

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : *Sciences de l'ingénierat*

Département : *Génie mécanique*

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Master

Spécialité : construction mécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**DETECTION DES DEFAUTS DES ROULEMENTS PAR
ANALYSE SPECTRALE VIBRATOIRE**

Présenté par : *KERROUCHE KHIREDINE*

Encadrant : *Mr. LAISSAOUI RACHID*

Jury de Soutenance :

LAISSAOUI Rachid	MAA	Université	Président
TEKILI Sabiha	MCB	Université	Encadrant
LAMRI Kheirdinne	MAA	Université	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Année 2019/2020

REMERCIEMENTS

Au premier temps, je tiens à remercier le bon Dieu, qui m'a donné la force et le courage pour effectuer ce mémoire de fin d'études.

J'adresse mes vifs remerciements à Mr. LAISSAOUI RACHID mon

Encadreur qui m'a orientés durant l'élaboration de ce travail.

J'adresse également mes remerciements aux examinateurs pour

Avoir accepté de juger mon travail, que soient remercié tous

mes enseignants durant toute mes année d'études.

Enfin, je n'oublier pas à remercier le personnel du département

Génie mécanique et tous ceux qui mes ont aidé à L'élaboration de ce modeste travail.

DÉDICACE

*A ma chère mère BELDA Ma mère, que Dieu lui fasse miséricorde à mon
cher père DJILANI merci pour votre soutien et votre patience.*

A MA BELLE MÈRE messouda kerrouche

Et mes frères abdelbasset, sidali, aladine, motzabilaah, amine, Ahmed rami,

A mes sœur rayanne, khoula, Djannat.

A MES FRÈRES : Slimane berroussi et Abdennoure bedoui.

A MA Fiancée : Sondous benyahia.

A tous les membres de la famille Kerrouche et la famille Djaoui.

A MES FIDÈLES AMIS

A Tous mes amis et tous ceux que j'ai connu durant mes années de faculté.

Je vous dédie ce travail

BELDA « Je ne vous oublierai jamais ma mère »

Sommaire

Remerciement.

Dédicaces.

Introduction générale :01

Chapitre I : définition générale des roulements

I- 1 Introduction03

I-2 Constitution des roulements.....03

1/La bague extérieure.....04

2/ La bague intérieure04

3/ La cage04

4/ Les éléments roulants..... 04

I-3- Différents types des roulements 04

*Les roulements rigides à billes (à rouleaux cylindriques)05

*Les roulements à aiguilles05

*Roulements à billes à contact oblique06

*Roulements à rotules sur billes (de même sur rouleaux).....06

I-4- Choix de type de roulements08

I-5- Défauts des roulements 09

I-5-1 Causes principales des défauts 09

I-5-2- Principaux défauts09

I-6-Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement....11

I-6-1- Fréquence de défaut sur la bague intérieure12

I-6-2- Fréquence de défaut sur la bague extérieure	12
I-6-3- Fréquence de défaut sur la cage	13
I-6-4- Fréquence de défaut sur l'élément roulant	13
I-7-Conclusion.....	14

Chapitre II: maintenance surveillance.

II-1- Introduction.....	15
II-2- Définition de la maintenance	15
II-3- Objectifs de la maintenance	16
II-3-1- Objectifs opérationnels	16
II-3-2- Objectifs économiques	16
II-4- Types de maintenance.....	17
II-4-1- Maintenance préventive.....	17
II-4-1-1- Maintenance systématique	18
II-4-1-2- maintenance Conditionnelle.....	19
II-4-2- La maintenance corrective	20
II-4-2-1- la maintenance palliative	20
II-4-2-2- la maintenance curative	20
II-4- Niveaux de maintenance	21
II-5- Les opérations de la maintenance	22

Chapitre III : l'analyse spectrale vibratoire.

III-1- Introduction	24
III-2- Définitions du diagnostic	24
III-2-1- Deux tâches essentielles en diagnostic	25
III-2-3- Les différentes étapes de diagnostic	25
III-2-3-1-Etape d'acquisition de données	26
III-2-3-2-Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts	26
III-2-3-3- Etape de détection	27
III-2-3-4- Etape de localisation	27
III-2-3-5- Etape de prise de décision	27
III-3-Analyse vibratoire	28
III-4-Objectifs d'analyse vibratoire	28
III-5-Les avantages d'analyse vibratoire	29
III-6-Les inconvénients d'analyse vibratoire	29
III-7-Définition d'une vibration	29
III-8- Caractéristiques d'une vibration	29
1) Fréquence	29
2) Amplitude	30
III-9- Différentes formes de vibration	30

III-9-1- Vibrations harmoniques	30
III-9-2- Vibrations périodiques	31
III-9-3- Vibrations aperiodique	32
III-10- L'analyse spectrale	32
III-11- Le spectre	33
III-12- Principe de détection d'un défaut de roulement par l'analyse spectrale	33
III-13- L'application de la méthode de l'analyse spectrale pour la détection des défauts des roulements	34
III-13-1- Description de l'expérience	34
III-13-2- Géométrie et caractéristiques du roulement à étudier	35
III-13-3- Caractérisation des signatures spectrales des défauts des roulements	36
III-13-3-1- Caractérisation des signatures spectrales de roulement à l'état sain...	36
III-13-3-2- Caractérisation des signatures spectrales à l'état défaillant	37
III-13-3-2-1- Signatures spectrales de défaut de la bague externe	39
III-13-3-2-2- Signatures spectrales de défaut de la bague interne	42
III-13-3-2-2- Signatures spectrales de défaut de la bille	44
III-14- Conclusion	47

Liste des figures

Figure- I-1- Différentes composantes d'un roulement	03
Figure-I-2- Roulements rigide à billes.....	05
Figure- I-3- Roulements à aiguilles.....	05
Figure- I-4- Roulements à billes à contact oblique.....	06
Figure- I-5- Roulements à rotule sur billes.....	07
Figure- I-6- Touche de dessin.....	07
Figure-I-7 : Une variété de roulements	07
Figure-I-8 différentes type de défaillances des roulements.....	08
Figure- I-9 géométrie et dimensions d'un roulement.....	11
Figure II-1- Schéma Types de maintenance.....	17
Figure III-1- Les différentes étapes du diagnostic.....	26
Figure III-2- Vibration harmonique.....	30
Figure III-3- Vibration aperiodique.....	31
Figure III-4- Vibration périodique.....	32
Figure III-5- La différence entre le Spectre en mode sain et le spectre en mode défaillant...	33
Figure III-6- Piézoélectrique.....	35
Figure III-7- Le banc d'essai Américain (Data bearing center).....	35
Figure III-8- Signal temporel de roulement à l'état sain.....	37

Figure III-9- Spectre de roulement à l'état sain.....	37
Figure III-10- spectre de roulement à l'état sain avec les fréquences caractéristiques des défauts de roulement.....	38
Figure III-11- spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égale à 0.01778 (mm).....	39
Figure III-12- spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.03556 (mm).....	40
Figure III-13- spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.05334 (mm).....	40
Figure III-14- l'évolution des amplitudes fonction de diamètre de défaut de la bague externe....	41
Figure III-15- spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.01778 (mm).....	42
Figure III-16- spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.0356 (mm).....	42
Figure III-17- spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.05334 (mm).....	43
Figure III-18- spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.07112 (mm).....	43
Figure III-19- l'évolution de l'amplitude des raies en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.....	44
Figure III-20- spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.01778 (mm).....	44
Figure III-21- spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.0356 (mm).....	45
Figure III-22- spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.05334 (mm).....	45

Figure III-23- spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.07112 (mm).....45

Figure III-24- évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bille.....46

Liste des tableaux

TAB-III-1 La géométrie du roulement (en mm).....	36
TAB-III-2 Coefficient des défauts.....	36
TAB-III-3 - Les fréquences caractéristiques des éléments défaillants de roulement...	38
TAB-III-4 -évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.	41
TAB-III-5 -évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.	43
TAB-III-6 - évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bille.....	46

➤ Introduction générale :

Quelque soient les efforts entreprise au stade de la conception et la fabrication des machines pour assurer leurs sûreté de fonctionnement, des défaillances apparaissant au cours de leurs exploitation, les causes d'apparition de ces défaillances sont variables. Elles vont du coût de simple remplacement d'une pièce détériorée à d'importants frais d'immobilisation pour la machine donnée, elles peuvent aussi provoquer de graves accidents corporels.

De nos jours le problème de production dans les entreprises est en relation directe avec la maintenance.

La préoccupation principale de toute entreprise doit viser à réduire les coûts de production en minimisant les périodes d'immobilisations des installations. L'existence d'un service maintenance se justifie par la nécessité d'assurer la disponibilité permanente des équipements pour que le service puisse accomplir sa tâche en obtenant le rendement optimal, son coût constitue une partie de plus en plus grande du coût total de fabrication à tel point que le service de maintenance est devenu un organe capital dans les entreprises.

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 machines tournantes et fait appel à des outils de traitement du signal qui ont vu leur champ d'application s'élargir d'année en année. Il existe plusieurs techniques pour mettre

en œuvre les outils classiques de traitement du signal, tels que la transformée de Fourier (pour le tracé et l'analyse du spectre), la transformation de Hilbert [1], (pour la recherche de modulations 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 de crête.

L'un des problèmes les plus importants parmi ceux que pose la maintenance par analyse vibratoire est celui du diagnostic des roulements (les pièces les plus sensibles dans une machine tournante). On retrouve ces composants mécaniques dans de nombreuses machines tournantes compte tenu 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 avec des accéléromètres mis en place pour le diagnostic.

ce mémoire contient 03 chapitres pour comprendre l'analyse spectrale vibratoire des roulements :

- Chapitre 01 : définition générale des roulements.
- Chapitre 02 : maintenance surveillance.
- Chapitre 03 : Analyse spectrale vibratoire.

CHAPITRE I : définition générale sur les roulements

I-1 Introduction :

Le roulement est un organe de base qui assure une liaison mobile entre deux éléments d'un mécanisme en rotation l'un par rapport à l'autre. Sa fonction est de permettre la rotation relative de ces éléments, sous charge, avec précision et avec un frottement minimal. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Environ 40 % à 50 % des défauts rencontrés dans les machines asynchrones sont liés aux roulements [2].

