



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Machines électriques

Réf. : ..

Présenté et soutenu par :
MOKHTARI Yaakoub

Le : dimanche 7 juillet 2019

Diagnostic des défauts mécaniques du moteur asynchrone par l'analyse vibratoire

Jury :

Dr.	DERGHAL Hamid	MAA	Université de biskra	Rapporteur
Dr.	SAHRAOUI Mohamed	MCA	Université de biskra	Président
Pr.	YEHIA Khaled	Pr	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
Électrotechnique
Machines électriques

Présenté et soutenu par :
MOKHTARI Yaakoub

Le : dimanche 7 juillet 2019

Diagnostic des défauts mécaniques du moteur asynchrone par l'analyse vibratoire

Présenté par :
MOKHTARI Yaakoub

Avis favorable de l'encadreur :

DERGHAL Hamid

signature

Avis favorable du Président du Jury

Signature

SAHRAOUI Mohamed

Cachet et signature

Dédicace

A tout unificateur dans le monde ,A mes chers ;

parents que je dois toute ma gratitude ;

A mes frères : Antar,Chiboub,Ishak,ODAY;

A mes soeurs ;

A la ma familleMokhtari ;

Remerciement

Le grand remerciement revient à Dieu qui m'a donné la force et le courage à réaliser et terminer ce modeste travail, Je tiens à remercier vivement mon encadreur Dr. DERGHAL Hamid pour m'avoir encadré encouragé et conseillé durant la période du mémoire, Je remercie tout le personnel Enseignant du département génie électrique, Par la même occasion, je remercie vivement tous mes amie sans exception, ainsi que tous les personnes qui de près ou de loï, ont contribué à la réalisation de ce travail.

.

Résumé

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

L'étude que nous allons faire se base sur l'application d'une technique de traitement de signal qui est une solution efficace pour le diagnostic des défauts de roulements, cette méthode est l'analyse spectrale, qui s'appuie sur la FFT (Fast Fourier transformer), et on étudier l'influence des paramètres suscités sur la sensibilité des indicateurs scalaires, qui sont des outils d'aide au diagnostic des défauts simulés sur les roulements,

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

Abstract

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

The study we're going to do is based on the application of a signal processing technique is an effective solution for the diagnosis of bearing fault, this method is spectral analysis, which is based on the FFT (Fast Fourier transform). The aim of this work is to study the influence of above mentioned parameters on the sensitivity of the scalar indicators , which are tools to aid in the implementation of the diagnosis thy defects of bearing

Keywords: diagnostics, Vibration ,analysis spectrum, bearing, Fourier transforms, defects.
spectrum

ملخص

تطور تشخيص العيوب الميكانيكية لآلة الدوران، من خلال تحليل الاهتزاز بشكل كبير في السنوات الأخيرة، بفضل تقنيات معالجة الإشارات المتقدمة. تتيح هذه التقنيات الآن اكتشاف وجود عيب في مرحلة مبكرة وتحديد طبيعته، وتحديد شدته ومتابعة تطوره. هذا العمل جزء من موضوع مراقبة وتشخيص العيوب الميكانيكية وخاصةً عيوب المدحرجات. تعتمد الدراسة التي سنقوم بها، على تطبيق تقنية معالجة الإشارات التي تعد حلاً فعالاً لتشخيص عيوب المدحرجات، وهذه الطريقة هي التحليل الطيفي، والذي يعتمد على (التحويل الفوري السريع)، و دراسة كذلك تأثير المتغيرات المدروسة على حساسية المؤشرات السلمية، والتي تعتبر أدوات للمساعدة في تشخيص أخطاء المحاكاة على المدحرجات.

الكلمات المفتاحية: تشخيص، اهتزاز، التحليل الطيفي، المدحرجات، التحويل الفوري السريع، طيف، خلل.

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau (II-1) : les quatre niveaux de maintenance.....(26)

Chapitre III

Tableau (III-1) :La géométrie du roulement (en mm).....(41)

Tableau(III-2): fréquences de défaut (multiple la fréquence de l'axe en Hz.....(41)

Tableau (III-3)) : fréquences caractéristiques des éléments défailants de roulement.....(43)

Tableau (III-4)): évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.....(46)

Tableau (III-5) : évolution de inducteur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.....(47)

Tableau (III-6) : évolution de inducteur scalaire RMS en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.....(48)

Tableau (III-7) : évolution de inducteur scalaire **Fc** en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.....(48)

Tableau (III-8): évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.(45)(50)

Tableau (III-9) : évolution de inducteur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.....(51)

Tableau (III-10) : évolution de inducteur scalaire **RMS** en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.....(52)

Tableau (III-11) : évolution de inducteur scalaire **Fc** en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.....(53)

Tableau (III-12): évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bille.. (55)

Tableau (III-13) : évolution de inducteur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut.de la bille.....(56)

Tableau (III-14) : évolution de inducteur scalaire **RMS** en fonction de diamètre de défaut de la bille.....(57)

