la zone sous charge ,il y a une décélération angulaire progressive de la bille puis que le roulement ne se fait plus.

❖ **Défaut localisé :**

Les roulements sont sans doute les organes les plus sensibles d'un parc de machines dans la plupart des cas, la dégradation se traduit par la formation d'irrégularités (écaillage) sur la surface des pistes, des billes ou des rouleaux.

La rotation des billes ou le passage de celles-ci sur un chemin de roulement endommagé produit des chocs. Ces chocs engendrent une vibration de type impulsionnelle comme représenté dans la figure ci-dessous. Ce sont des chocs périodique qui excitent un ou plusieurs modes de résonance des structures. Les fréquences propres des structures peuvent être très élevées, de l'ordre de 2 à 20kHz



Fig I .5 Vibration Générée Par Un Défaut Localisé De Roulement [7].

On peut déterminer les fréquences de passage des billes sur un défaut de bague interne, bague externe ou de bille par l'analyse spectrale de l'état d'un roulement. La localisation de ces fréquences nécessitent une connaissance de la géométrie du roulement et d'un accéléromètre permettant de faire des mesures jusqu'à 10 kHz au moins. La figure (I.6) présente les points de mesure communément adopter pour le signal vibration.



Fig I.6 Les Points De Mesure Communément Adopter Pour Le Signal Vibration[7].

❖ **Défaut localisé sur la bague externe :**

Le niveau de vibration est légèrement modulé par la fréquence de rotation du fait de la force centrifuge F_c qui fait varier la force résultante F_r sur le palier à roulement.

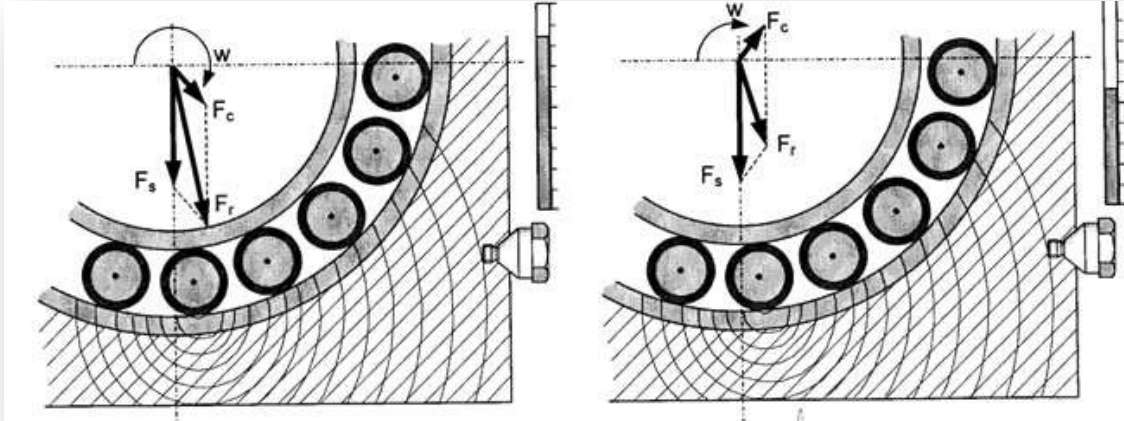


Fig I.7 Défaut Localisé Sur La Bague Externe[7].

❖ **Défaut localisé sur la bague interne :**

Le niveau de vibration est fortement modulé par la fréquence de rotation à cause du passage répété du défaut de bague interne dans la zone de charge.

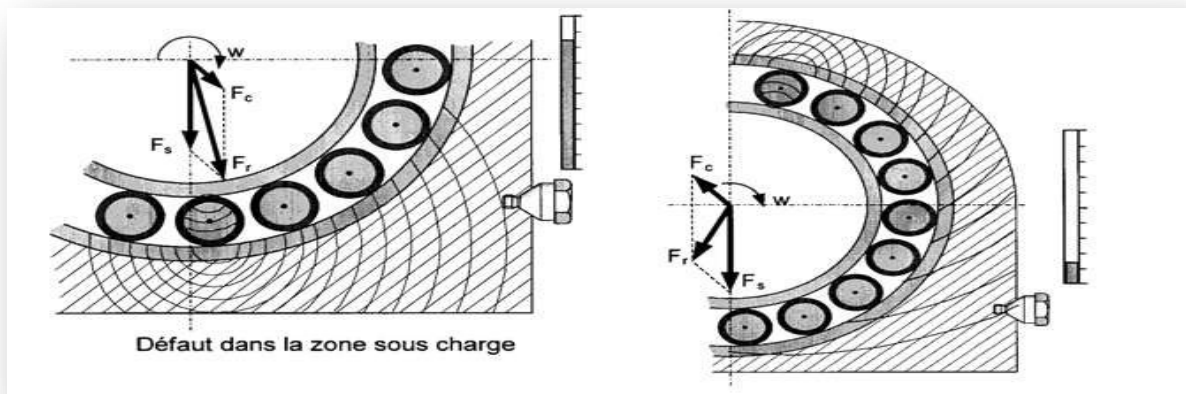


Fig I.8 Défaut Localisé Sur La Bague Interne[7].

❖ Défaut localisé sur une bille :

Le niveau de vibration est fortement modulé à cause du passage répété de défaut de bille dans la zone de sous charge . la fréquence de passage du défaut de bille dans la zone sous charge est égale la fréquence de rotation de la cage.

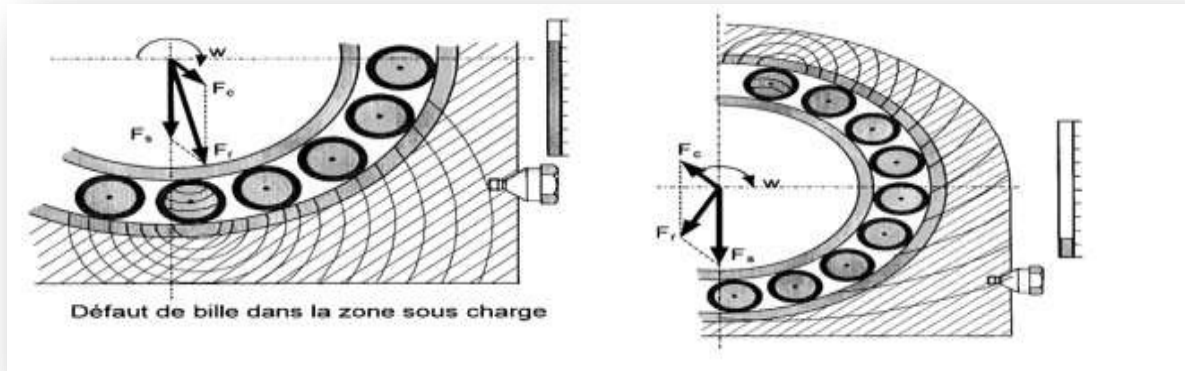


Fig I.9 Défaut Localisé Sur Une Bille[7].

❖ Des défauts généraux

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 désassures.
- 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 ex agrées 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.



Fig I.10 Principaux Défauts Sur Le Roulement.[2]

I.4.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur le roulement et ses caractéristiques. les roulements sont les organes en commun avec les machines tournantes, mais sont à l'origine d'une grand part des problèmes industrielle à cause de plusieurs facteurs. Nous avons donné un aperçu sur quelques défauts qui peuvent affecter les roulements, et nous avons spécifié les fréquences caractéristiques de chaque défaut.

II.1 Introduction

Des études statistiques ont montré que les pannes imputables aux roulements à billes sont prépondérantes quelle que soit la gamme de puissance des machines considérées. Selon les différentes sources citées, les pannes dues aux roulements représentent entre 40 et 50% des pannes totales, précédant les défauts statoriques et rotoriques. Il est donc logique, d'un point de vue industriel et scientifique, de concentrer les efforts de détection des pannes et de diagnostic de la machine asynchrone sur les roulements à billes.

Nous allons tout d'abord présenter la relation entre les défauts de roulements et les vibrations. nous verrons ensuite les signatures vibratoires des principaux défauts. nous présentons alors quelques techniques pour analyser et traiter les signaux vibratoires en vue de la détection des défauts de roulements.

II.2 Relation entre les défauts de roulements et les vibrations

Lorsqu'un défaut localisé apparaît en un point d'un des éléments du roulement, cela entraîne une vibration à la fréquence caractéristique associée à l'élément en défaut. En effet, si un défaut se situe sur le chemin de roulement d'une des bagues ou sur une bille, il se produit un choc mécanique à chaque fois que le défaut est confondu avec un point de contact bille/bague. Ces chocs répétés se traduisent alors par des vibrations. Par ailleurs, les vibrations faisant intervenir les fréquences des modes propres de la bague externe seront qualifiées de « haute-fréquence ». Lors de l'apparition de défauts, le signal vibratoire peut être modélisé par un train d'impulsions à la fréquence correspondant à la localisation du défaut. Les modes propres peuvent servir de résonateurs naturels permettant d'amplifier les effets vibratoires des défauts [8].

II.3 Signatures vibratoires des principaux défauts

II.3.1 Défaut de type écaillage affectant la bague externe :

Un défaut de type écaillage affectant la bague externe d'un roulement a pour image vibratoire spectrale un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence du défaut. À chaque composante de ce peigne, est associée une paire de bandes latérales, autour de la $k^{\text{ième}}$ fréquence caractéristique qui est donnée par l'équation (I.1), espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique importante (Fig. II.1).