I-2- Constitution des roulements :

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.



Figure- I-1- Différentes composantes d'un roulement [3].

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.

I-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 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.

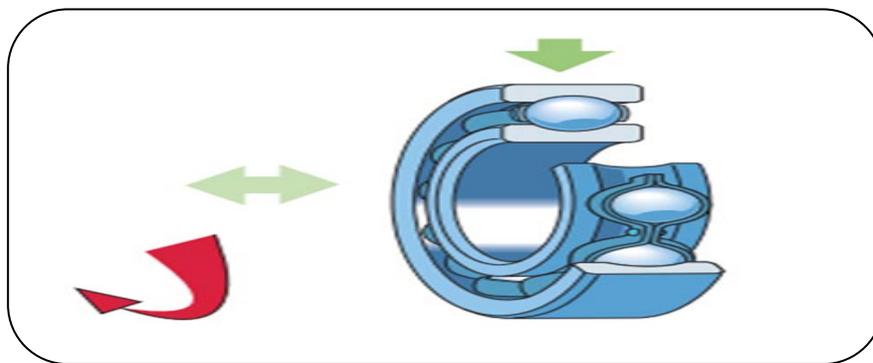


Figure- I-2-Roulements rigide à billes.

***Les roulements à aiguilles** : ils possèdent une forme cylindrique, et sont suffisamment fin pour résoudre le problème où l'espace radial est fin.

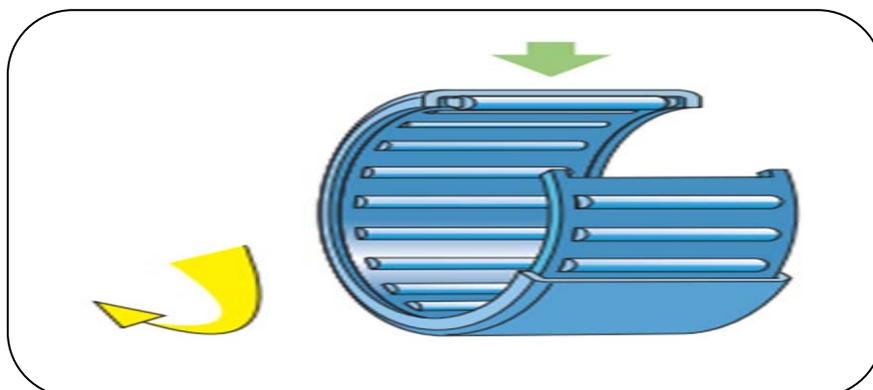


Figure- I-3- Roulements à aiguilles

***Roulements à billes à contact oblique :** l'architecture de ces roulements les rend capable de supporter des charges axiales et radiales à la fois.

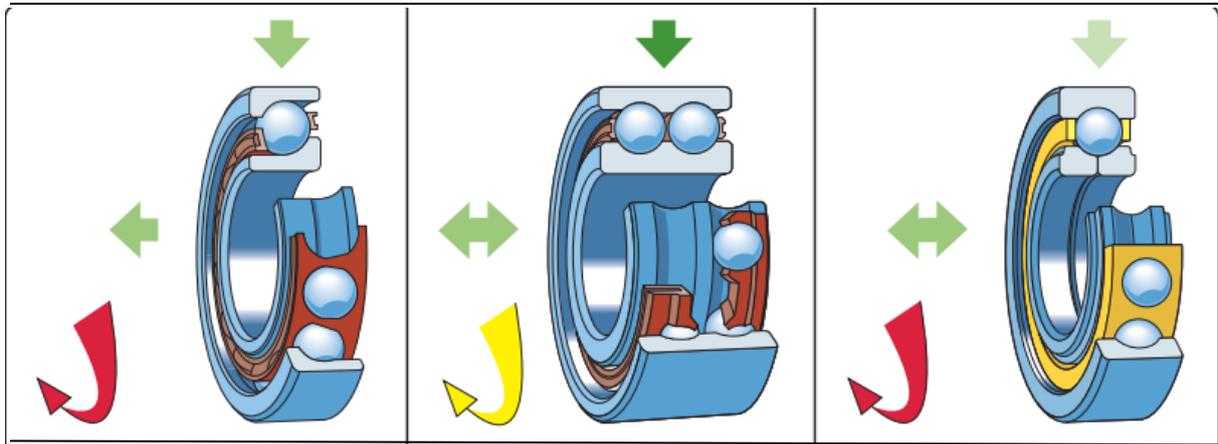


Figure- I-4- Roulements à billes à contact oblique

***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[4].

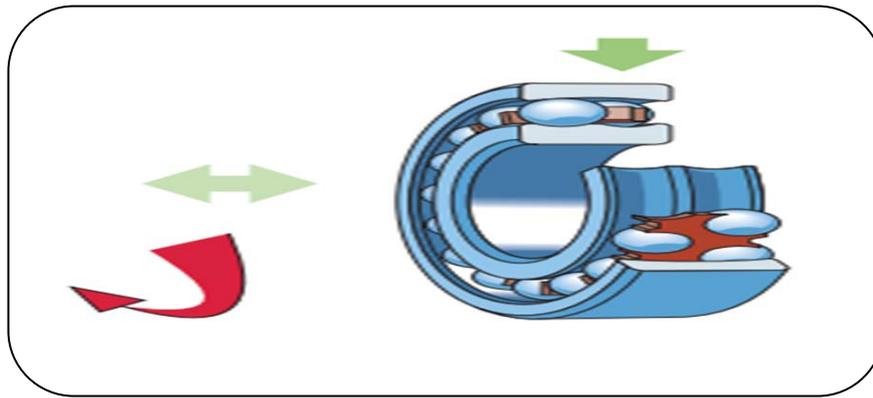


Figure- I-5- Roulements à rotule sur billes

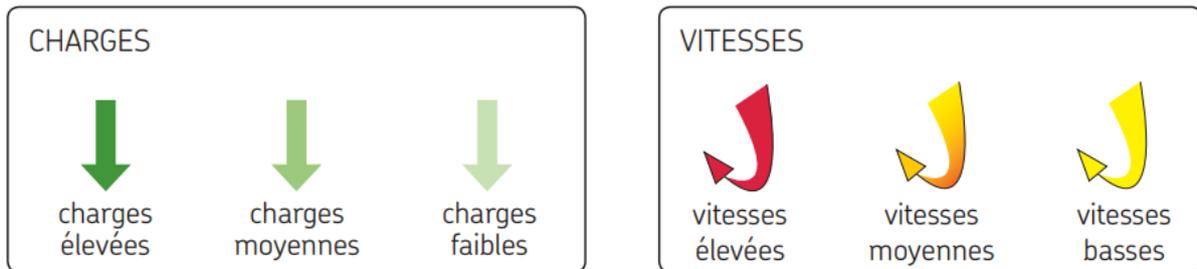


Figure- I-6- Touche de dessin



Figure- I-7 : Une variété de roulements [5].

I-4- Choix de type de roulements :

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. [6]

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.

I-5- Défauts des roulements :

I-5-1 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 [7].

I-5-2- Principaux défauts :

Il a 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.

- Je veux montre 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.

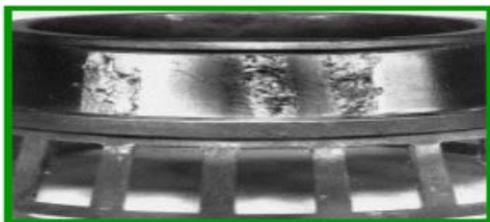
* Les criques, fissures étroites ou autres amorces de cassures dues aux contraintes exagérées au montage ou au démontage.

* L'usure par abrasion, due à une mauvaise lubrification. L'usure par abrasion donne aux roulements un aspect gris, givré.

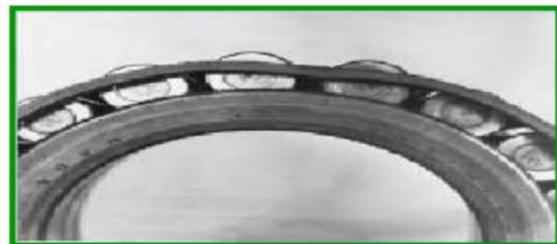
* Le cas le plus rencontré est un défaut d'écaillage dû à la fatigue des roulements.

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 sous couche.

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 suivre son évolution [8].



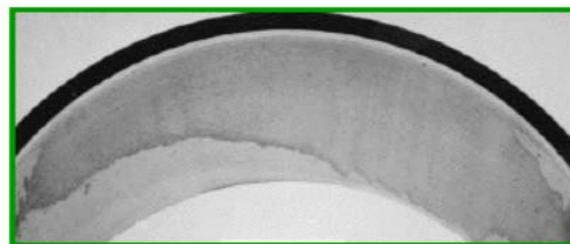
Ecaillage de fatigue



La détérioration des cages



Le grippage



La coloration

Figure- I-8 différentes type de défaillances des roulements.

I-6- Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement :

Tous les roulements endommagés causent divers problèmes, notamment des vibrations. Plus la vitesse de rotation est élevée, plus la fréquence de vibration est élevée. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues.

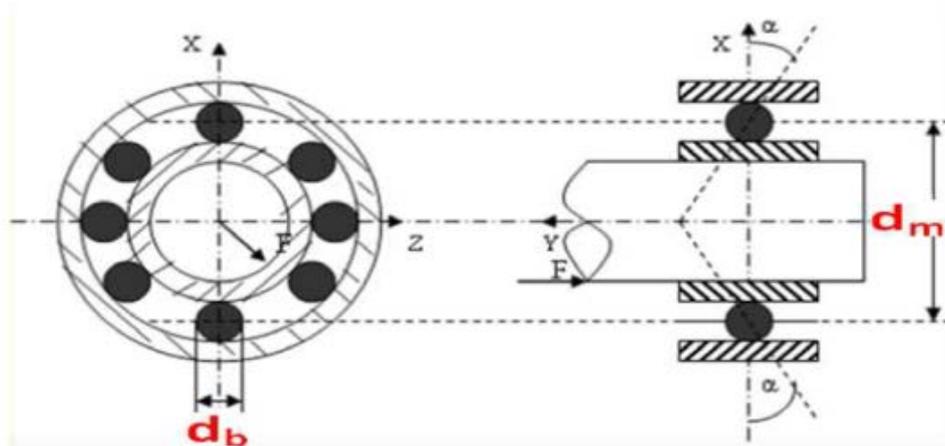


Figure- I-9 géométrie et dimensions d'un roulement.