Liste des tableaux

Tableau (III-15) : évolution de l'indicateur scalaire F_c en fonction de diamètre de défaut de la bille.....(58)



Liste des figures

Chapitre I

Figure (I-1) : Origine du bruit.....	(4)
Figure (I-2) : Vibrations périodiques.....	(5)
Figure (I-3) : Vibrations d'un système "masse ressort".....	(5)
Figure (I-4) : Vibration sinusoïdale.....	(6)
Figure (I-5) : Logarithme des vibrations.....	(7)
Figure (I-6) : l'amplitude, de la période, de la fréquence.....	(8)
Figure (I-7) : les différents types des signaux vibratoires	(9)
Figure (I-8) : la chaine de mesure analogique.....	(11)
Figure (I-9) : la chaine de mesure numérique	(12)

Chapitre II

Figure (II-1) : les différentes étapes de processus de diagnostic.....	(18)
Figure (II-2) : Principe de surveillance avec modèle.....	(21)
Figure (II-3) : Principe de la surveillance par estimation para métrique.....	(22)
Figure (II-4) : Principe de la surveillance par observateurs.....	(22)
Figure (II-5) : types de maintenance.....	(26)
Figure (II-6) : Organisation de la maintenance conditionnelle.....	(27)
Figure (II-7) : Défaut de balourd.....	(29)
Figure (II-8) : Défauts désalignement.....	(29)
Figure (II-9) : Eléments de roulement.....	(30)
Figure (II-10) : Ecaillage sur la bague intérieure.....	(32)
Figure (II-11) : Ecaillage sur la bague extérieure.....	(33)
Figure (II-12) : Ecaillage sur l'élément roulant.....	(33)

Chapitre III

Figure (III-1) : schéma bloc de la chaine d'acquisition et de traitement de signal.....	(34)
Figure (III-2) : l'échantillonnage d'un signal $s(t)$	(35)
Figure (III-3) : exemple d'un échantillonnage parfait.....	(36)

Liste des figures

Figure (III-4) : exemple d'un mauvais échantillonnage (recouvrement)	(36)
Figure (III-5) : signal temporel et sa représentation fréquentiel.....	(37)
Figure (III-6) : filtre passe bas.....	(38)
Figure (III-7) : a)spectre en mode sain, b) spectre en mode défaillant.....	(39)
Figure (III-8) : le banc d'essai Américain (Data bearing center)	(40)
Figure (III-9) : signal temporel de roulement à l'état sain.....	(42)
Figure (III-10) : spectre de roulement à l'état sain avec les fréquences caractéristiques des défauts de roulement.....	(43)
Figure (III-11) : spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égale à 0.1778 (mm)	(44)
Figure (III-12) : spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.3556 (mm)	(45)
Figure (III-13) : spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.03556 (mm)	(45)
Figure (III-14) : l'évolution des amplitudes fonction de diamètre de défaut de la bague externe.....	(46)
Figure (III-15) : l'évolution de indicateur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.....	(47)
Figure (III-16) : l'évolution de indicateur scalaire RMS en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.....	(48)
Figure (III-17) : l'évolution de indicateur scalaire Fc en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.....	(49)
Figure (III-18) : spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.1778 (mm)	(49)
Figure (III-19) : spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.3556 (mm)	(50)
Figure (III-20) : spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.5334 (mm)	(50)
Figure (III-21) : l'évolution de l'amplitude des raies en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.	(51)
Figure (III-22) : l'évolution de indicateur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.....	(52)
Figure (III-23) : l'évolution de indicateur scalaire RMS en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.....	(53)

Liste des figures

- Figure (III-24)** : l'évolution de indicateur scalaire **Fc** en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.....(54)
- Figure (III-25)** : spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.1778 (mm)(54)
- Figure (III-26)** : spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.3556 (mm)(55)
- Figure (III-27)** : spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.5334 (mm)(55)
- Figure (III-28)** : l'évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bille.....(56)
- Figure (III-29)** : l'évolution de indicateur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut de la bille.....(57)
- Figure (III-30)** : l'évolution de indicateur scalaire **RMS** en fonction de diamètre de défaut de la bille.....(57)
- Figure (III-31)** : l'évolution de indicateur scalaire **Fc** en fonction de diamètre de défaut de la bille.....(58)
-

Sommaire

Introduction générale..... (1)

Chapitre I: Généralités sur les vibrations

I.1. Introduction.....(3)

I.2. Définition d'une vibration.....(3)

I.2.1. Approche intuitive(3)

I.2.1.1. Perception subjective des phénomènes(3)

I.2.1.2 Le. bruit(3)

I.2.1.3. Origine du bruit rayonné par une machine..... (4)

I.3. Les vibrations..... (4)

I.3.1. Vibrations d'une machine.....(4)

I.3.2. Origine des phénomènes(4)

I.4. Définition théorique d'une vibration.....(4)

I.4.1. Vibrations périodiques.....(4)

I.4.2. Vibrations aléatoires..... (5)

I.4.3. Vibrations d'un système "masse-ressort".....(5)

I.4.4. Vibration sinusoïdale..... (6)