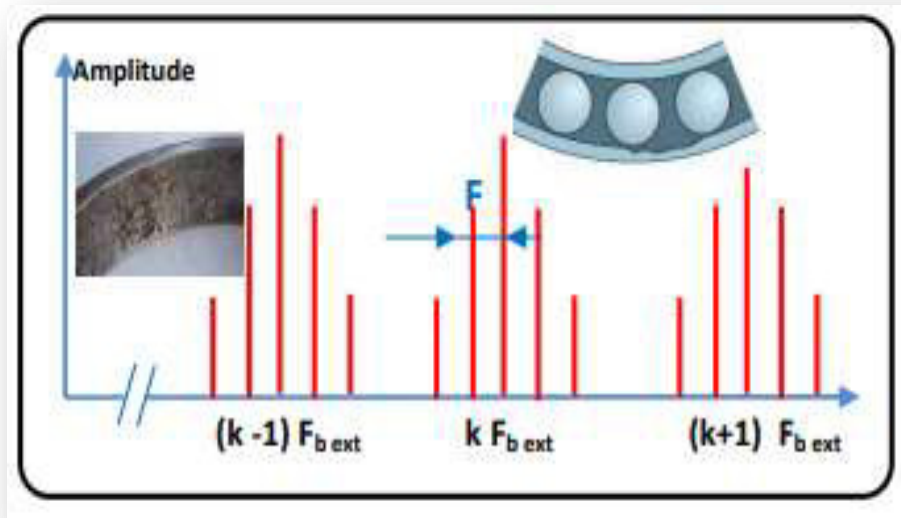


Fig II.1 Image Vibratoire Théorique D'un Défaut De Type Ecaillage Sur Bague Extérieure[12].

II.3.2 Défaut de type écaillage affectant la bague interne :

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image vibratoire spectrale un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales, autour de la $k^{\text{ième}}$ fréquence caractéristique qui est donnée par l'équation (I.2), espacées de la fréquence de rotation (Fig. II.2).

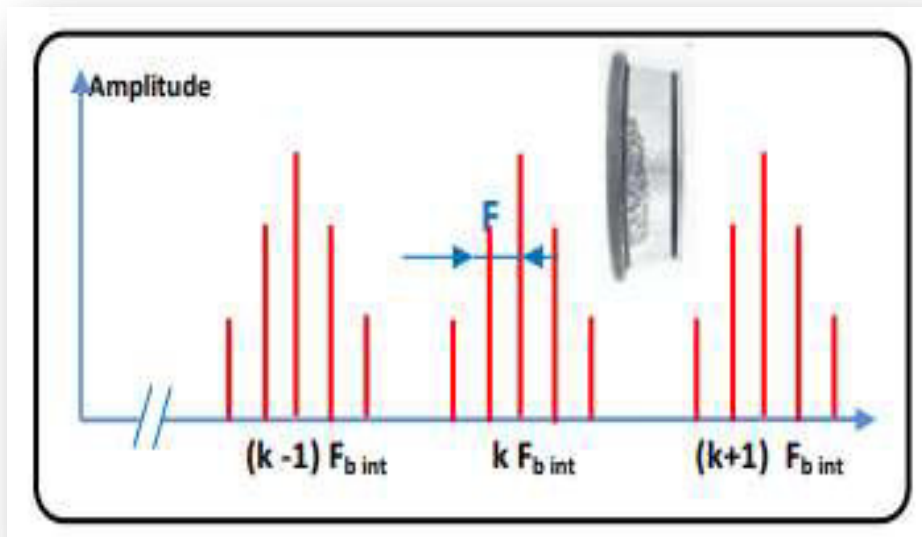


Fig II.2 Image Vibratoires Théorique D'un Défaut De Type Ecaillage Sur Bague Intérieure[12].

II.3.3 Défaut de type écaillage sur un élément roulant :

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant (bille, rouleau ou aiguille) a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales, autour de la $k^{\text{ième}}$ fréquence caractéristique qui est donnée par l'équation (I.4), espacées de la fréquence de la cage (Fig. II.3).

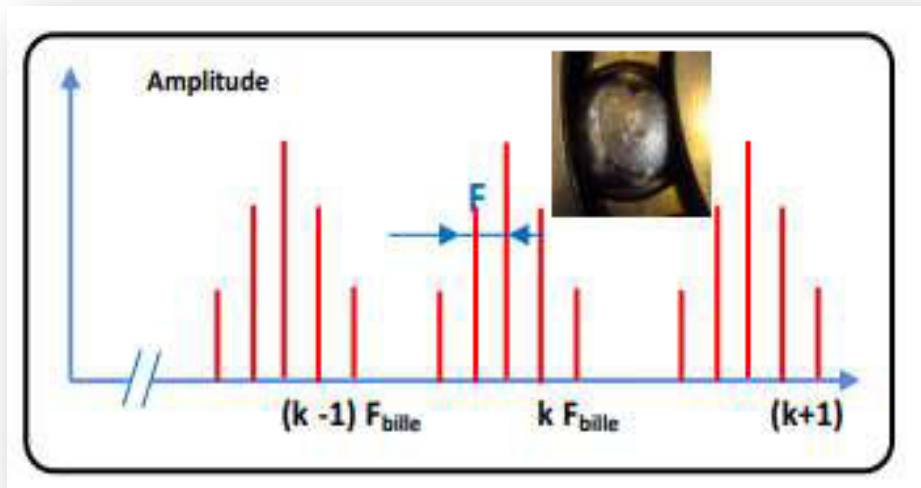


Fig II.3 Image Vibratoires Théorique D'un Défaut De Type Ecaillage Sur Un Elément Roulant[12].

II.3.4 Défauts de type déversement de bague :

Le défaut de type déversement de bague extérieure (Fig. II.4) s'exprime par une composante fondamentale d'amplitude élevée dont la fréquence correspond à la fréquence du défaut de la bague déversée, et par des composantes d'ordre supérieur d'amplitude très faible (Fig. II.5).

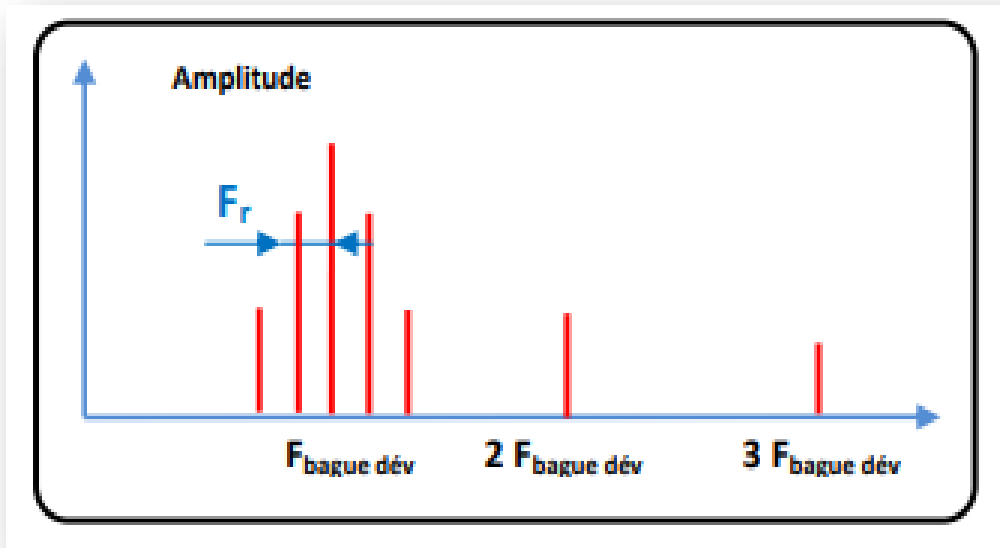


Fig II.4 Image Vibratoires Théorique D'un Défaut De Type Déversement De Bague[12].

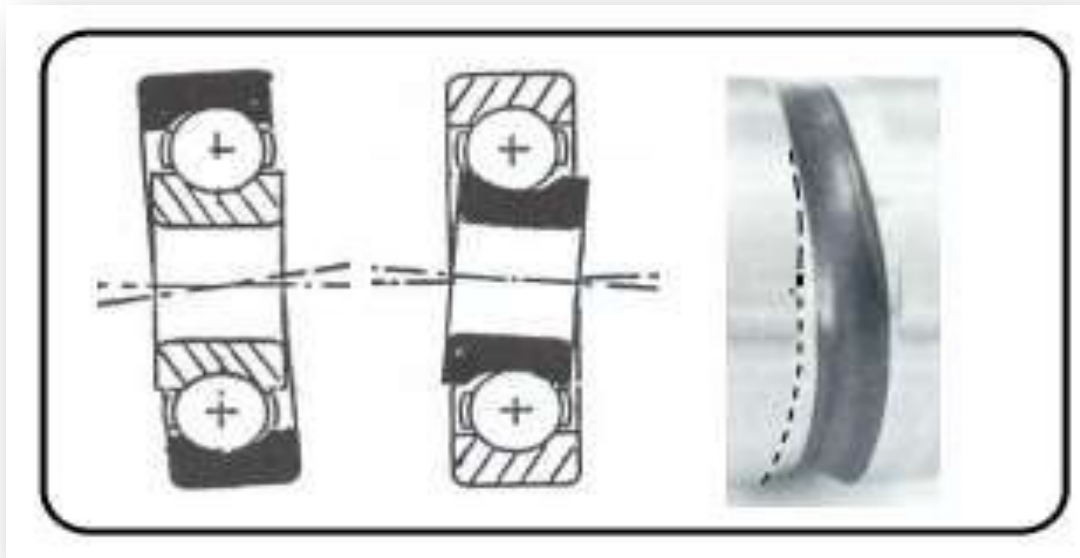


Fig II.5 Défaut De Déversement Des Bagues D'un Roulement[12].

II.3.5 Remarque :

Il ne faut pas confondre défaut de type écaillage et défaut de type déversement de bague. Le défaut de type écaillage est un défaut de type choc dont le spectre présente:

- ✓ de nombreuses composantes harmoniques jusqu'en hautes fréquences,
- ✓ les harmoniques d'ordre n généralement d'amplitude plus grande que la composante fondamentale.