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.

Les équations suivantes sont utilisées pour le calcul de la fréquence caractéristique pour chaque type de roulement en fonction des cotes de fabrication :

I-6-1- 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).

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

et :

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.

I-6-2- 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.

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

Et :

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

I-6-3- Fréquence de défaut sur la cage :

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

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

Et :

f_{ca} : Fréquence de défaut de la cage.

I-6-4- 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.

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

Et :

f_b : Fréquence de défaut de la bille.

I-7-Conclusion:

Dans ce chapitre on a présenté quelques généralités sur le roulement, et différents types des roulements, les roulements sont des éléments très essentiels dans les machines tournantes, et dans ce chapitre il existe plusieurs types de roulements, chaque type de roulements présente des caractéristiques qui dépendent de sa conception et qui la rendent plus ou moins adaptée à une application donnée.

CHAPITRE II : maintenance surveillance

II-1- Introduction :

A partir du moment de sa mise en route, la machine peut être prédisposée à l'usure, bien sur, cette usure sera plus ou moins rapide en fonction de plusieurs paramètres, tels que la qualité des éléments la constituant, sa conception, son utilisation et entretien. Aujourd'hui, la gestion de la maintenance est considérablement développée. Les énormes sommes engagées dans la maintenance des installations ont imposé de nouvelles approches. Il a été aussi démontré que la durée de vie des équipements et leur taux de disponibilité dépendent essentiellement des programmes de maintenances appliqués.

La maintenance industrielle, qui a pour vocation d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est une fonction stratégique dans les entreprises. Intimement liée à l'incessant développement technologique, à l'apparition de nouveaux modes de gestion, à la nécessité de réduire les coûts de production, elle est en constante évolution. Elle n'a plus aujourd'hui comme seul objectif de réparer l'outil de travail mais aussi de prévoir et éviter les dysfonctionnements.

II-2- Définition de la maintenance :

➤ D'après AFNOR (NFx 60 - 010) :

« Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ».

Maintenir veut dire effectuer des opérations de conservation du potentiel du matériel

(Dépannage, visites, graissage, réparation, modernisation). Afin d'assurer la continuité de marche et la qualité de production.

➤ **D'après LAROUSSE :**

« Ensemble de tout ce qui permet de maintenir ou de rétablir un système en état de fonctionnement ».

II-3- Objectifs de la maintenance :

Les objectifs de la maintenance peuvent être classés en deux types :

II-3-1- Objectifs opérationnels :

- Augmenter à la limite la durée de vie de l'outil de production.
- Améliorer les conditions de travail du personnel de production.
- Assurer la disponibilité maximale de l'outil de production à un prix raisonnable.
- Créer un service qui élimine les pannes à tout instant.
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- Diminuer la probabilité de défaillance en service.
- Maintenir l'équipement dans un état acceptable.
- Maintenir les installations dans une priorité.
- Obtenir un rendement maximal.
- Permettre de décider la maintenance corrective dans les bonnes conditions .
- Supprimer les causes des accidents graves.

II-3-2- Objectifs économiques :

- Éviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc...
- Prévenir et aussi prévoir les interventions de maintenance corrective coûteuse.
- Réduire au maximum les coûts de la maintenance
- Réduire les temps d'arrêt de production.

II-4- Types de maintenance :

- a) La maintenance préventive.
- b) La maintenance corrective.

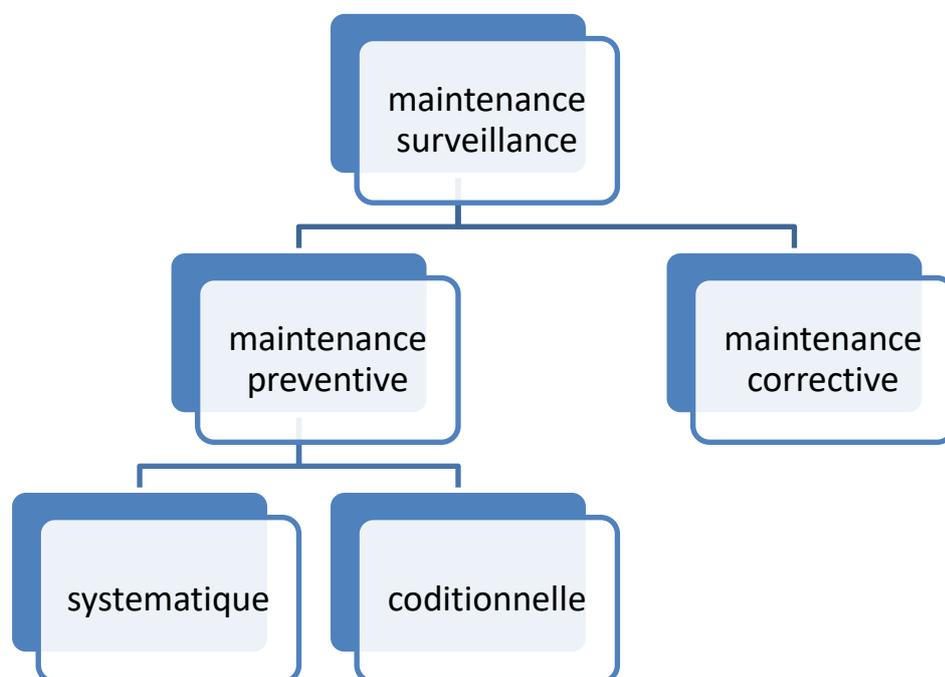


Figure II-1- Schéma Types de maintenance

II-4-1- Maintenance préventive :

Qui vise à diminuer la probabilité de défaillance d'un système. Pour cela elle s'appuie sur :

II-4-1-1- Maintenance systématique :

C'est une maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu.

Donc Les objectifs de la maintenance préventive sont :

- Augmenter la durée de vie de matériels et de la sécurité.
- Diminuer les travaux urgents.
- Diminuer la probabilité des défaillances en service.
- Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiants, carburants.. etc.
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions (gestion de la maintenance).
- Prévenir et aussi prévoir les interventions de maintenance corrective.
- Supprimer les causes d'accidents graves.

Et aussi il y a deux types de maintenance préventive, qui sont les suivants :

La maintenance préventive systématique :

C'est une maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi suivant le temps ou le nombre d'unité d'usage.

- **Les conditions d'application de La maintenance préventive systématique :**

Ce type de maintenance nécessite de connaître suivants :

- Le comportement de matériel.
- Les modes de dégradation.
- Les usures.

Les cas d'application :

- Equipement ayant un cout de défaillance élevée.

- Equipement à la législation en vigueur (sécurité réglementée).
- Equipement dont la panne risque de provoquer des accidents graves (sécurité des biens et des personnes).

II-4-1-2- maintenance Conditionnelle :

C'est une maintenance préventive subordonnée à un type d'évènement prédéterminé (auto-diagnostique, information d'un capteur, mesure d'une usure...), elle consiste à surveiller et de façon contrôler l'état de fonctionnement d'un équipement et son comportement avec le temps. On l'appelle aussi la maintenance prédictive.

Donc Les Objectifs de la maintenance préventive conditionnelle sont :

- Accroître la sécurité des Marchandises et des personnes.
- Eviter les démontages inutiles liés au systématique qui eux-mêmes peuvent engendrer des défaillances.
- Eviter les interventions d'urgences en suivant l'évolution dans le temps des débuts d'anomalies, afin d'intervenir dans les meilleures conditions.

Les conditions d'application de la maintenance Préventive Conditionnelle :

La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles suivant le cas. Il est souhaitable de les mettre sous surveillance et à partir de là nous pouvons décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint, mais les contrôles reste systématique et font partie des moyens de contrôle non destructif.

- **Le cas d'application :**

Tous les matériels sont concernés. Ce type de maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement.

II-4-2- La maintenance corrective :

Qui vise à intervenir à la suite de pannes. Cela ne veut pas dire que toutes ces pannes n'ont pas été prévisibles. Ce type de maintenance sera facilité par une bonne maintenabilité (aptitudes à maintenir ou à rétablir un dispositif, dans un état, lui permettant d'accomplir sa fonction). Il pourra permettre d'améliorer la fiabilité globale en analysant les problèmes rencontrés en contrôle techniques ou cercles de qualité ou avec les constructeurs.

Et aussi cette ensemble d'activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent.

Les activités pouvant être des réparations, des modifications ou aménagement ayant pour objet de supprimer la ou les défaillances.

II-4-2-1- la maintenance palliative :

Est un ensemble d'activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement une fonction ou partie d'une fonction. Elle est appelée couramment dépannage.

II-4-2-2- la maintenance curative :

Est un ensemble d'activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent.

Les activités pouvant être des réparations, des modifications ou aménagement ayant pour objet de supprimer la ou les défaillances.

II-4- Niveaux de maintenance :

Les interventions de maintenance peuvent être classées par ordre croissant de complexité (*selon norme X60-000 de 2002*) [2] :

➤ **1^{er} niveau :**

Réglages simples au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité (voyants, fusibles...etc.).

➤ **2^{eme} niveau :**

Dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventive telles que les graissages ou contrôles de bon fonctionnement.

➤ **3^{eme} niveau :**

Identification et diagnostic des pannes réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général ou réaligement des appareils de mesure.

➤ **4^{eme} niveau :**

Tous les travaux de maintenance corrective ou préventive sauf rénovation et reconstruction.

Avec réglages des appareils de mesure utilisés. Au besoin vérification des étalons de mesure par des organismes spécialisés.

II-5- Les opérations de la maintenance :

➤ Les inspections :

Ces sont des activités de surveillance (ronde à fréquence courte), consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage, ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements.

Elle assure une surveillance quotidienne de l'ensemble des équipements, évitant ainsi, l'apparition d'un grand nombre de défaillances mineures, qui pourraient à long terme avoir des conséquences majeures.