I.5. Description de la vibration..... (6)

I.5.1. Logarithme(6)

I.5.2. Niveau en décibel – DB5.....(7)

I.5.3. Niveau d'accélération(7)

I.5.. Niveau de déplacement :.....(7)

I.6.1. Amplitude et fréquence:.....(8)

I.6.2. Intensité et fréquence :.....(8)

I.6.3. Définition de l'amplitude, de la période, de la fréquence :.....(8)

I.6.4. Amplitude et période :.....(8)

I.7. Type des signaux:.....(8)

I.7.1. Déterministe :.....(8)

I.7.2. Aléatoire :(9)

I.8. Caractéristiques d'un signal vibratoire :(9)

I.9. Chaîne de mesure :(10)

Sommaire

I.9.1. Capteurs des vibrations :	(12)
I.9.2. Types des capteurs :	(13)
I.9.2.1. Accéléromètre piézo-électrique:	(13)
I.9.2.2. Capteurs à courant de Foucault :	(13)
I.9.3. Le conditionnement du signal :	(13)
I .10. Les indicateurs scalaires :	(14)
I .10.1. Le kurtosis :	(14)
I .10.2. La valeur crête : V_c .	(14)
I .10.3. La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square) :	(14)
I .10.4. Facteur de crête.	(15)
I.11 .Conclusion :	(15)

Chapitre II : Diagnostic et maintenances industriel

II 1. Introduction	(16)
II.2. Définitions relatives au diagnostic	(16)
II.2.1. Le diagnostic	(16)
II.2.2. La détection	(17)
II.2.3. Le défaut	(17)
II.2.4. Le défaut	(17)
II.2.5. La dégradation	(18)
II.2.6 La panne	(18)
II.3. Les différentes étapes de diagnostic	(18)
II.3.1. Etape d'acquisition de données	(19)
II.3.2. Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts	(19)
II.3.3. Etape de d'élaboration d'indicateurs de défauts	(19)
II.3.4. Etape de localisation	(19)
II.3.5 .Etape de prise de décision	(19)
II.4. Techniques et méthodes de diagnostic	(20)
II.4.1. Classification des méthodes de diagnostic	(20)
II.4.1.1 .Méthodes de diagnostic avec modèles	(20)
II.4.1.2. Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle	(20)
II.4.1.3. Les méthodes de diagnostic par modélisation physique	(20)
II.4.2. Méthodes de diagnostic sans modèles	(22)

Sommaire

II.4.2.1.La reconnaissance des formes.....	(23)
II.5. Quelques techniques de diagnostic par approche signal.....	(23)
II.5.1. Analyse temporelle.....	(23)
II.5.2. Analyse frequentielle.....	(24)
II.6. Maintenance :	(24)
II.6.1. But de la maintenance :	(24)
II.6.1.1 Objectifs financiers :	(24)
II.6.1.2 Objectifs opérationnels :	(24)
II.6.2. Types de la maintenance :	(24)
II.6.2.1. Maintenance préventive :	(24)
II.6.2.1.1. Maintenance systématique :	(24)
II.6.2.1.2. Maintenance conditionnelle :	(25)
II.6.2.2. Maintenance corrective :	(26)
II.6.3. Niveaux de maintenance :	(26)
II.6.4. Organisation de la maintenance conditionnelle :	(27)
II.6. 5. Classement des machines :	(27)
II.6.5.1. Vitales :	(28)
II.6.5.2. Importante :	(28)
II.6.5.3. Secondaire :	(28)
II.6.6. La cinématique :	(28)
II.7. Défauts des machines tournantes :.....	(28)
II.7.1. Balourd :.....	(28)
II.7.2. Désalignement.....	(29)
II.7.3. Mauvais serrage mécanique :.....	(29)
II.8. Les roulements :.....	(29)
II.8.1. Eléments de roulements :.....	(30)
II.8.2. défauts des roulements : :.....	(32)
II.9. Caractéristiques du signal engendré par le roulement endommagé :.....	(32)
II.9.1. Défaut de la bague interne :.....	(32)
II.9.2.Défaut sur la bague externe :.....	(32)

II.9.3. Défaut de l'élément roulant :	(33)
II.10. Conclusion.....	(33)

Chapitre III : Détection et caractérisation des défauts de roulement par l'analyse spectrale