Le défaut de type déversement de bague est un défaut de type vibration sinusoïdale dont le spectre présente:

- ✓ peu de composantes harmoniques, la composante fondamentale de la fréquence du défaut, nettement prépondérante par rapport à ses quelques harmoniques.

II.4 Méthodes de détection des défauts de roulements

II.4.1 Principe de la mesure :

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. De plus amples précisions sont disponibles dans les accéléromètres piézo-électriques sont de nature très sensible, ce qui permet une mesure efficace. Cependant, ils n'nécessitent un étalonnage très précis. Il en va de même pour les conditionneurs [9].

II.4.2 Indicateurs vibratoires spécifiques scalaires aux roulements :

La dégradation localisée d'un roulement se manifeste par un choc dur, périodique, apparaissant à la fréquence du contact situé au niveau de la détérioration.. Les vibrations induites sont des vibrations de type impulsionnel. L'interprétation des spectres de ces défauts sont parfois difficiles. Des méthodes spécifiques permettant d'obtenir, par des traitements particuliers, des valeurs globales significatives de la dégradation de roulement. Les indicateurs utilisant ces propriétés sont principalement le facteur de crête et le Kurtosis.

II.4.2.1 Facteur de crête FC:

C'est le rapport entre la valeur de crête et la valeur efficace de l'accélération :

$$FC = \frac{\text{Valeur de crête}}{\text{Valeur efficace(vib)}} = \frac{\max(|\text{vib}(n)|)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{vib}(n)^2}} \quad (\text{II.3})$$

avec :

vib: est le signal vibration.

Une vibration de type sinusoïdale aura un facteur de crête voisin de 0,707 alors qu'une vibration de type impulsionnel aura un facteur de crête beaucoup plus important. Un roulement neuf ou en bon état génère une vibration de faible amplitude, aussi bien en valeur crête qu'en valeur efficace (Fig. II.6) Le facteur de crête reste donc faible. Un défaut localisé génère une vibration d'amplitude crête forte et amplitude efficace faible, donc un facteur de crête important. Pour les défauts généralisés, les vibrations générées présentent des amplitudes crête et efficace fortes, donc, un facteur de crête faible. Le défaut majeur de cet indicateur est de présenter environ les mêmes valeurs à l'état neuf et en fin de vie de roulement.

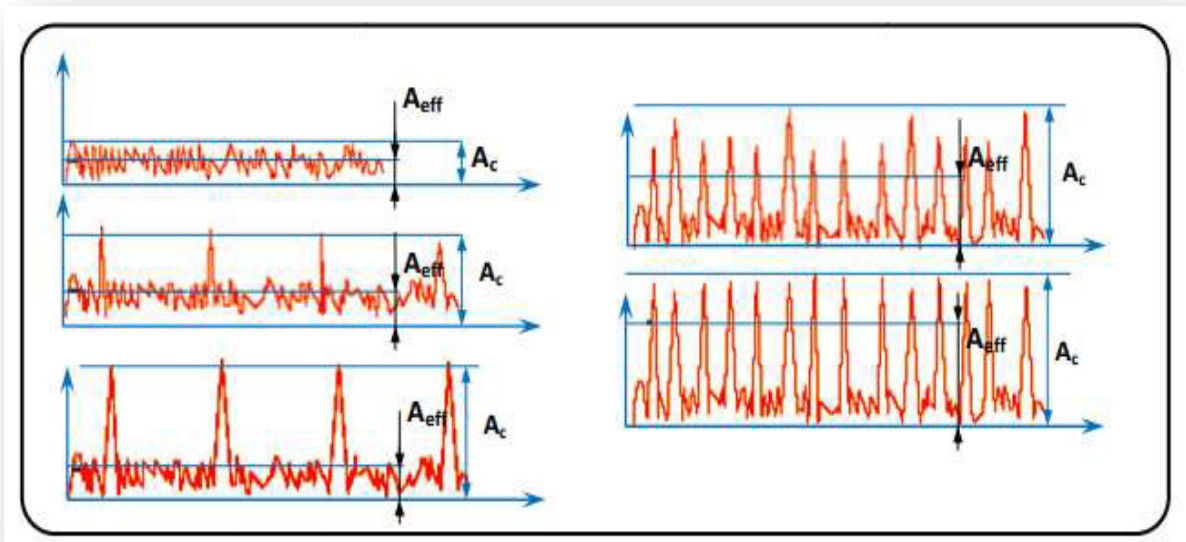


Fig II.6 Evolution Du Facteur De Crête Aux Différents Stades De Dégradation Du Roulement [12].

II.4.2.2 : Facteur de défaut de roulement FD :

Le facteur de défaut roulement est donné par l'équation ci-dessous:

$$FD = a \cdot FC + b \cdot V_{eff}(\text{Vib}) \quad (\text{II.4})$$

Combinant les indicateurs Facteur de Crête et Valeur efficace, il présente les avantages suivants :

- ✓ Facteur absolu.
- ✓ Détection précoce.
- ✓ Peu sensible aux conditions de fonctionnement.
- ✓ Valeur croissante sur les 3 phases de la dégradation.

- ✓ Utilisation simple et adaptée au diagnostic automatique.

L'augmentation du niveau du Facteur de Défaut peut être liée à un défaut de graissage du roulement. En l'absence d'historique d'évolution, on procédera à un test de graissage du roulement, le Facteur de Défaut chute généralement de manière importante de façon instantanée. Si le niveau du F.D reste stable à cette valeur dans les heures qui suivent l'opération, il s'agit sans doute d'un problème de graissage. Dans le cas contraire, il s'agit vraisemblablement d'une usure du roulement.

II.4.2.3 Le kurtosis :

Le kurtosis est une grandeur statistique permettant d'analyser le caractère « pointu » ou « plat » d'une distribution. Il s'agit d'un traitement statistique du signal temporel des vibrations, se basant sur la courbe de densité de probabilités de la répartition des niveaux vibratoires d'accélération. Un roulement en bon état engendre un signal vibratoire dont la distribution de l'amplitude est Gaussienne avec un Kurtosis voisin de 3. Pour un roulement dégradé, présentant des écaillages, des indentations ou des jeux importants, l'allure de la distribution de l'amplitude du signal est modifiée et le Kurtosis K est supérieur ou égal à 4.

$$\text{Kurtosis} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\text{vib}(n) - \langle n \rangle)^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\text{vib}(n) - \langle n \rangle)^2 \right]^2} \quad (\text{II.5})$$

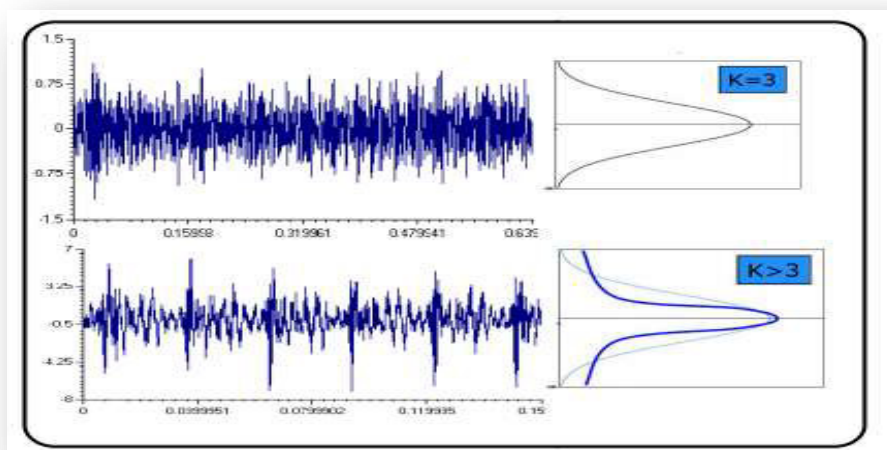


Fig II.7 Evolution Du Kurtosis Aux Différents Stades De Dégradation Du Roulement[12].

Le Kurtosis caractérise l'écrasement de la courbe de densité de probabilité du signal enregistré. Il est à noter que dans le cas d'une forte détérioration du roulement, l'allure de la

distribution de l'amplitude redevient gaussienne avec K voisin de 3 mais, aussi une augmentation importante de l'amplitude efficace. Comme pour le facteur de crête, il y a lieu de tenir compte simultanément de l'évolution des deux critères : Kurtosis et amplitude efficace.

II.4.2.4 Le facteur k :

Le facteur K , l'équation (II.6) doit augmenter avec l'usure du roulement. On pourra retenir que, dans tous les cas, sa valeur est multipliée par 10 entre la mesure effectuée pour le roulement sain et celle pour le roulement dégradé

$$k = \max(|vib(n)|) \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N vib(n)^2}. \quad (II.6)$$

II.4.3 L'analyse spectrale :

II.4.3.1 Analyse par la transformé de Fourier (FFT) :

La première méthode à investiguer pour détecter des harmoniques dans un signal est l'analyse spectrale. Mathématiquement, la transformée de Fourier (TF) est définie comme un produit scalaire. Considérons un signal réel déterministe $x(t)$ à énergie finie. La transformée de Fourier du signal $X(f)$ est définie par l'équation (II.7), son calcul pour un signal discret $x(k)$ de longueur N étant donné en (II.8). L'analyse spectrale est largement utilisée dans le cadre de l'analyse vibratoire des roulements à billes pour détecter la présence éventuelle de défauts. De manière générale, le module de la transformée de Fourier est analysé. Dans le cadre du diagnostic des machines électriques, certains travaux analysent la phase de la transformée de Fourier mais son interprétation se révèle délicate.

$$TF_F\{x(t)\} = X(f) = \langle x(t), e^{2\pi jft} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi jft} dt. \quad (II.7)$$

$$X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-\frac{2\pi jmk}{N}}. \quad (II.8)$$

II.4.3.2 Analyse par le kurtosis spectrale (SK) [10]:

Le kurtosis spectral (SK) est un outil statistique qui peut indiquer et identifier un comportement non stationnaire ou non gaussien dans le domaine fréquentiel, en prenant:

- Petites valeurs aux fréquences où seul le bruit gaussien stationnaire est présent
- Valeurs positives élevées aux fréquences où se produisent des transitoires

Cette capacité fait de SK un puissant outil de détection et d'extraction de signaux associés à des défauts dans les systèmes mécaniques en rotation. SK peut à lui seul identifier des caractéristiques ou des indicateurs conditionnels pour la détection et la classification des pannes. En tant que prétraitement pour d'autres outils tels que l'analyse d'enveloppe, SK peut fournir des entrées clés telles que la bande optimale .