Les rondes, sur matériel en service, comprennent :

- ✓ Des contrôles de pressions de températures, de vibrations.
- ✓ Des examens sensoriels : Détection visuelle de fuites, détection d'odeur, des bruits anormaux, etc...
- ✓ Des travaux mineurs : dépannages simples, réglages .
- ✓ Ecoute des cognements de pompage ou des chocs hydrauliques à l'aide d'un casque et avec l'ouïe.
- ✓ La lubrification (contrôles, pleins, vidanges,).

➤ Les visites :

Ce sont des opérations de surveillance qui dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité prédéterminée.

Ces interventions correspondant à une liste d'opérations définies au préalable et qui peuvent entraîner des montages d'organes et une immobilisation du matériel.

➤ **Le dépannage :**

Action sur un bien en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement compte tenu de l'objectif. Ainsi le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt.

➤ **La réparation :**

Intervention définitive et limitée à la maintenance corrective après panne ou défaillance. L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident, ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

➤ **Les révisions :**

Ensembles des actions d'examen, de contrôle, et des interventions effectués en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unité d'usage donné.

➤ **Le contrôle :**

Il correspondre à des vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivie d'un jugement.

Le contrôle peut être une activité d'information, inclure une décision, déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

CHAPITRE III Analyse spectrale vibratoire.

III-1- Introduction :

Toutes les machines tournantes ont un temps de bon fonctionnement peut être long ou court dépend de la qualité du matériau et de l'entretien que l'on fait. Dans le cadre de la maintenance conditionnelle, les systèmes de surveillance ont pour fonction de détecter une détérioration du fonctionnement de la machine et d'identifier le composant endommagé. Le but est de limiter les interventions, qui immobilisent la machine et optimiser la périodicité des contrôles.

Le diagnostic des défauts est une tâche extrêmement importante dans la surveillance. L'analyse du signal de vibration est l'une des plus importantes méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts des machines tournantes, car le signal vibratoire porte des informations dynamiques sur les systèmes. Les vibrations causées par les roulements défectueux représentent la grande majorité des problèmes des machines. Chaque élément tel que la bague intérieure ou la bague extérieure a une fréquence de rotation caractéristique. Avec un défaut sur un élément particulier, une augmentation du niveau de vibration à cette fréquence peut se produire. La surveillance de ces éléments a une priorité importante pour le bon fonctionnement de la machine. [9] ; [10]

III-2- Définitions du diagnostic :

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 [11].

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

III-2-1- Deux tâches essentielles en diagnostic :

- **la localisation** : permet de déterminer les éléments défailants.
- **l'identification** : estime les caractéristiques statiques et dynamiques de défaut : l'instant d'apparition de la panne, sa durée et son importance [12].

III-2-3- Les différentes étapes de diagnostic :

Effectuer un diagnostic nécessite un certain nombre d'étapes suivant :

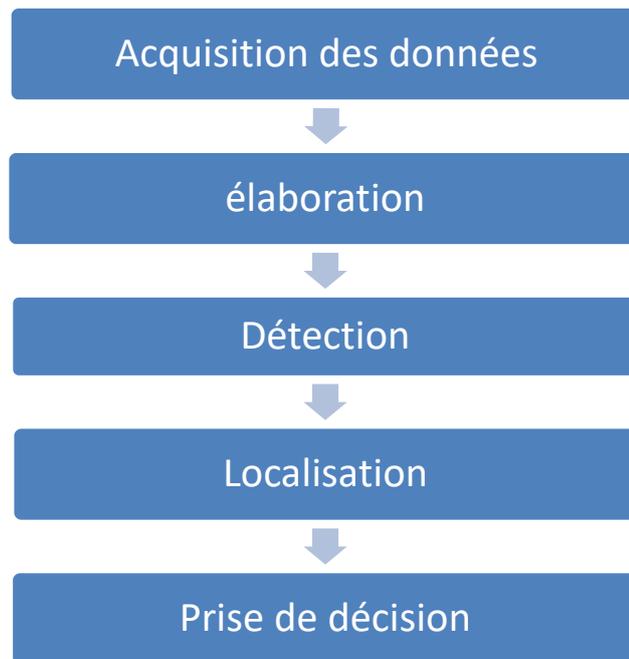


Figure III-1- Les différentes étapes du diagnostic.

III-2-3-1-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 permettent de mesurer les différentes variables du processus.

III-2-3-2-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 permettent 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-2-3-3- 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 le 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.

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 [13].

III-2-3-4- 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 défaillants. 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.

III-2-3-5- 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].

III-3-Analyse vibratoire :

Le principe de l'analyse des vibrations est basé sur l'idée que les structures de machines, excitées par des efforts dynamiques, donnent des signaux vibratoires dont la fréquence est identique à celle des efforts qui les ont provoqués ; et la mesure globale prise en un point est la somme des réponses vibratoires de la structure aux différents efforts excitateurs. On peut donc, grâce à des capteurs placés en des points particuliers, enregistrer les vibrations transmises par les structures de la machine et, grâce à leur analyse, identifier l'origine des efforts auxquels elle est soumise. De plus, si l'on possède la « signature » vibratoire de la machine lorsqu'elle était neuve, ou réputée en bon état de fonctionnement, on pourra, par comparaison, apprécier l'évolution de son état ou déceler l'apparition d'efforts dynamiques nouveaux consécutifs à une dégradation en cours de développement.

La mesure d'une vibration transmise par la structure d'une machine sous l'effet d'efforts dynamiques sera fonction de multiples paramètres :

- Caractéristiques de fixation de la machine sur le sol qui oppose des réactions aux vibrations et modifie l'intensité.
- Position et fixation du capteur sur la machine.
- Caractéristiques du capteur.
- Pré-amplification et transmission du signal.
- Vitesse de rotation et puissance absorbée.
- Etat des liaisons de la chaîne cinématique (alignement, balourd, engrenages, roulements etc.).

III-4-Objectifs d'analyse vibratoire :

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- la détection des défauts.
- l'analyse détaillée des défauts.

III-5-Les avantages d'analyse vibratoire :

- détection de défauts à un stade précoce,
- Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi,
- autorise une surveillance continue,
- permet de surveiller,

III-6-Les inconvénients d'analyse vibratoire :

- Spectres parfois difficile interpréter.
- Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses.

III-7-Définition d'une vibration :

La norme ISO 2041 « Vibrations et chocs - Vocabulaire (Août 1990) » définit la notion de vibration : Variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du Mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement Plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence. En fait, un corps Est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position D'équilibre ou de référence. Les textes de normalisation AFNOR relatifs aux vibrations sont : NF E 90-001, NF E 90 002.

III-8- Caractéristiques d'une vibration :

Une vibration se caractérise principalement par sa **fréquence** et son **amplitude**.

1) **Fréquence** :

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque L'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en **hertz** [Hz].
1 hertz = 1cycle/seconde.

2) Amplitude :

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point D'équilibre et on peut définir :

- L'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête (**A_c**) ou niveau crête.
- L'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête (**A_{cc}**) (*peak to peak*, en anglais) ou niveau crête-crête.
- L'amplitude efficace (**A_{eff}**), aussi appelée **RMS** (*Root Mean Square*) ou niveau efficace.

III-9- Différentes formes de vibration :

III-9-1- Vibrations harmoniques :

Une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme amplitude-temps est représenté par une sinusoïde.

Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle qui est générée par le balourd d'un rotor en mouvement.

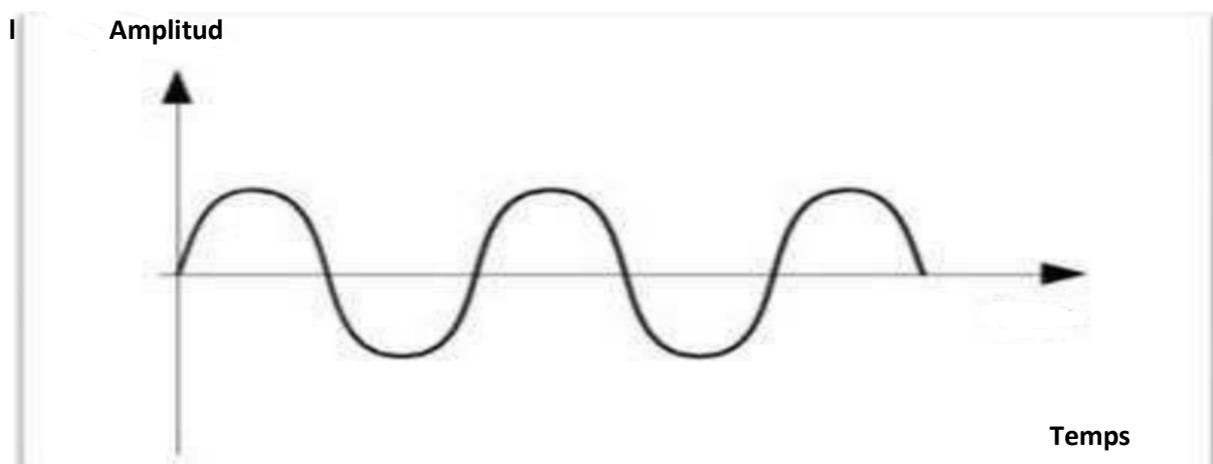


Figure III-2-Vibration harmonique.

$$X(t) = X \sin(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots \text{Eq (III-1)}$$

ω = vitesse angulaire ou pulsation du mouvement ($2\pi f$).

f = fréquence du mouvement.

φ = phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps.

III-9-2- Vibrations périodiques :

Une vibration périodique est telle qu'elle se reproduit exactement après un certain temps appelé période. Une telle vibration est créée par une excitation elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines.