III. 1. Introduction.....	(34)
III. 2. Définitions.....	(34)
III. 2.1. Chaîne d'acquisition d'un signal.....	(34)
III. 2.2. Echantillonnage.....	(34)
III. 2.2.3 Théorème Shannon.....	(35)
III. 3. L'analyse spectrale.....	(36)
III. 3.1. La transformée de Fourier discrète et rapide.....	(37)
III. 3.2. Transformée de Fourier à fenêtre glissante.....	(37)
III. 3.3. Filtre anti-repliement.....	(38)
III. 3.4. Principe de détection des défauts par l'analyse spectrale.....	(38)
III.4. L'application de la méthode de l'analyse spectrale pour la détection des défauts des Roulements.....	(40)
III.4.1 Description de l'expérience.....	(40)
III.4.2.Géométrie et caractéristiques du roulement à étudier.....	(41)
III.4.3. Caractérisation des signatures spectrales des défauts des roulements.....	(42)
III.4.3.1.Caractérisation des signatures spectrales à l'état sain.....	(42)
III.4.3.2.Caractérisation des signatures spectrales à l'état défaillant.....	(43)
III.4.3.2.1.signatures spectrales de défaut de la bague externe.....	(45)
III.4.3.2.1.1.Kurtosis	(47)
III.4.3.2.1.2.RMS.....	(48)
III.4.3.2.1.3.Facteur de crête	(48)
III.4.3.2.2.signatures spectrales de défaut de la bague interne.....	(49)
III.4.3.2.1.1.Kurtosis	(51)
III.4.3.2.1.2.RMS	(52)
III.4.3.2.1.3.Facteur de crête	(53)
III.4.3.2.3.signatures spectrales de défaut de la bille.....	(54)
III.4.3.2.1.1.Kurtosis.....	(56)
III.4.3.2.1.2.RMS.....	(57)
III.4.3.2.1.3.Facteur de crête.....	(58)
III.5. Conclusion.....	(59)

Introduction générale

L'activité de maintenance des installations industrielles fait appel depuis une vingtaine d'années à des techniques de diagnostic plus en plus sophistiquées. Plusieurs techniques de détection de défauts sont aujourd'hui à la disposition des ingénieurs de maintenance . pour la détection des défauts d'origine électrique ou mécanique, la détection ultrasonore et l'analyse des vibrations mécaniques.

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

L'analyse vibratoire est couramment utilisée pour le diagnostic des 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), ainsi que le calcul d'indicateurs scalaires tels que, le facteur de crête et kurtosis, valeur efficace.

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 comptes tenus de leur simplicité et leur capacité à éviter les frottements mécaniques. La détection de pannes de ces roulements se fait en analysant les vibrations enregistrées avec des accéléromètres mis en place pour le diagnostic.

Ce travail a pour but d'appliquer le traitement de signal dans la maintenance industrielle, en faisant un diagnostic pour la détection et la caractérisation des défauts qui peuvent affecter les différents éléments de roulements par la méthode d'analyse spectrale ont appliqué les inducteur scalaire (Kurtosis, Facteur de crête, et Valeur efficace) sur les signaux sains et défaillants .Ce mémoire est organisé en trois chapitres répartis comme suit :

- **Le chapitre I :** est introduit à étude théorique sur l'analyse vibratoires, les différentes méthodes et technique utilisée et celle toujours en voie de développement pour l'analyse vibratoire.

- **Dans Le chapitre II:** nous présenterons le diagnostic et maintenance dans industriel et les différentes méthodes utilisées pour la détection des défauts qui existent couramment dans l'industrie (traitement signal) et on présenter les défauts de roulement et les fréquences des bague externe ,interne ,bille.

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

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

Chapitre I:

Généralités sur les vibrations

I.1. Introduction :

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations, images des efforts dynamiques engendrent par les pièces en mouvement, ainsi une machine neuve en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibrations.

La détérioration du fonctionnement conduit le plus souvent à un accroissement du niveau des vibrations, en observant l'évolution de ce niveau, il est par conséquent possible d'obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine.

Ces vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour effectuer un diagnostic, la modification de la vibration d'une machine constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradations, voire de pannes.

Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse des vibrations, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puis qu'elle permet, par un dépistage ou un diagnostic approprié des défauts, d'éviter la casse et de n'intervenir sur une machine qu'au bon moment et pendant des arrêts programmés de production.

Dans ce chapitre on présente une étude théorique sur l'analyse vibratoire, les différentes méthodes et technique utilisées et celle toujours en voie de développement.

I.2. Définition d'une vibration

Une vibration est un mouvement d'oscillation mécanique autour d'une position d'équilibre stable ou d'une trajectoire moyenne. La vibration d'un système peut être libre ou forcée.

I.2.1. Approche intuitive :

I.2.1.1. Perception subjective des phénomènes :

A proximité d'une machine :

- On peut entendre le bruit et sentir les vibrations de la machine.
- Ces deux indicateurs peuvent fournir des indications sur un changement de comportement de la machine.
- La quantification et la qualification des vibrations sont des moyens privilégiés pour la maintenance conditionnelle.

I.2.1.2. Le bruit :

Le bruit rayonné dans l'air par une machine résulte de l'action de plusieurs sources.