Le kurtosis spectrale, ou $K(f)$, d'un signal $x(t)$ peut être calculée à partir de la transformée de Fourier à fenêtre glissante (STFT) du signal, $S(t, f)$:

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-2\pi f\tau} dt \quad (\text{II.9})$$

où $w(t)$ est la fonction de fenêtre utilisée dans STFT. $K(f)$ est calculé comme suit:

$$k(f) = \frac{\langle |S(t, f)|^4 \rangle}{\langle |S(t, f)|^2 \rangle^2} - 2, \quad f \neq 0 \quad (\text{II.10})$$

Si le signal $x(t)$ contient uniquement du bruit gaussien stationnaire, alors $K(f)$ à chaque fréquence f a une distribution normale asymptotique avec 0 moyenne et variance $4/M$, où M est le nombre d'éléments le long de l'axe du temps en $S(t, f)$.

Il est important de noter que la longueur de la fenêtre STFT N_w détermine directement la résolution en fréquence, qui est f_s/N_w , où f_s est la fréquence d'échantillonnage. La taille de la fenêtre doit être plus courte que l'espacement entre les impulsions transitoires, mais plus longue que les impulsions transitoires individuelles.

II.4.4 La transformée de Hilbert et le spectre d'enveloppe :

La transformée de Hilbert permet d'associer un signal complexe, appelé signal analytique, à un signal réel. La transformée de Fourier $Z(f)$ du signal analytique $z(t)$ s'exprime selon l'équation (II.11), où $H(f)$ est la fonction de transfert du filtre de Hilbert. La réponse impulsionnelle du filtre de Hilbert est $h(t) = 1/\pi.t$. Le filtrage d'un signal $x(t)$ conduit à la composante imaginaire $y(t)$ du signal analytique

$$Z(f) = X(f) + jY(f) = X(f) + jH(f)X(f) \text{ avec : } H(f) = -j \text{ signe}(f). \quad (\text{II.11})$$

avec :

$$\text{signe}(f) = \begin{cases} +1 & \text{si } f > 0 \\ 0 & \text{si } f = 0 \\ -1 & \text{si } f < 0 \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

La transformée de Fourier du signal analytique s'exprime alors directement à partir de celle du signal réel (II.13). La TF du signal analytique est alors nulle pour les fréquences négatives.

$$Z(f) = \begin{cases} 2X(f) & \text{si } f > 0 \\ X(f) & \text{si } f = 0 \\ 0 & \text{si } f < 0 \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Dans le cas des signaux modulés, la transformée de Hilbert permet d'obtenir l'amplitude du signal analytique, appelée enveloppe complexe, est représentative des modulations d'amplitude, au sens large, du signal réel. Il s'agit donc l'a d'une technique de démodulation Ainsi, une analyse spectrale de l'enveloppe complexe fournit des informations sur les modulations d'amplitude des signaux [CHE96].

II.4.5 La transformée en ondelettes et les paquets d'ondelettes :

La transformée en ondelettes est un outil récent de traitement du signal Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout `a fait comparable `a l'analyse de Fourier Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse temps-fréquence classique Les ondelettes ont de nombreuses applications comme la détection de singularité dans un signal applicable au diagnostic des roulements `à billes la compression de données ou encore le débruitage [11].

II.5 Conclusion

Compte tenu des caractéristiques vibratoires des roulements à billes en présence défauts, nous avons présenté les signatures vibratoires associées aux différents défauts de type écaillage. Nous avons ensuite présenté les principaux indicateurs scalaires basés sur une analyse des signaux vibratoires temporels. Enfin, nous exposons quelques méthodes de traitement du signal avancées.

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons montrer sur différents cas de défauts de roulements, comment se fait la détection des défaillances à l'aide des approches utilisées. Dans un premier temps, nous avons utilisé les données disponibles sur site {BDC}, où nous avons testé les performances des indicateurs statistiques choisis. Les limitations apportées par l'approche temporelle seront surmonté en utilisant l'approche fréquentielle.

III.2 Analyse du signal vibratoire

L'analyse d'un signal vibratoire nous permet de détecter la présence d'un défaut, soit dans le domaine temporel ou bien dans le domaine fréquentiel où sa signature est visible.

III.2.1 Analyse dans le domaine temporel

Dans l'analyse des vibrations, il est possible de visualiser le signal en forme d'onde dans le temps et par conséquent la fréquence et l'amplitude peuvent être déterminées. En pratique, dans le cas d'une machine complexe, l'utilisation de la méthode de la forme d'onde de temps est très difficile et par conséquent cette méthode ne permet pas de déterminer les paramètres du signal (Fig. III.1).

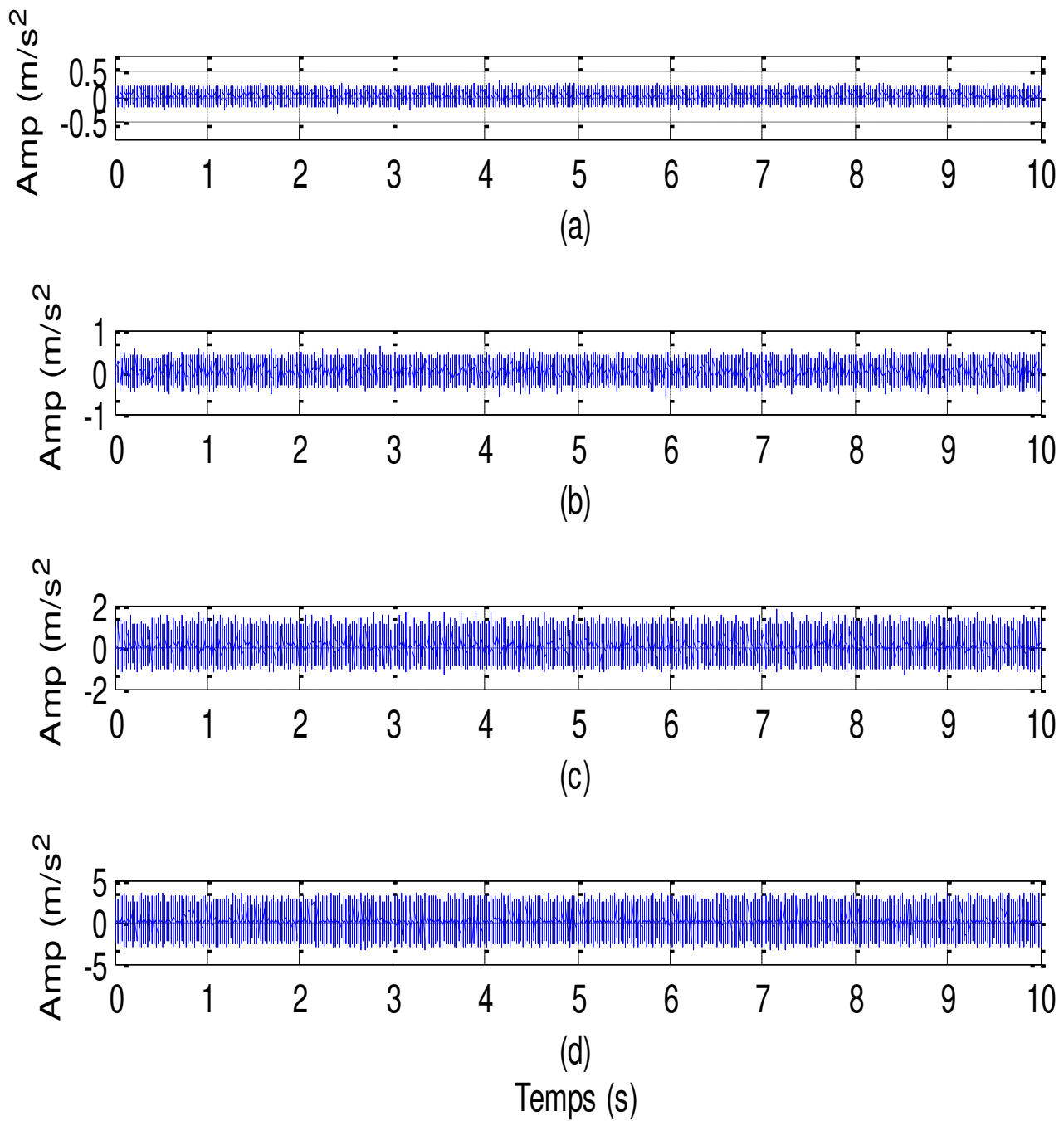


Fig. III.1 : Signaux Vibratoires: (a) Roulement Sain, (b) Roulement Avec Défaut De Balle, (c) Roulement Avec Défaut De Cage Interne, (d) Roulement Avec Défaut De Cage Externe [12].