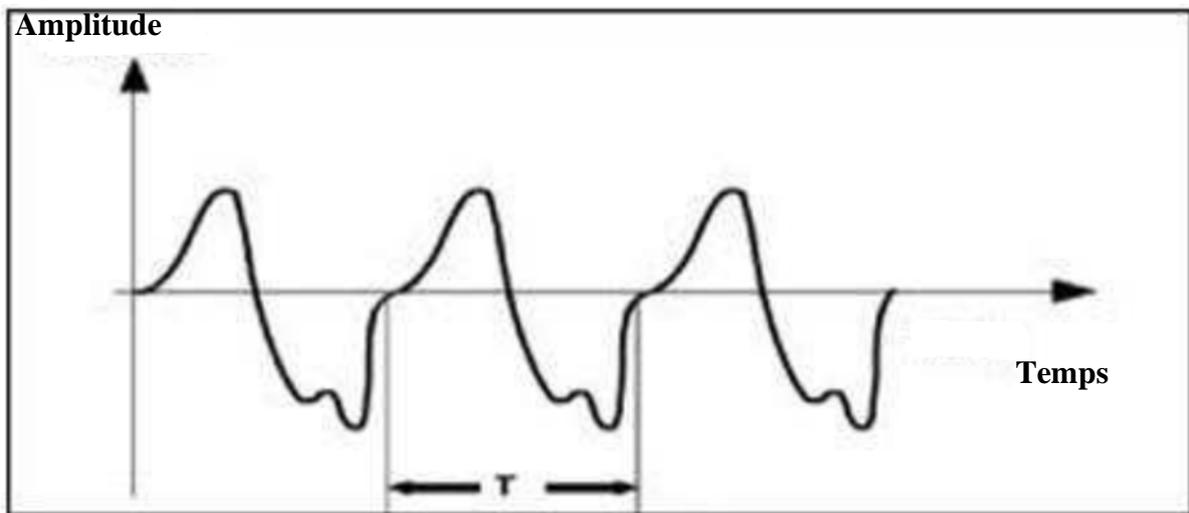


Figure III-3-Vibration périodique.

$$X(t) = \sum_{i=1}^n [X_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)] \dots\dots\dots \text{Eq (III-2)}.$$

III-9-3-Vibrations apériodique :

Une vibration apériodique est telle que son comportement temporel est quelconque, c'est-à-dire que l'on n'observe jamais de reproductibilité dans le temps. C'est le cas des chocs que l'on enregistre sur un broyeur.

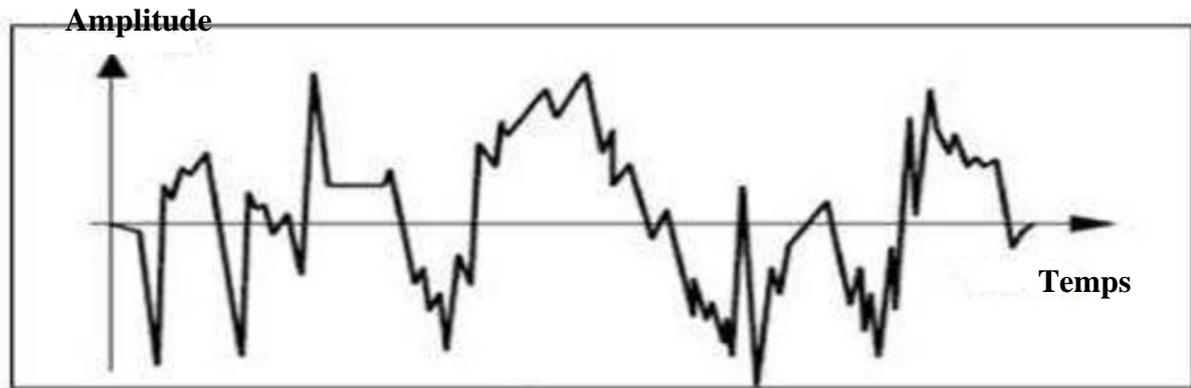


Figure III-4-Vibration apériodique.

$$X(t) = \sum_{i=1}^{\infty} [X_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)] \dots\dots\dots \text{Eq (III-3).}$$

III-10-L'analyse spectrale :

Une vibration harmonique est composée d'une composante fondamentale et d'un cortège d'harmoniques. Pour décrire complètement une telle vibration, il faut spécifier le niveau et la fréquence de chaque composante. L'analyse spectrale est la technique de détermination de ces valeurs, par calculs ou mesures. On doit à Fourier une méthode analytique de décomposition d'une vibration périodique en ses composantes : c'est la série de Fourier. Plus généralement,

On peut démontrer que tout phénomène périodique, par exemple une vibration, est décomposable en vibrations pures. Ainsi une vibration non périodique est considérée comme une vibration périodique dont la période devient infiniment grande. Il peut être alors décrit sous forme d'une somme infinie de composantes fréquentielles infiniment proches. C'est la transformation de Fourier qui permet ce calcul. Les travaux mathématiques de Fourier (1768-1830) ont permis le développement des sciences, en particulier du traitement de signal.

III-11-Le spectre :

Le spectre d'une vibration est l'ensemble des données de niveaux et de fréquences des vibrations pures le composant. Il est habituellement représenté sous la forme d'un graphique. Un spectre est obtenu par analyse spectrale, par exemple en utilisant les algorithmes de Fourier. [15]

III-12-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 existant 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 intérieure).
- Soit par la modification de l'amplitude des raies spectrales déjà existées dans le spectre à l'état sain.

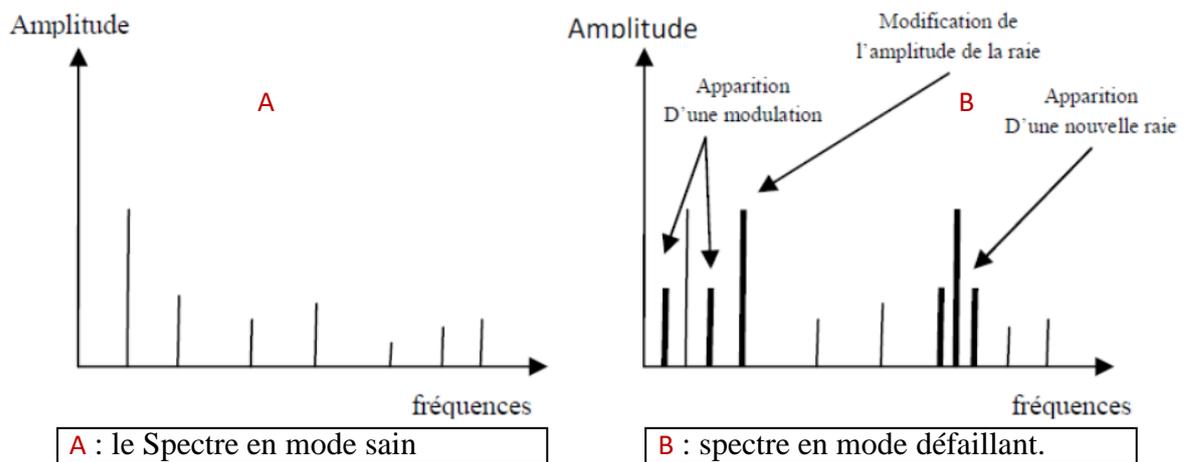


Figure III-5-La différence entre le Spectre en mode sain et le spectre en mode défaillant.

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.

III-13- L'application de la méthode de l'analyse spectrale pour la détection des défauts des roulements :

III-13-1- 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.

❖ Principales caractéristiques d'un accéléromètre piézoélectrique :

- Taille très variable, adaptée à la configuration d'essai
- Très large gamme de fréquences et d'accélérations et bonne linéarité sur sa gamme de fonctionnement.
- Robustesse et fiabilité dues à l'absence de pièces mobiles.
- Les accéléromètres piézo-électriques sont de nature très sensible et permet une mesure efficace.



Figure III-6-Piézoélectrique.

Exemple : Le banc d'essai américain (**Figure III-6**) se compose d'un moteur, un capteur de couple, un dynamomètre, et un circuit électronique de commande (non représentée).

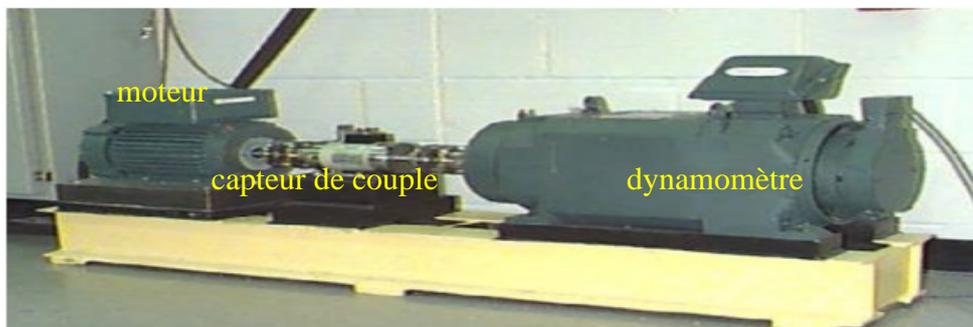


Figure III-7-Le banc d'essai Américain (Data bearing center).

Les roulements ont été utilisés pour des défauts de diamètres :

- 0.01778 (mm).
- 0.03556 (mm).
- 0.05334 (mm).
- 0.07112 (mm).

Les essais ont été réalisés sur le palier côté accouplement (Drive End bearing) de type 6205-2RS JEM SKF [16].

III-13-2-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 :

Diamètre intérieur En (mm)	Diamètre extérieur En (mm)	Epaisseur En (mm)	Diamètre de bille En (mm)	Diamètre moyen de roulement En (mm)
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	Elément roulant
5.4152	3.5848	0.39828	4.7135

TAB- III-2 Coefficient des défauts.

Les signaux vibratoires ont été acquit 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.

III-13-3-Characterisation des signatures spectrales des défauts des roulements :

III-13-3-1-Characterisation des signatures spectrales de roulement à l'état sain :

Dans la 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.