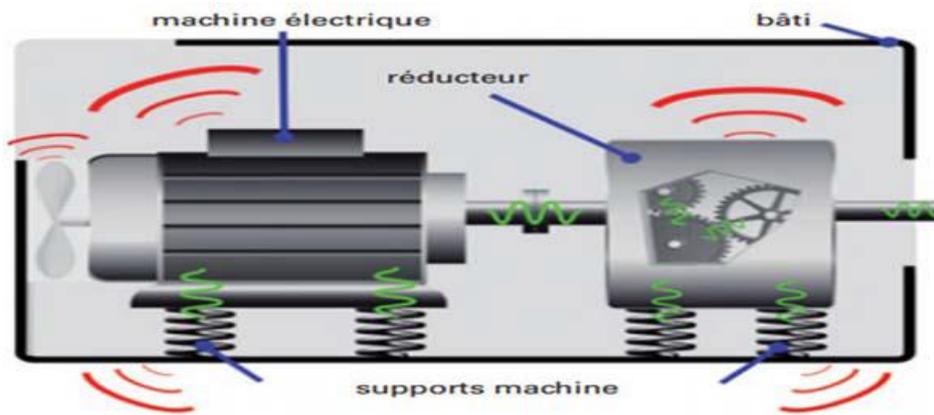


Figure (I-1) : Origine du bruit.

I.2.1.3. Origine du bruit rayonné par une machine :

Le bruit rayonné dans l'air par une machine résulte de l'action de plusieurs sources que l'on peut répartir en 2 groupes :

- Celui des machines ou parties de machines comportant des parties en vibration dont énergie est transmise à l'enveloppe extérieure par des liaisons rigides ou par un fluide.
- Celui des machines ou parties de machines agissant sans intermédiaire sur le milieu environnement en lui transférant de l'énergie directement sous forme de rayonnement acoustique.

I.3. Les vibrations :

I.3.1. Vibrations d'une machine :

Les vibrations d'une machine sont souvent perceptibles par simple contact de la main sur la Structure, les vibrations ressenties proviennent des forces internes à la machine. [1]

I.3.2. Origine des phénomènes :

Il est rarement possible de faire la distinction entre les différentes origines des vibrations perçues.

I.4. Définition théorique d'une vibration :

I.4.1. Vibrations périodiques :

Le motif d'une vibration périodique consiste en la superposition, c'est-à-dire l'addition algébrique d'une vibration pure fondamentale et de vibrations pures harmoniques. Les fréquences des harmoniques sont des multiples entiers de celle du fondamental. Par exemple, le mouvement d'un piston d'un moteur à combustion interne génère des oscillations harmoniques.

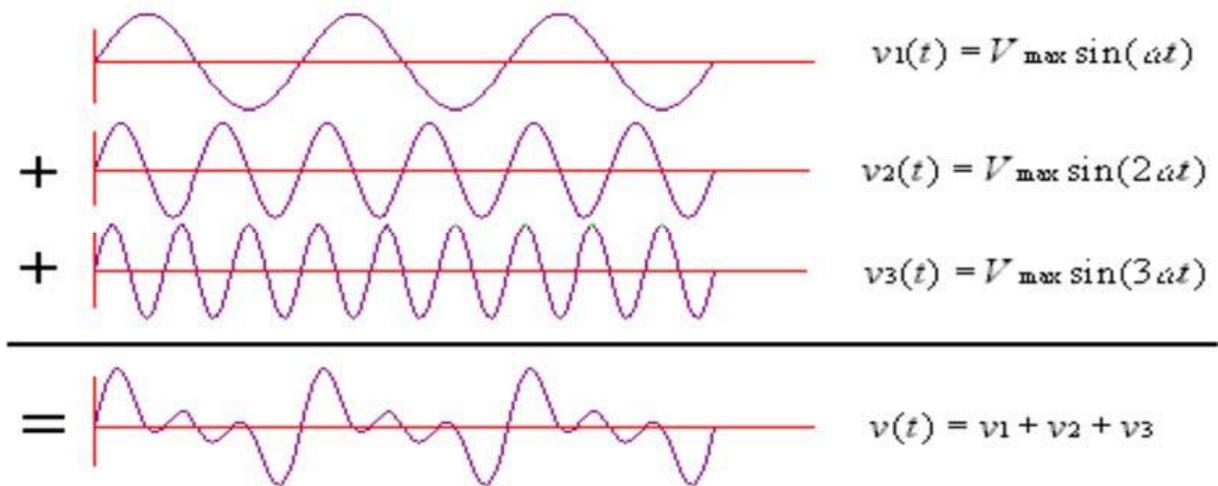


Figure (I-2): Vibrations périodiques.

I.4.2. Vibrations aléatoires :

La forme d'onde des vibrations n'a pas toujours une structure aussi simple que celle des vibrations pures et des vibrations harmoniques. Très souvent, on ne peut plus y distinguer la répétition d'un motif. La forme du signal vibratoire évolue au contraire constamment de manière anarchique. Ce sont les vibrations aléatoires.

I.4.3. Vibrations d'un système "masse-ressort" :

Tout système mécanique, incluant les machines industrielles les plus complexes, peut être représenté par un ou plusieurs systèmes composés d'un ressort, d'un amortisseur et d'une masse. Le corps humain, souvent qualifié de "belle mécanique", est décomposé à la figure suivante en plusieurs sous-systèmes "masse-ressort-amortisseur" représentant la tête, les épaules, la cage thoracique, etc.