Il existe plusieurs façons pour obtenir l'information pour la détection des défauts, à partir des signaux temporelles. En effet, l'approche temporelle se résume aux indicateurs statistiques. A partir des mesures vibratoires, des traitements sont mis en place pour d' détecter les défauts de roulements, les plus simples étant la construction d'indicateurs scalaires. Dans ce cas, la mesure temporelle est traitée directement. Nous allons présenter trois des indicateurs les plus courants : le facteur crête (FC), le facteur K et le kurtosis (KU).

III.2.2 Les caractéristiques du roulement

Le type de roulement **Drive end bearing: 6205-2RS {BDC}**.

| Diamètre interieur | Diamètre extérieur | Épaisseur | Diamètre balle | Diamètre du pas |
|--------------------|--------------------|------------|----------------|-----------------|
| 25.00122m | 51.99888mm | 15.00124mm | 7.94004m | 39.0398m |
| m | | | m | m |

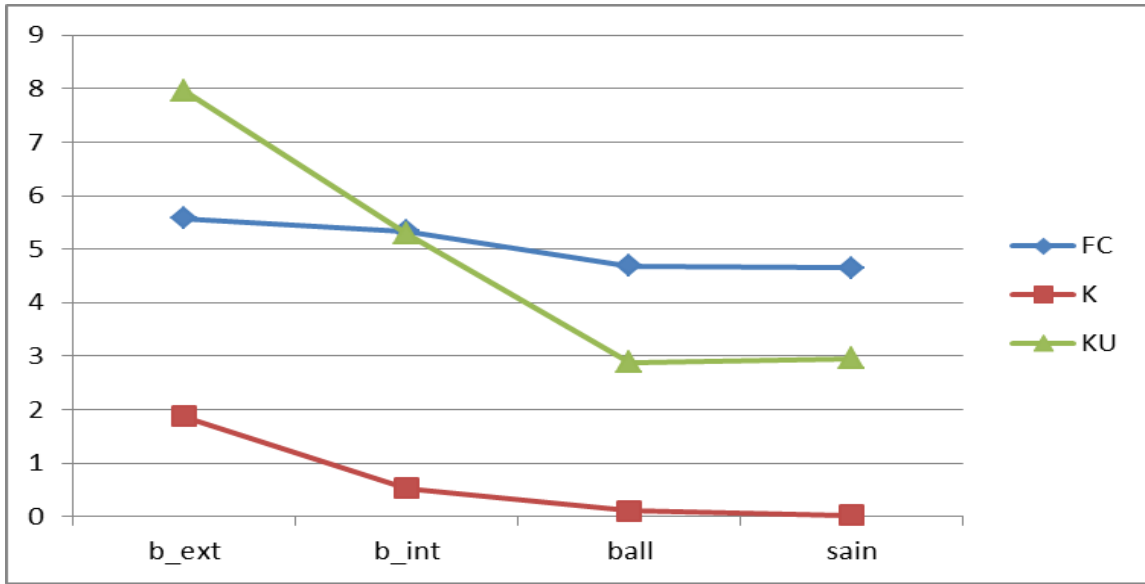
Tableau. III.1 : Caractéristique De Roulement (DE) [12].

| | Bague_ext | Bague_int | Balle | Sain |
|----|-----------|-----------|--------|--------|
| FC | 5,4225 | 5,9653 | 4,3597 | 4,2196 |
| K | 2,4306 | 0,5071 | 0,0845 | 0,023 |
| KU | 7,6494 | 5,3956 | 2,9847 | 2,7642 |

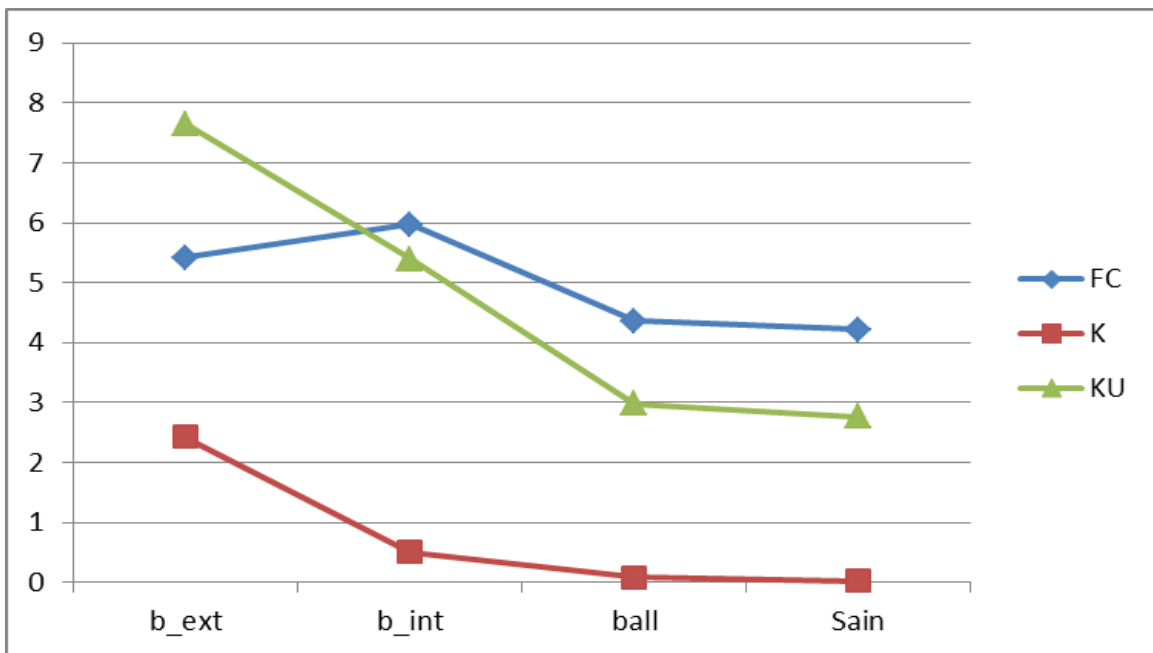
Tableau III.2 : Indicateurs Statistiques Avec Roulements Sain Et Défectueux Pour Une Vitesse 1796 tr/mn[12].

| | Bague_ext | Bague_int | Balle | Sain |
|----|-----------|-----------|--------|--------|
| FC | 5,5757 | 5,3298 | 4,6901 | 4,6515 |
| K | 1,8782 | 0,5242 | 0,1107 | 0,0202 |
| KU | 7,9637 | 5,2911 | 2,8897 | 2,9572 |

Tableau III.3 : Indicateurs Statistiques Avec Roulements Sain Et Défectueux Pour Une Vitesse 1725 tr/mn[12].



(a)



(b)

Fig. III.2 : Indicateurs Scalaires En Fonction De Défauts Pour (a) Forte Charge Et (b) Faible Charge[12].

D'après les résultats précédents, on constate les trois indicateurs (FC, K, KU) lorsqu'ils sont calculés à partir de signaux vibratoires, pour un fonctionnement à forte charge, ne peuvent pas différencier entre un roulement sain et un roulement avec un défaut de balle. Par contre pour les autres types de défauts (bagues externe et interne) sont plus représentatifs sur la dégradation du défaut. Le niveau KU s'avère plus important, notamment à la faible charge, où il a pu discerner entre les différents états des roulements. Ainsi, cet indicateur permet d'avoir une idée sur la santé du roulement sans pour autant savoir beaucoup de choses sur l'historique de la machine.

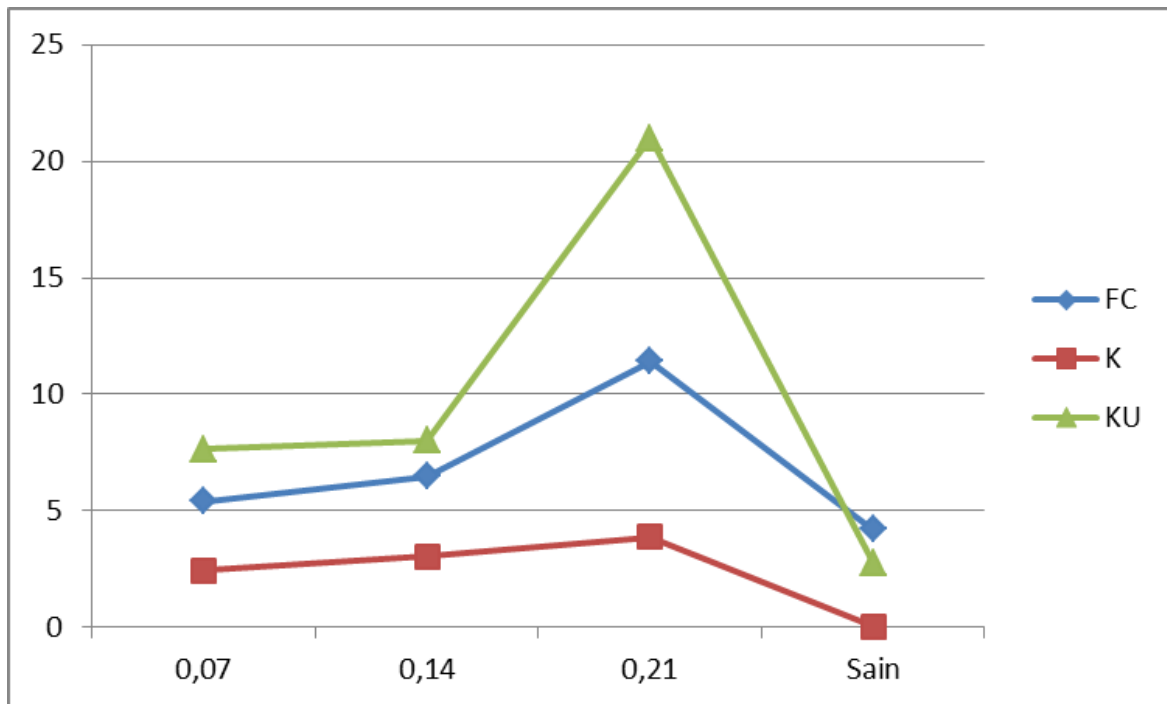


Fig. III.3 : Évolution De Des Indicateurs Statistiques En Fonction Du Diamètre D'un Défaut Bague Externe[12].