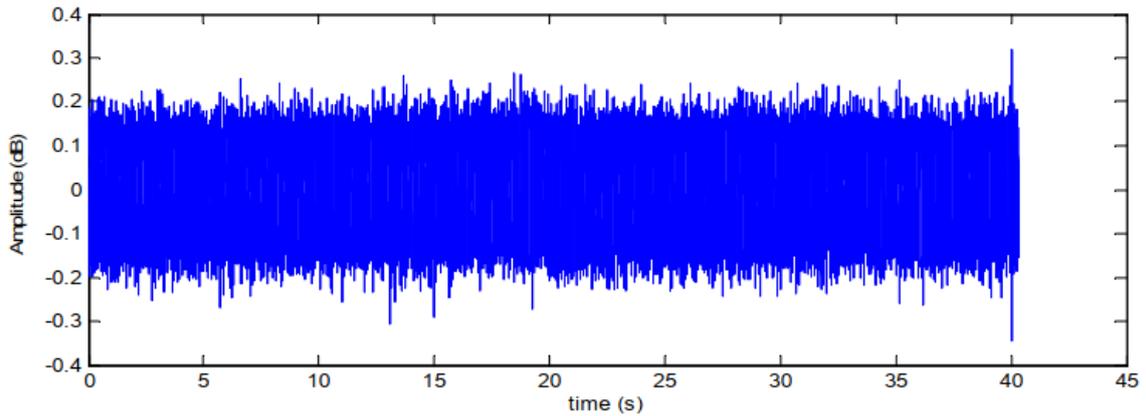


Figure III-8-Signal temporel de roulement à l'état sain.

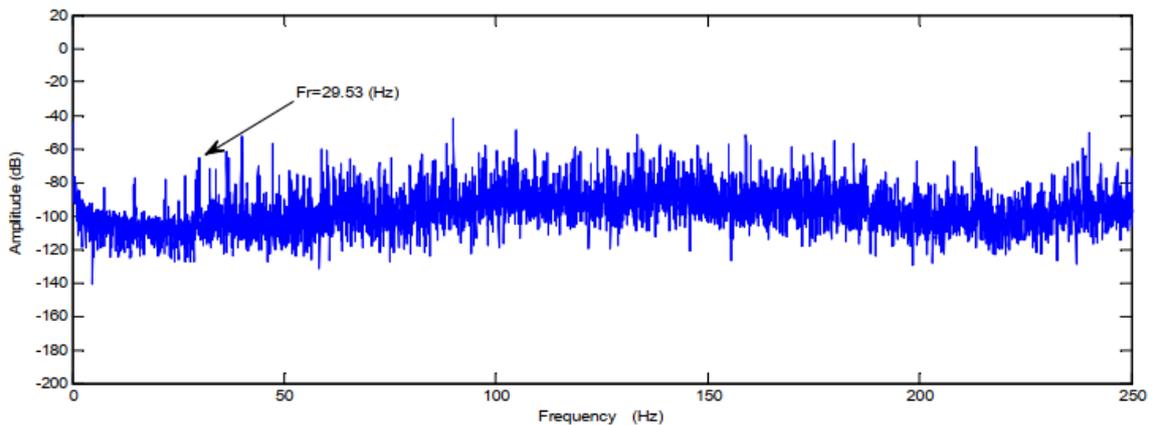


Figure III-9- Spectre de roulement à l'état sain.

III-13-3-2-Caractérisation des signatures spectrales à l'état défaillant :

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 :

$$f_{defaut} = f_r * C_{defaut} \dots\dots\dots \text{Eq (III-4).}$$

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

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

L'élément défaillant	La bague externe	La bague interne	L'élément roulant (la bille)
La fréquence caractéristique de défaut en (Hz)	105.87	159.87	137.157

TAB- III-3- Les fréquences caractéristiques des éléments défaillants de roulement.

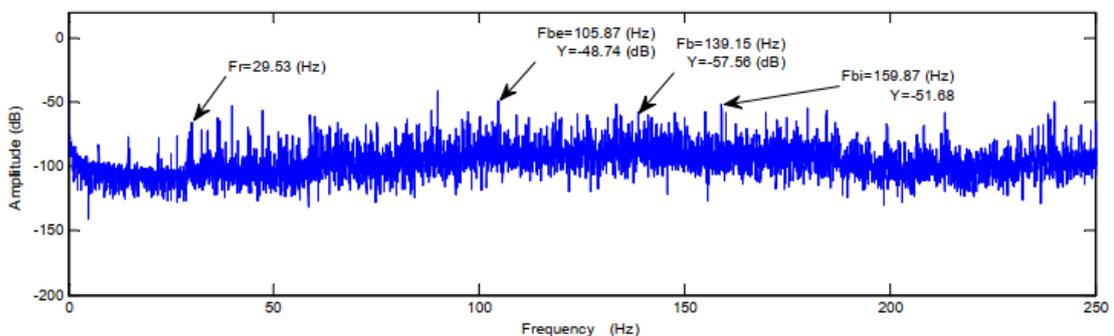


Figure III-10- spectre de roulement à l'état sain avec les fréquences caractéristiques des défauts de roulement.

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} : 159.87 Hz : fréquence caractéristique de défaut de la bague interne, son amplitude est -51.68dB.
- f_{be} : 105.87 Hz : fréquence caractéristique de défaut de la bague externe, son amplitude est : -48.74 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.

III-13-3-2-1-Signatures spectrales de défaut de la bague externe :

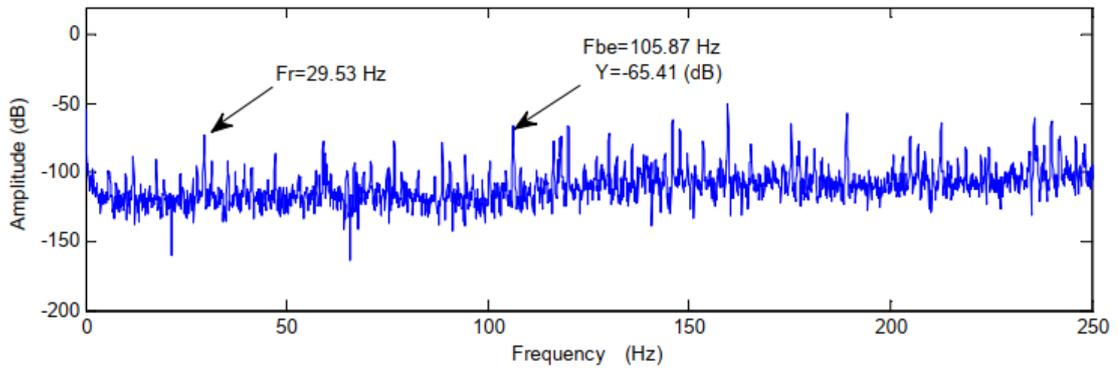


Figure III-11- spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égale à 0.01778 (mm).

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

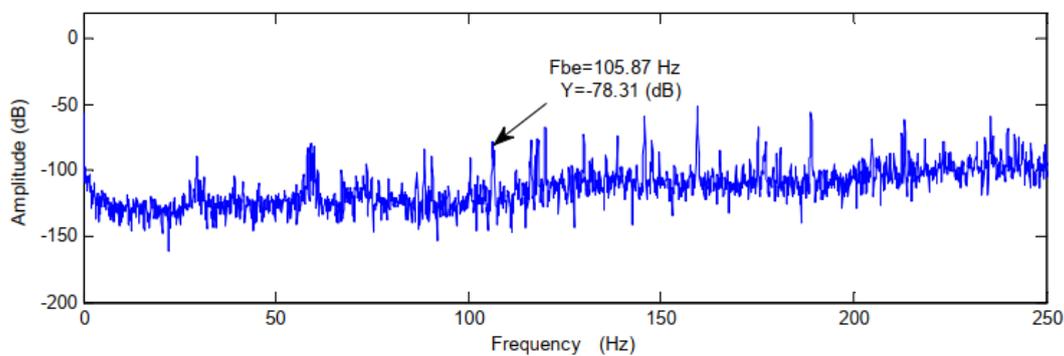


Figure III-12- spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.03556 (mm).

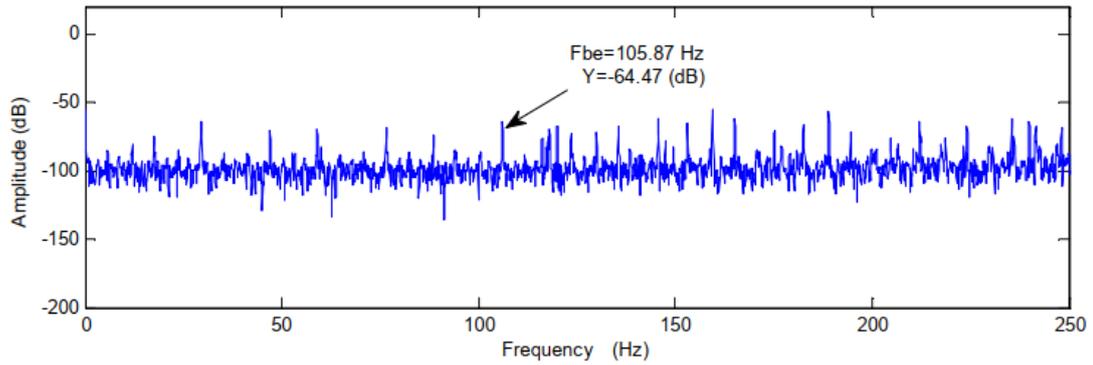


Figure III-13- spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.05334 (mm).

- Le tableau suivant qui résume les résultats des évolutions précédents :

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	défaut 0.01778	défaut 0.03556	défaut 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.

On va tracer avec **logicielle Excel** la courbe de l'évolution de l'amplitude de raie de fréquence $f_{be} = 105.87 \text{ Hz}$ en fonction des diamètres de défaut.