Système mécanique complexe :

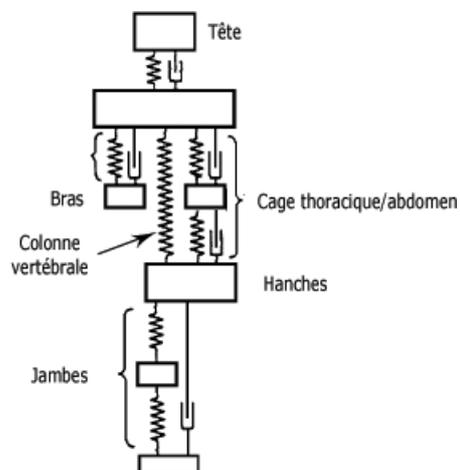


Figure (I-3) : Vibrations d'un système "masse-ressort".

La vibration appliquée à l'homme sort du cadre de ce guide. Par contre, comprendre le phénomène vibratoire associé au système "masse-ressort" constitue une excellente entrée en matière. Pourquoi ? Parce que celui-ci représente le système mécanique le plus simple qui existe. Vous allez apprendre à le décrire en termes d'amplitude, de fréquence et de phase.

I.4.4. Vibration sinusoïdale :

La sinusoïde : C'est la forme d'onde la plus simple à caractériser. Cette forme d'onde particulière, peut se visualiser comme le mouvement de la projection verticale de l'extrémité d'une aiguille d'une horloge, ou le mouvement de translation d'un système masse – ressort non amorti. La période T correspond à un tour complet de l'aiguille ou au temps que met la masse pour faire un aller retour. Une sinusoïde est une courbe alternative, de valeur moyenne nulle, représentée par une fonction mathématique simple.

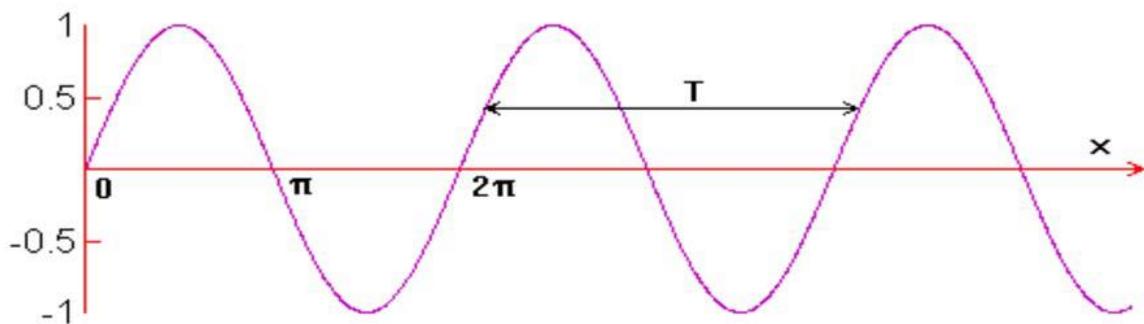


Figure (I-4): *Vibration sinusoïdale.*

I.5. Descriptions des vibrations :

Décrire les vibrations, c'est donner les valeurs d'un certain nombre de paramètres caractéristiques amplitude, fréquence,etc. L'important domaine de valeurs que peuvent prendre les grandeurs vibratoires justifie l'utilisation d'échelles et de grandeurs logarithmiques. Ces grandeurs logarithmiques correspondent au logarithme du rapport des valeurs de deux grandeurs de même espèce.

I.5.1. Logarithme :

L'échelle logarithmique permet de compresser une gamme de valeurs souvent trop large pour que ces valeurs soient discernées entre elles ; ainsi elle peut être assimilée à une balance capable de peser avec la même échelle une mouche et un dinosaure ! Parmi les propriétés de la fonction logarithme, on peut noter que :

- Le logarithme d'une valeur positive peut être négatif; le logarithme de la somme n'est pas égal à la somme des logarithmes.
- La fonction logarithme transforme l'ECHELLE LINEAIRE en ECHELLE LOGARITHMIQUE, souvent plus pratique.
- L'opérateur « logarithme » transforme une multiplication en addition et permet de représenter sur un même graphe de très fortes valeurs et de très faibles. [2]

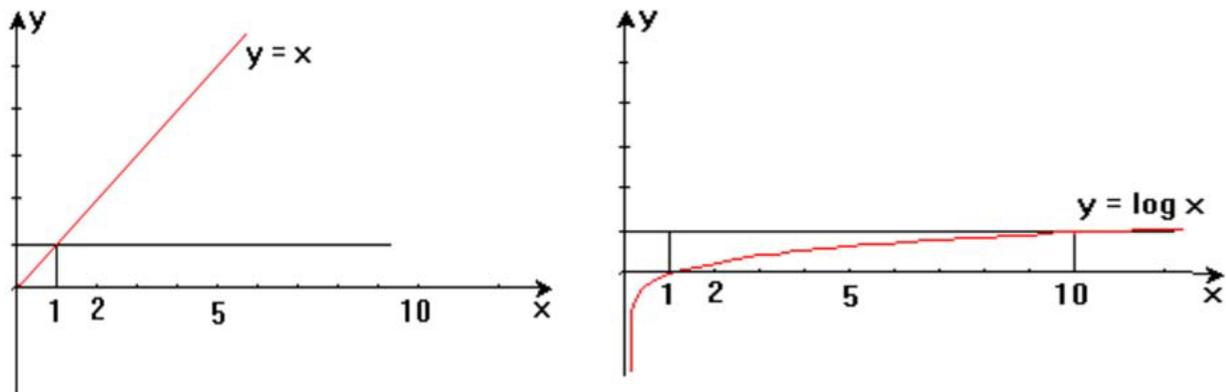


Figure (I-5): Logarithme des vibrations.