La figure III.3 montre l'évolution des indicateurs (KU, K et FC) en fonction du diamètre d'un défaut de bague extérieure. La particularité de ces indicateurs c'est qu'il augmente avec la taille du défaut.

III.2.3 Limite de l'approche temporelle

La plupart des indicateurs temporels ne sont réactifs qu'à un stade assez avancé de la dégradation du roulement. Le Kurtosis, le facteur crête et le facteur K ne permettent pas la détection de défauts de la balle. Cela rend difficile aux opérateurs de définir des niveaux d'alarmes adéquats pour les indicateurs statistiques.

III.2.3 L'approche fréquentielle

III.2.3.1 Analyse par la transformé de Fourier rapide

L'approche fréquentielle est basée sur la détection de la signature d'un défaut particulier en se basant sur le spectre du signal. En effet, selon l'amplitude d'un défaut, des fréquences bien spécifiques sont excitées. Dans le cas d'un roulement, on peut distinguer quatre fréquences associées aux différents éléments de roulement dont les expressions sont données par les équations (I.1) à (I.4). Ces fréquences théoriques des défauts dépendent des caractéristiques géométriques du roulement étudié et de la fréquence de rotation de l'arbre. En pratique, à cause du glissement entre les composants du roulement, ces fréquences caractéristiques peuvent être légèrement différentes de leurs valeurs calculées (1-2%). En comparant la fréquence caractéristique mesurée et la fréquence théorique, la localisation du défaut peut être identifiée.

L'information sur la géométrie du roulement est nécessaire pour utiliser ces formules. Les fréquences caractéristiques pour une vitesse de 1796 tr/mn sont illustrées dans le tableau ci-dessous:

| Roulement | Fréquence (Hz) |
|-------------------------|----------------|
| Défaut de cage | 11.9218 |
| Défaut de bague externe | 107.3050 |
| Défaut de bague interne | 162.0950 |
| Défaut de bille | 141.0908 |

Tableau III.4 : Fréquences Caractéristiques Des Différents Eléments Du Roulement Pour Une Vitesse De 1796tr/mn[12].

| Roulement | Fréquence (Hz) |
|-------------------------|----------------|
| Défaut de cage | 11.4506 |
| Défaut de bague externe | 103.0630 |
| Défaut de bague interne | 155.6870 |
| Défaut de bille | 135.5131 |

Tableau III.5 : Fréquences Caractéristiques Des Différents Eléments Du Roulement Pour Une Vitesse De 1725tr/mn[12].

En se basant sur les fréquences théoriques des défauts, l'analyse spectrale des signaux de la machine a été effectuée afin de déterminer si des défaillances se sont produites dans les roulements.

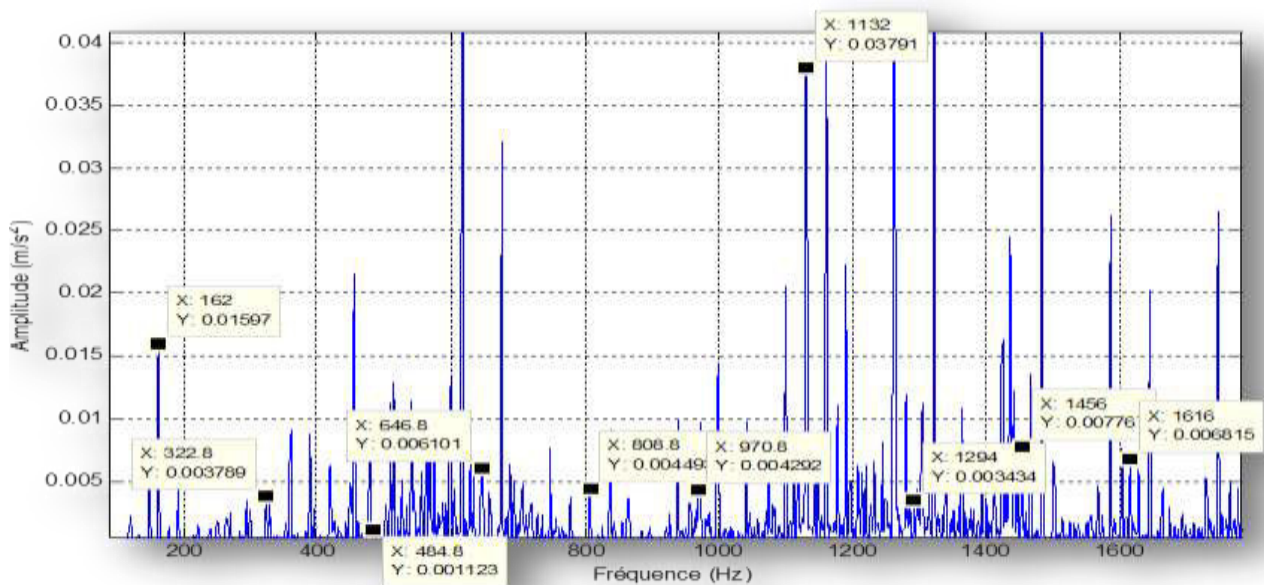


Fig. III.4 : Le Spectre Vibratoire Pour Un Roulement Avec Défaut De Bagues Interne[12].

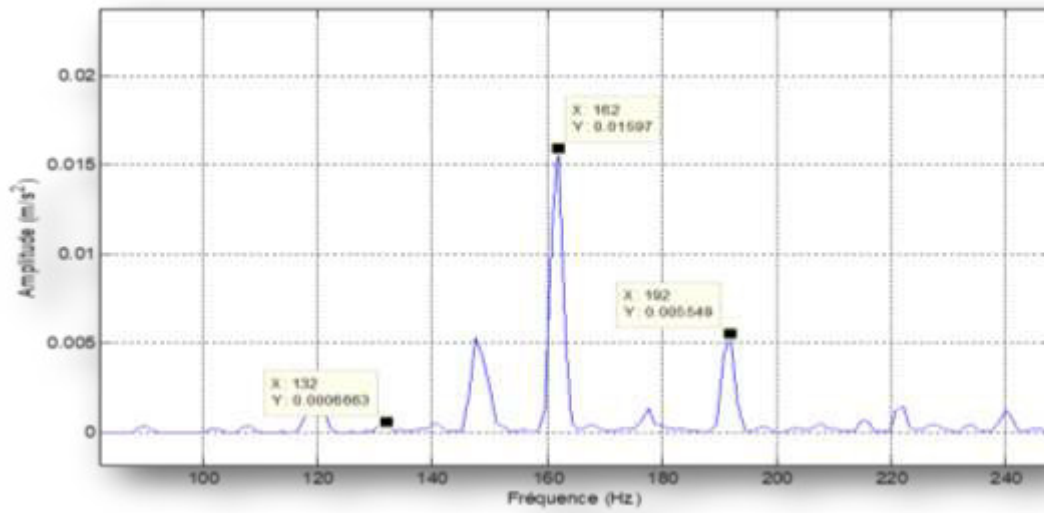


Fig. III.5 : Zoom De Spectre Vibratoire Pour Un Roulement Avec Défaut De Bagues Interne Sur L'intervalle [0-240]

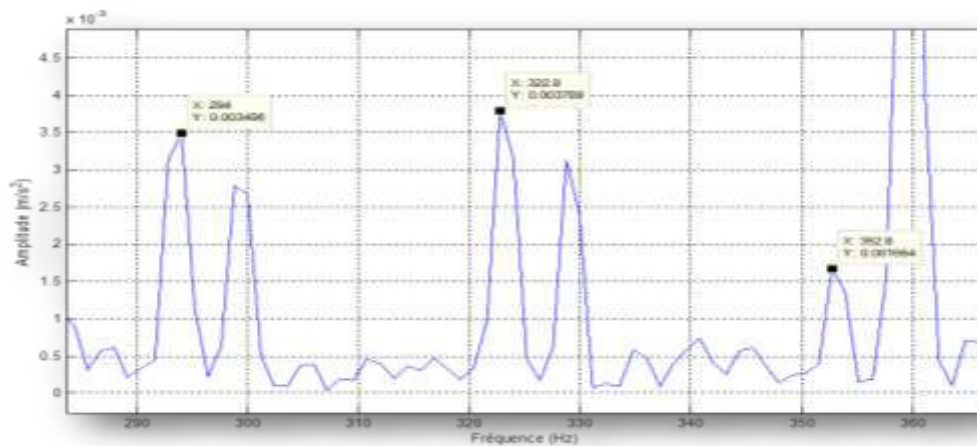


Fig. III.6 : Zoom De Spectre Vibratoire Pour Un Roulement Avec Défaut De Bagues Interne Sur L'intervalle [240-380]

La figure III.4, présente le spectre vibratoire pour un roulement avec défaut de bagues interne des amplitudes élevées ont été observées dans le spectre en plusieurs points,. L'apparition d'un pic à 162 Hz est proche de la fréquence théorique de défaut de la bague interne qui est de l'ordre de 162.0950 Hz. Des pics proches de multiple de la fréquence théorique de 322.8 à 1616 ont été observés. Finalement, les figures (III.5 et III.6) illustrent les pics aux fréquences de 192 près de 162.095 et (294-352.8) Hz autour de 322.8 Hz ont montré un espacement régulier (environ 29.93 Hz), ce qui correspond à la vitesse de rotation de la machine.