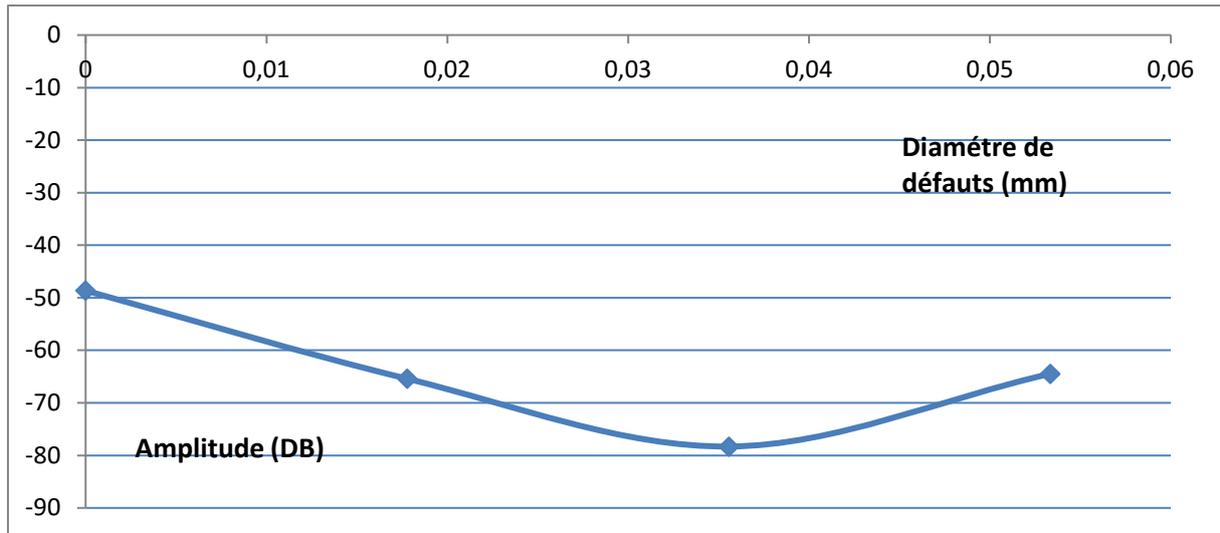


Figure III-14- l'évolution des **amplitudes** fonction de **diamètre de défaut** de la bague externe.

D'après les spectres précédents et les résultats résumés dans le tableau et présentés dans la (Figure III-14), 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.

III-13-3-2-2- Signatures spectrales de défaut de la bague interne :

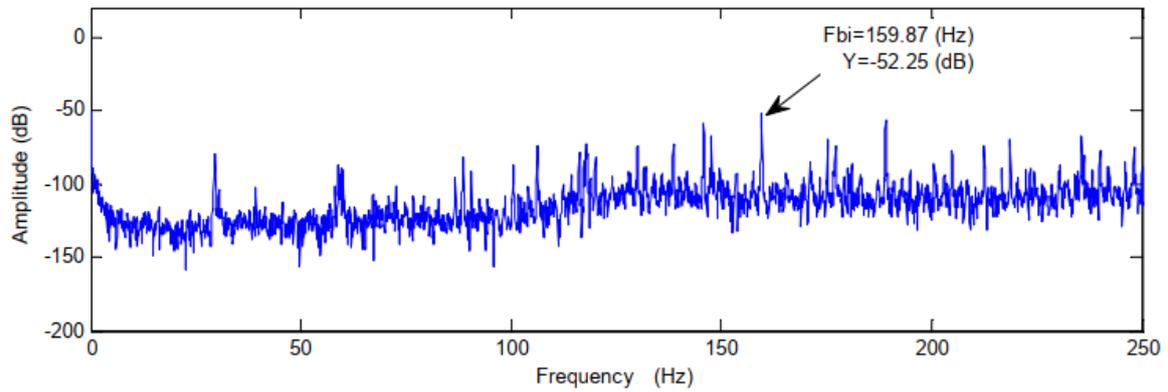


Figure III-15- spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.01778 (mm).

Cette figure qui montre le spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal 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 défailant, ce qui nous montre l'existence d'un défaut de la bague interne de diamètre 0.01778 (mm).

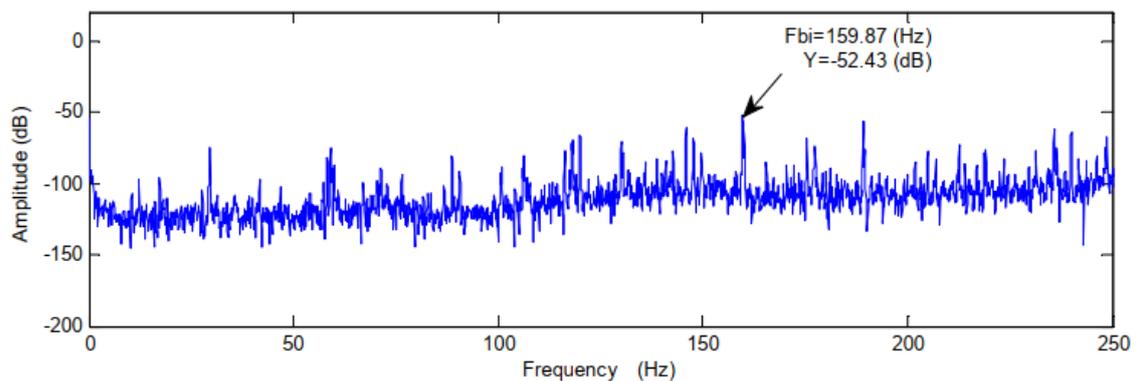


Figure III-16- spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.0356 (mm).

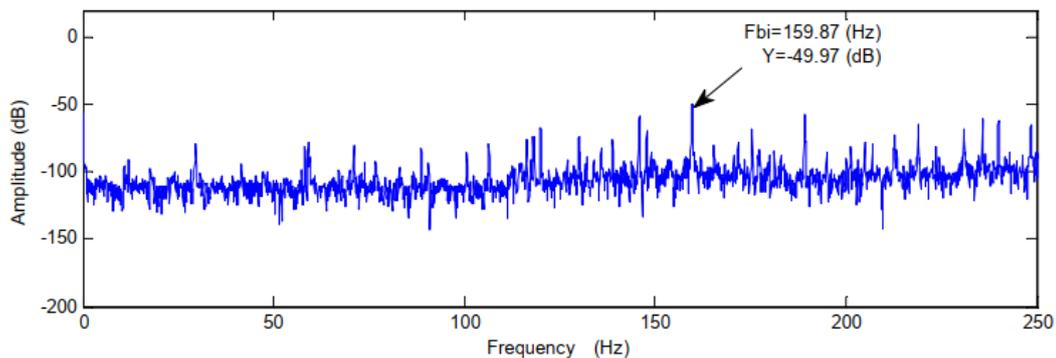


Figure III-17- spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.05334 (mm).

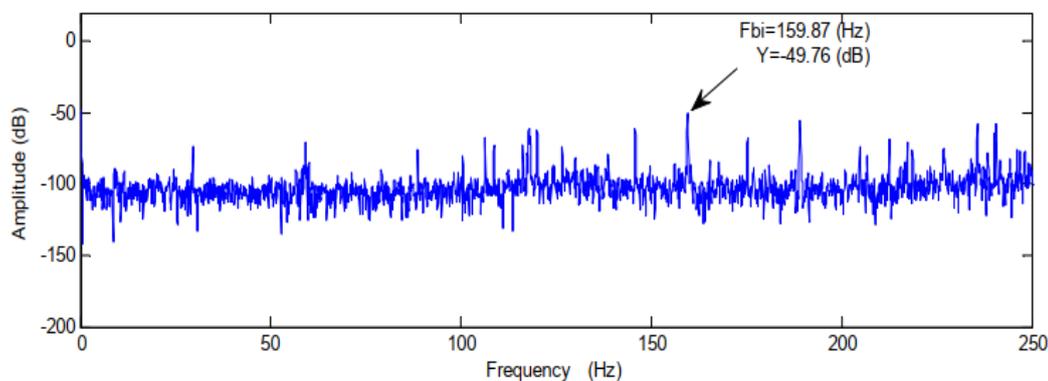


Figure III-18- spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.07112 (mm).

- Le tableau suivant qui résume les résultats des évolutions précédents :

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.

On va tracer avec **logicielle Excel** la courbe de l'évolution de l'amplitude de raie de fréquence $f_{be} = 159.87 \text{ Hz}$ en fonction des diamètres de défaut.

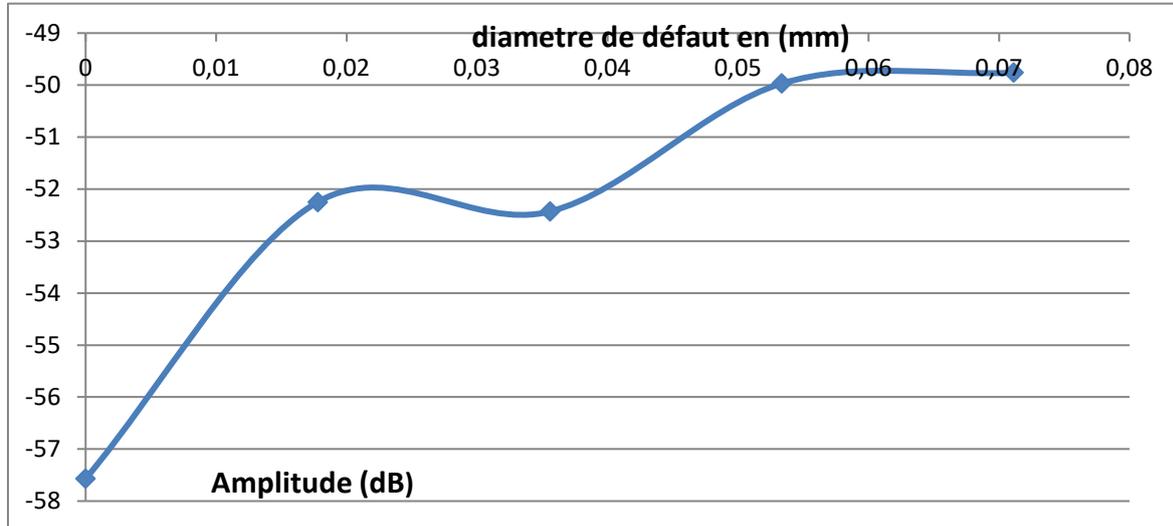


Figure III-19- l'évolution de l'amplitude des raies en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.

D'après les spectres précédents et les résultats résumés dans le tableau et présentés dans la figure (**Figure 3-16**), l'amplitude de la raie de fréquence caractéristique de défaut de la bague interne varie aléatoirement aussi suivant l'augmentation de diamètre de défaut.