I.5.2. Niveau en décibel – dB :

De manière générale, le niveau L en décibels (noté dB, dixième du Bel,) d'une vibration V , est par définition dix fois le logarithme décimal du rapport de V à une valeur de référence V_{ref} : $L_v = 10 \log_{10} V / V_{ref}$. [2]

Cette définition s'applique à toutes les grandeurs physiques proportionnelles à la puissance. La notation L , le plus souvent utilisée pour désigner un niveau, provient de l'anglais " level", traduction du mot "niveau". En France, on utilise aussi quelquefois la notation N .

I.5.3. Niveau d'accélération :

Le niveau d'accélération en log se définit par :

$$L_a = 10 \log_{10} A / A_{ref} \text{ [2]}$$

Où A_{ref} est une accélération de référence qui vaut $1 \mu\text{m/s}^2 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$.

I.5.4. Niveau de vitesse :

Le niveau de vitesse en log se définit par :

$$L_v = 10 \log_{10} V / V_{ref} \text{ [2]}$$

Où V_{ref} est une vitesse de référence qui vaut $1 \text{ nm/s} = 10^{-9} \text{ m/s}$.

I.5.5. Niveau de déplacement :

Le niveau déplacement en log se définit par :

$$L_d = 10 \log_{10} D / D_{ref} \text{ [2]}$$

Où D_{ref} est un déplacement de référence qui vaut $1\text{pm} = 10^{-6}\mu$.

I.6.1. Amplitude et fréquence:

En vous reportant à la **figure (I-6)**: suivante, remarquez l'axe t (temps) qui représente la droite que la plume tracerait si la masse était immobile. L'axe d (déplacement) représente, quant à lui, la position de la masse en un temps donné.

I.6.2. Intensité et fréquence :

Selon le type et la nature de vibration, et selon le moyen de mesure, elle peut être mesurée en amplitude (distance linéaire ou angulaire), puissance ou valeur efficace par rapport à une référence (décibel), fréquence (Hertz), etc.

I.6.3. Définition de l'amplitude, de la période, de la fréquence :

Mainteneur, à partir d'une même courbe, définir l'amplitude d'un signal, puis sa période et enfin en déduire sa fréquence.

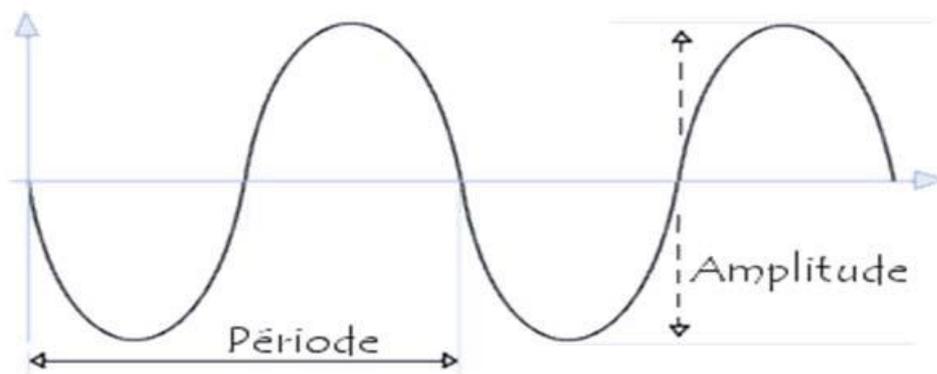


Figure (I-6): l'amplitude, de la période, de la fréquence.

I.6.4. Amplitude et période :

Un phénomène est dit périodique s'il se reproduit avec les mêmes caractéristiques. La fréquence est le nombre de fois où un phénomène va être observé durant une unité de temps fixée. La période est l'inverse de la fréquence. On note : $T = 1/f$. [2]

Si l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence sera mesurée en hertz (Hz).

I.7.Type des signaux :(Figure (I-7): représente les différents types des signaux)

I.7.1. Déterministe

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

d'une part des signaux pseudopériodiques formés d'une somme de sinusoides de périodes différentes et d'autre part des signaux transitoires dont l'existence est limitée dans le temps.