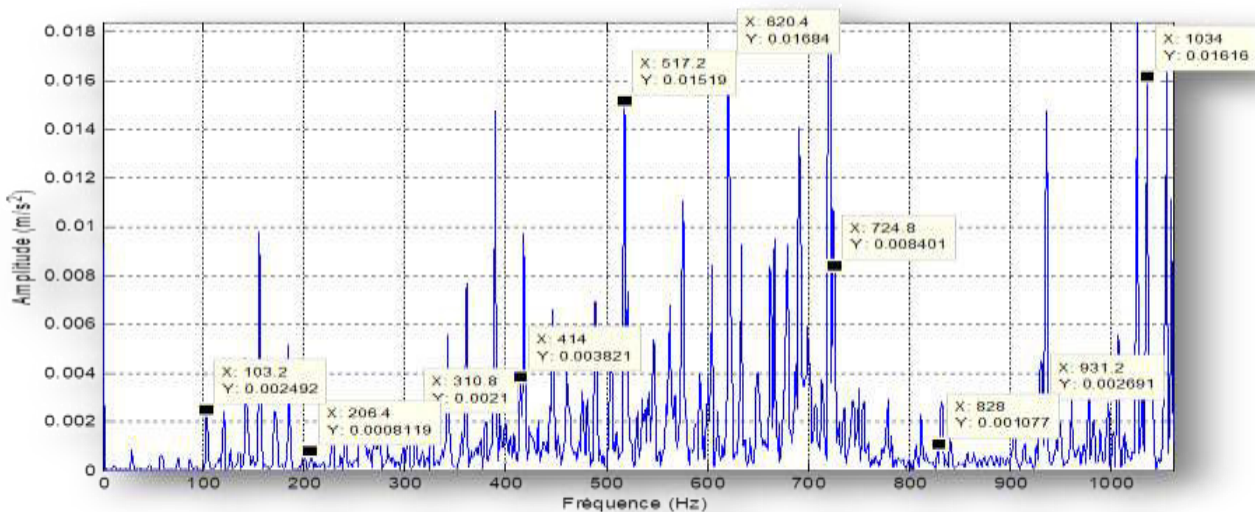


Fig. III.7 : Le Spectre Vibratoire Pour Un Roulement Avec Défaut De Bagues Externe[12].

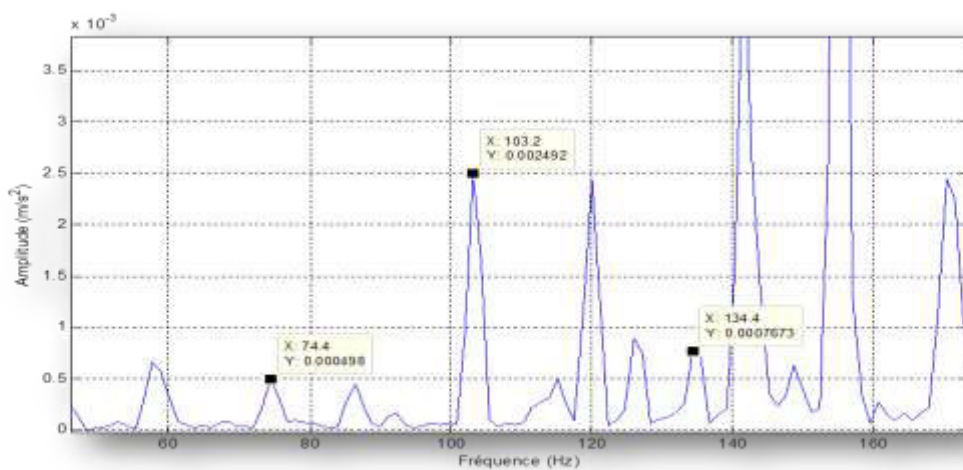


Fig. III.8 : Zoom De Spectre Vibratoire Pour Un Roulement Avec Défaut De Bagues Externe. Sur L'intervalle [0-160].

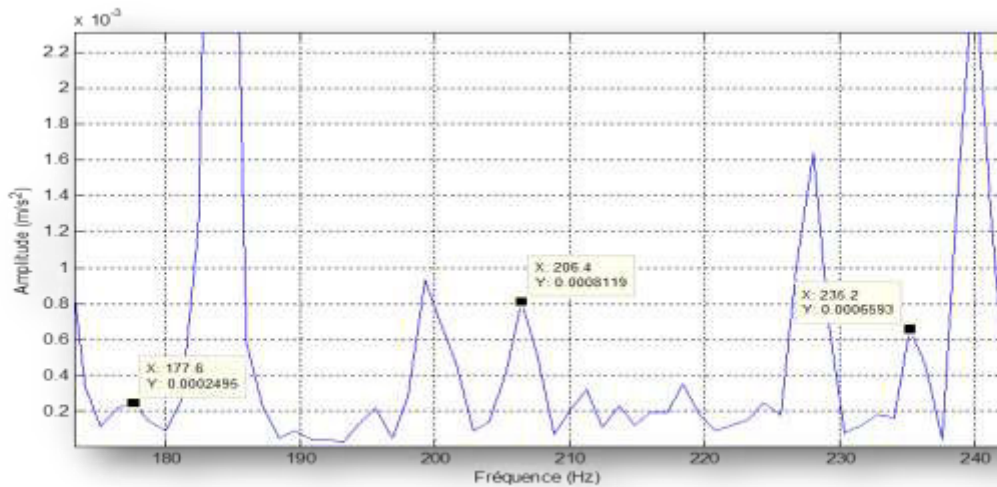


Fig. III.9 : Zoom De Spectre Vibratoire Pour Un Roulement Avec Défaut De Bagues Externe Sur L'intervalle [160-240].

L'analyse du spectre pour un roulement avec un défaut de bague externes est illustré aux figures (III.7 à III.9), à partir de la figure (III.7) , on constate la présence d'un harmonique (103.2) proche de la fréquence théorique qui est de Hz. 103.0630.

Cette fréquence est apparue à faible amplitude, cependant, les amplitudes relatives aux multiples de cet harmonique augmentent avec l'augmentation de l'indice de multiplicité. L'espacement régulier est bien évident, des petits pics sont également répartis entre les fréquences de 103.2 et 206.4 Hz et qui vaut 28.75 Hz.

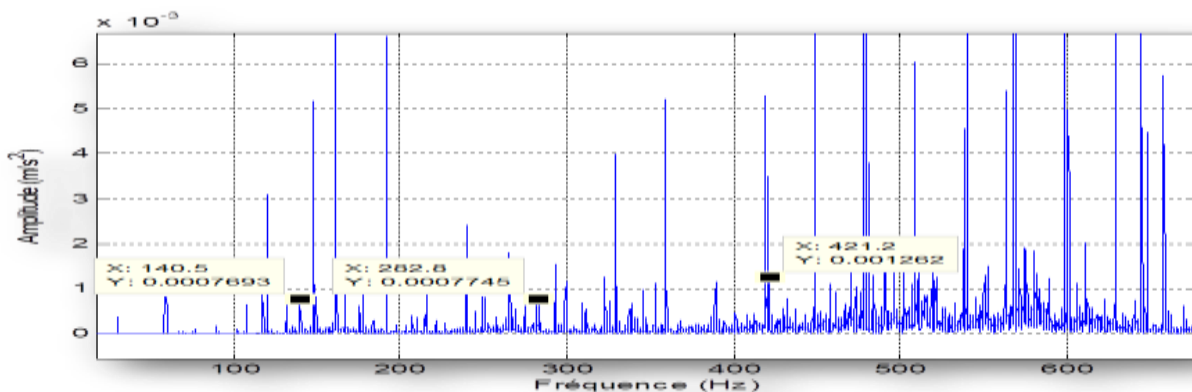


Fig. III.10 : Spectre De Vibration Avec Défaut De Bille(0.21inch) Pour Une Vitesse De 1796 tr/mn[12].

A partir de la figure (III.10) la fréquence de défaut de bille a été observée à la fréquence de 140.5 Hz, ce qui est proche de la fréquence théorique de ce composant (141.0908 Hz). De même des pics, de fréquences multiples de 140.5 et dont l'amplitude augmente avec l'augmentation de l'ordre, ont été observés.

III.2.3.2 Analyse par spectrale kurtosis

Le kurtosis spectral est une nouvelle technique d'analyse utilisable dans le diagnostic des défauts de roulements. Il peut être utilisé pour indiquer le meilleur groupe à démoduler pour l'analyse d'enveloppe sans nécessiter des connaissances préalables. Les figures (III.11 à III.13) montrent l'utilisation de cet outil pour dévoiler la bande de fréquence affectée par le défaut. On remarque que la plage de fréquences affectée par le défaut de la bague externe est localisée entre [0.8-5] KHz de même pour le défaut de bague interne et de bille où les bandes sont localisées respectivement entre [0.8-5] KHz et [2.5-5] KHz.

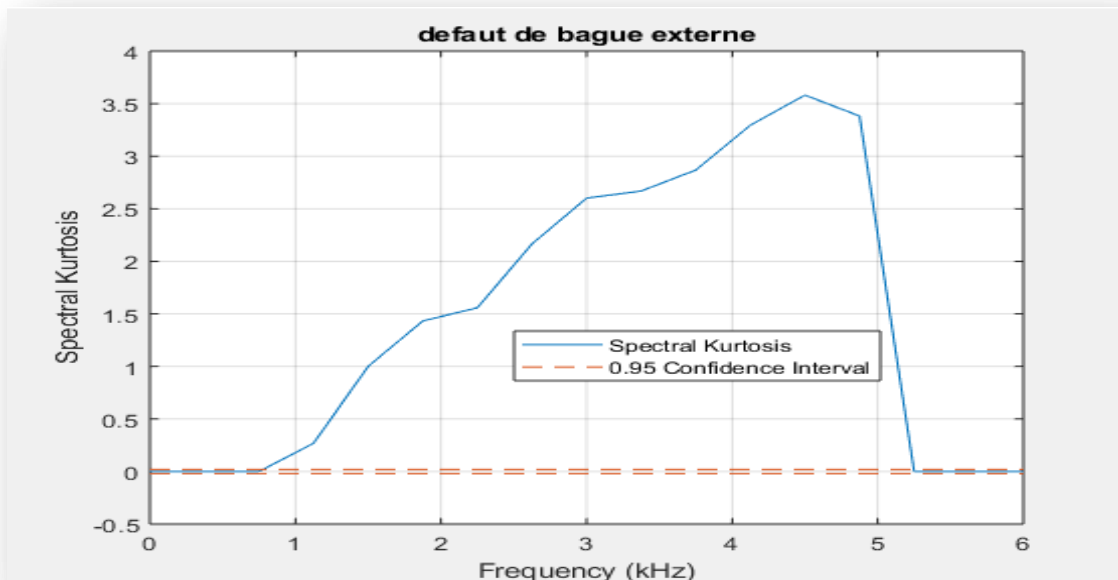


Fig III.11 Défaut De Bague Externe.