III-13-3-2-2- Signatures spectrales de défaut de la bille :

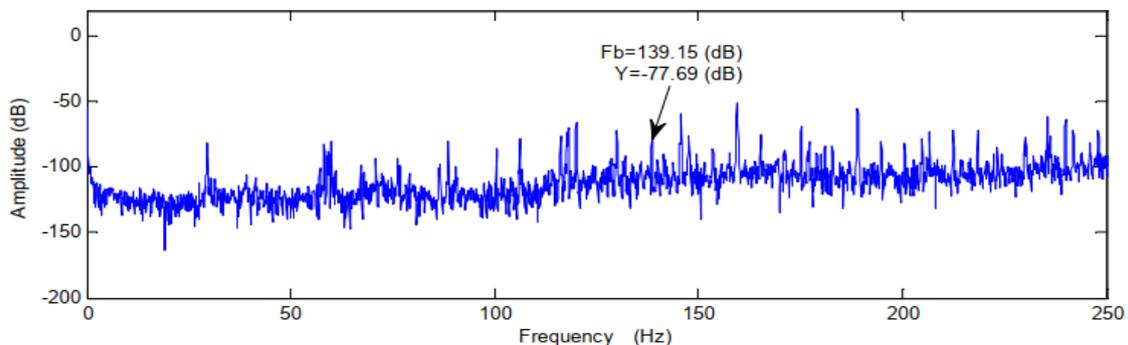


Figure III-20- spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.01778 (mm).

y a une variation d'amplitude de raie de fréquence $f_b=139.157 \text{ Hz}$ 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) .

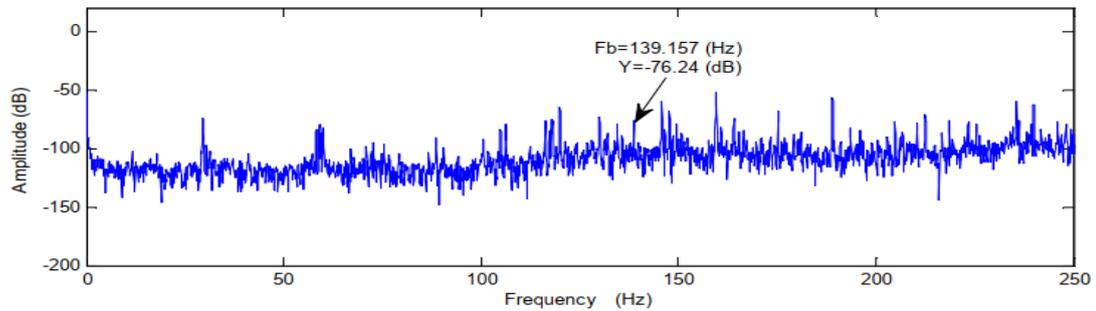


Figure III-21- spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.0356 (mm) .

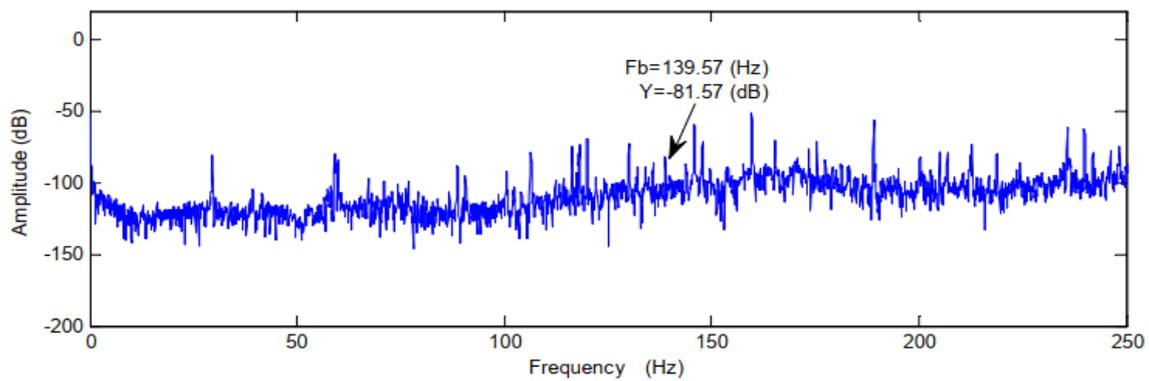


Figure III-22- spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.05334 (mm) .

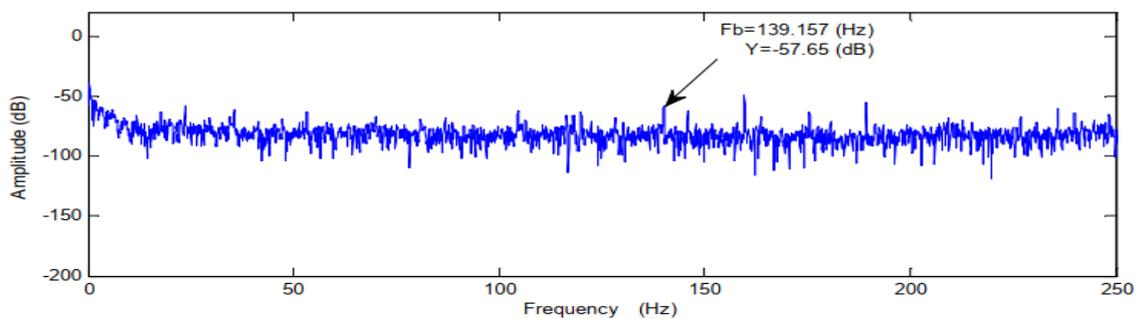


Figure III-23- spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.07112 (mm) .

- Le tableau suivant qui résume les résultats des évolutions précédents :

Diamètre de défaut (mm)	0 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.

On va tracer avec **logicielle Excel** la courbe de l'évolution de l'amplitude de raie de fréquence $f_{be} = 139.157$ Hz en fonction des diamètres de défaut.

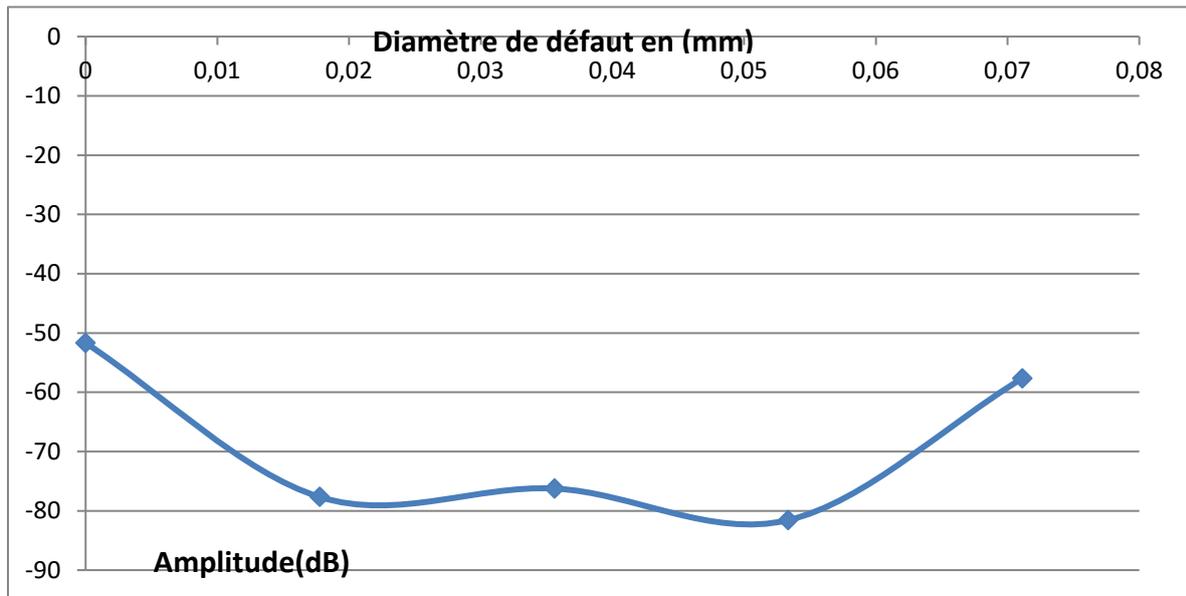


Figure III-24- évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bille.

D'après les résultats résumés dans le tableau et présentés dans la figure (**Figure 3-19**), 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.

III-14- Conclusion :

Dans le dernier chapitre nous avons présenté L'une des méthodes de maintenance surveillance le plus utiliser, c'est l'analyse spectrale vibratoire pour la détection des défauts des roulements.

Nous avons analysé quelques signaux vibratoires des roulements à l'état sain et à l'état défaillant pour détecter des défauts par comparaison enter les signaux dans toutes les étapes.

Ces signaux ont été obtenus du banc d'essai American et on les a étudiés dans un environnement Matlab, ou on a suivi l'évolution de défaut par rapport de son diamètre.

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

Conclusion générale

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.

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.

Ce mémoire est 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.

L'analyse vibratoire qui a donné des bonnes 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 avait aussi cité les différents types des roulements et les défauts qui peuvent les affecter en indiquant chaque défaut.

Le 2^{ème} chapitre de notre travail a permis de donner une idée générale sur la maintenance surveillance et les objectifs de la maintenance, et avait aussi cité les différents types de la maintenance Afin de préserver et entretenir les machines avant qu'elles ne tombent en panne.

Dans la 3^{ème} chapitre on avait 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 panne surtout lorsque on parle des défauts lies aux éléments des machines tournantes qui produisent des chocs périodiques comme les engrenages, les roulements ...

Cette méthodes 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 des nouvelles fréquences des défauts ou bien des modifications des l'amplitudes des raies des fréquences des défauts ,cela signifiera qu'un défaut est apparu au niveau de roulement.

Références bibliographiques

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

[2] Bonnett, A. H., & Yung, C. (2008). "Increased efficiency versus increased reliability", *Industry Applications Magazine, IEEE*, 14(1), 29-36.

[3] 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.

[4] : 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/>.

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

[6] : THESE. " Présentée en vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORATS** ".
BOUZAOUIT Azzedine. Année : **2008**.

[7] : «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».

[8] : 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.

[9]: D. Baillie and J. Mathew, "Diagnosing rolling element bearing faults with artificial neural networks", *Acoustics Australia*, vol. 22, pp. 79-84, 1994.

[10] : J. Altmann, "Application of discrete wavelet packet analysis for the detection and diagnosis of low speed rolling-element bearing faults", Ph.D thesis, Monash University, Melbourne, Australia, 1999.

[11]: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.

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

[13]: 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

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

[15] <http://www.spectraquest.com/products/abvtbing.html>.

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