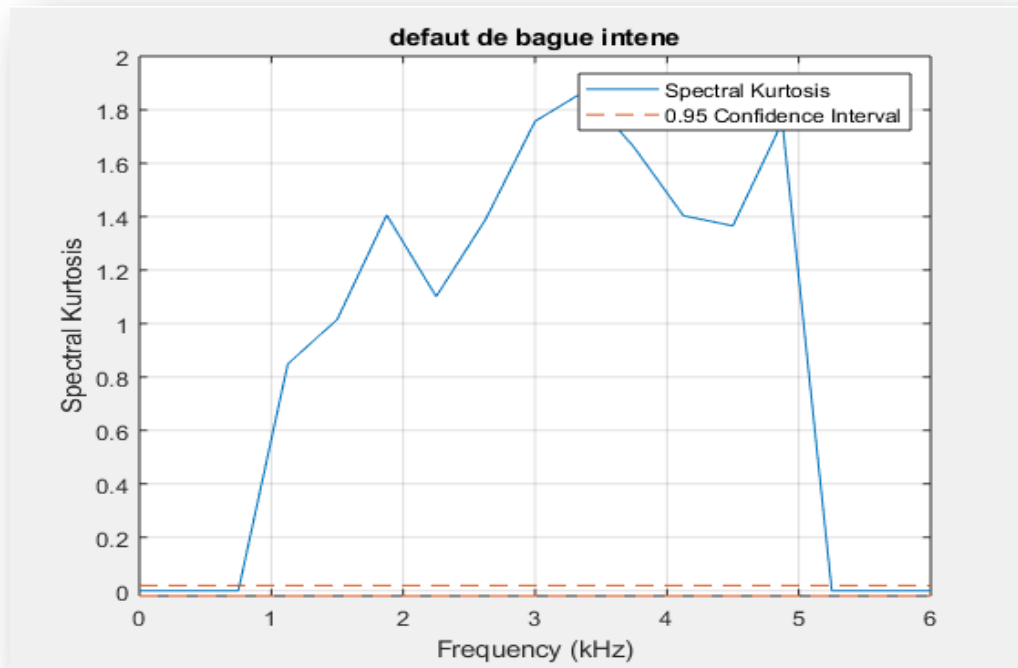


Fig III.12 Defaut De Bague Interne.

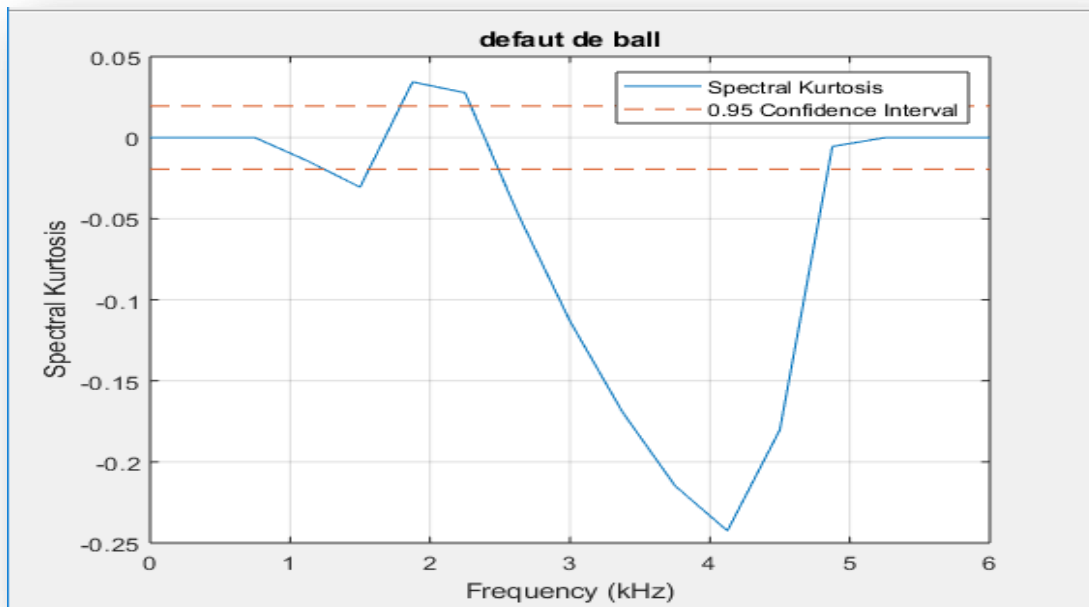


Fig III.13 Defaut De Balle.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté trois approches de diagnostic de défaut de roulements. La première repose sur l'utilisation des indicateurs scalaire qui utilise les grandeurs temporelles. Lors de cette étude, nous avons trouvé l'impuissance de ces indicateurs de discerner entre un roulement sain et un autre avec défaut de balle. Cette limitation nous a poussé à pencher vers l'analyse spectrale. Comme le signal vibration est très riche en harmoniques et que les fréquences caractéristiques et leurs multiples se trouvent dans les basses fréquences, une troisième technique a été adoptée. cette dernière utilise le Kurtosis Spectrale, ce qui nous facilite l'étude.

Conclusion Générale

Ce présent travail a été consacré à la mise en œuvre d'une surveillance de la machine asynchrone et plus particulièrement au roulement à billes. Les défauts de roulement représentent environ la moitié de toutes les pannes de la machine électrique. Ces défauts apparaissent au niveau de la bague extérieure, la bague intérieure, la cage et les éléments roulants (billes). Chaque type de défaut dans ces quatre éléments de roulement a une fréquence caractéristique spécifique.

Nous avons fait une étude de deux méthodes de diagnostic du défaut de roulement à billes. Dans tous les cas traités, les fréquences ont été validées par rapport aux fréquences calculées par leurs formules. Nous avons souligné l'intérêt de l'analyse vibratoire pour qu'on puisse suivre l'état de la gravité du défaut selon le niveau d'alarme.

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

Le 2eme chapitre de notre travail ont été élaborés à partir d'expérimentations réalisées sur un banc d'essai, on a traité les signaux mesuré par différentes méthodes d'analyse vibratoire tel que analyse temporelle (kurtosis, facteur de crête, Le facteur k, et Facteur de défaut de roulement FD) et analyse spectrale (Analyse par la transformé de Fourier (FFT) et Analyse par le kurtosis spectrale (SK))

Le 3eme chapitre de notre travail on avait fait des études pour 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

Conclusion Générale

suivre l'évolution de chaque défaut d'un élément de roulement en fonction de son diamètre. et en plus nous allons utiliser une technique s'appelle le Kurtosis Spectrale, ce qui nous facilite l'étude.

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

Cette méthodes est rapide car il suffit juste d'avoir le signal vibratoire en lui caractérisant

dans le domaine fréquentiel (transformée de Fourier et kurtosis spectrale)

Bibliographies

[1] Trajin, B. (2009). “Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones. Application à la surveillance des roulements à billes”, Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT.

[2] “Roulement à bile et à rouleaux. (207), document NTN (for new technologie network) corporation. CAT. NO. 202-VII/F.

[3] document SKF sur les types de roulement obtenu organisation ourhood

[4] Mémoire en vue de l’obtention du diplôme de magistère présenté et soutenu par MERAH Karima intitulé diagnostic des défauts de roulement d’un moteur par analyse vibratoire (Etude comparative avec l’analyse du courant statorique).

[5] R.A. Collacott. (1979), “Vibration Monitoring and Diagnoses”, pp. 109– 111.Wiley, New York. “ et T. A. Harris, Rolling bearing analysis, Wiley, New-York, 3rd ed., 1991.

[6] Thomas, M. &. (2002). “Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines. Université du Québec, École de technologie supérieure. Livre.

[7] la surveillance des vibrations analyse des defauts (SCV sa suisse)

[8] doctorat de l’université de Toulouse Présentée et soutenue par Baptiste TRAJIN

Le 1 Décembre 2009 Titre : Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones Application à la surveillance des roulements à billes page 51

[9] R. Bigret, J. L. Féron, C. Pachaud, Diagnostic, maintenance, disponibilité des machines tournantes - modèles, mesurages, analyses des vibrations, Masson, Paris, 1995.

[10] Antoni J., Randall R.B. (2006), “The Spectral Kurtosis: Application to the Vibratory Surveillance and Diagnostics of Rotating Machines”, Science Direct, Mechanical Systems and Signal Processing,

Bibliographies

[11] J. P. Kahane, P. G. Lemarié-Rieusset, S´erie de Fourier et ondelettes, Cassini, Cambridge, 1998.

[12] M´emoire de Master DETECTION ET CARACTERISATION DES DEFAUTS DES ROULEMENTS PAR L'ANALYSE SPECTRALE Pr´esent´e par CHAIB Sid ali BOUSSAIDI Azeddine.