Ces signaux "certains" peuvent en principe être reproduits rigoureusement identiques à eux-mêmes. [3]

I.7.2. Aléatoire :

Le signal aléatoire fait intervenir deux notions :

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

Ce sont les signaux qui ont caractère non reproductible et imprévisible. [4]

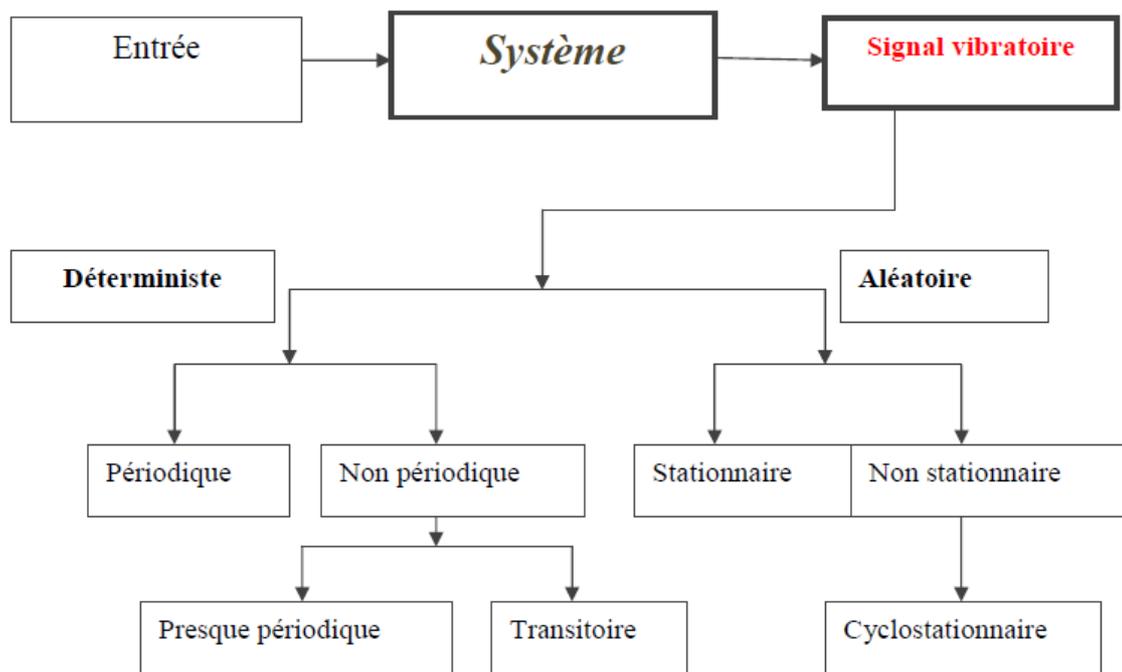


Figure (I-7): les différents types des signaux vibratoires.

I.8. Caractéristiques d'un signal vibratoire :

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

- une partie du signal provient des phénomènes cycliques (déterministes ou non) se produisant dans le système, comme la rotation des arbres, les chocs des engrènements, les mouvements existants au sein d'un roulement...

- une partie aléatoire, due aux phénomènes parasites générés lors du fonctionnement d'un système (jeu, frottement, ...)

Ces signaux ne sont globalement pas stationnaires. En effet, ils ne sont pas indépendants du temps même si la vitesse de fonctionnement reste constante. Cette non-stationnarité a plusieurs origines: [5]

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

I.9. Chaîne de mesure :

Le but de la mesure est de faire correspondre, à une grandeur physique que l'on désire connaître, une grandeur compréhensible par le système d'acquisition. De nos jours, il s'agit presque uniquement de signaux électriques qui ont remplacé les systèmes mécaniques et optiques d'autrefois. Ainsi le capteur délivre un signal qui est amplifié et converti généralement en tension par un conditionneur. Le système d'acquisition n'a plus alors à traiter qu'un courant électrique dont l'intensité est directement reliée à l'amplitude du phénomène vu par le capteur et cela quel que soit le type de ce capteur.

Prenons l'exemple d'une chaîne d'acquisition analogique **Figure (I-8)**: Le mot analogique veut dire que la loi liant l'information issue du capteur à la grandeur mesurée est continue. Le signal issu du capteur est transformé par un conditionneur de signaux qui comprend généralement les éléments suivants :

- le convertisseur de mesure, qui transforme généralement le signal en un courant électrique aisément transportable et qui est en entrée de la plupart des stations d'acquisition modernes.
- l'amplificateur, qui a pour but d'augmenter l'intensité du signal et de le rendre en cela moins sensible au bruit de fond ambiant.
- un ou plusieurs dispositifs de traitement du signal qui sont dédiés à la chaîne d'acquisition et varient en fonction des objectifs fixés par l'utilisateur. Ces dispositifs mettent en œuvre des fonctions très variées allant des filtres aux corrélations entre signaux en passant par la conversion en valeur efficace ou la linéarisation. Dans certains cas, il est possible de trouver, dans la chaîne d'acquisition, un multiplexeur : par exemple, si la station d'acquisition est éloignée du lieu de mesure ou si l'opérateur désire enregistrer un certain nombre de voies sur une bande magnétique. l'opération consiste à faire passer plusieurs signaux par une seule voie.

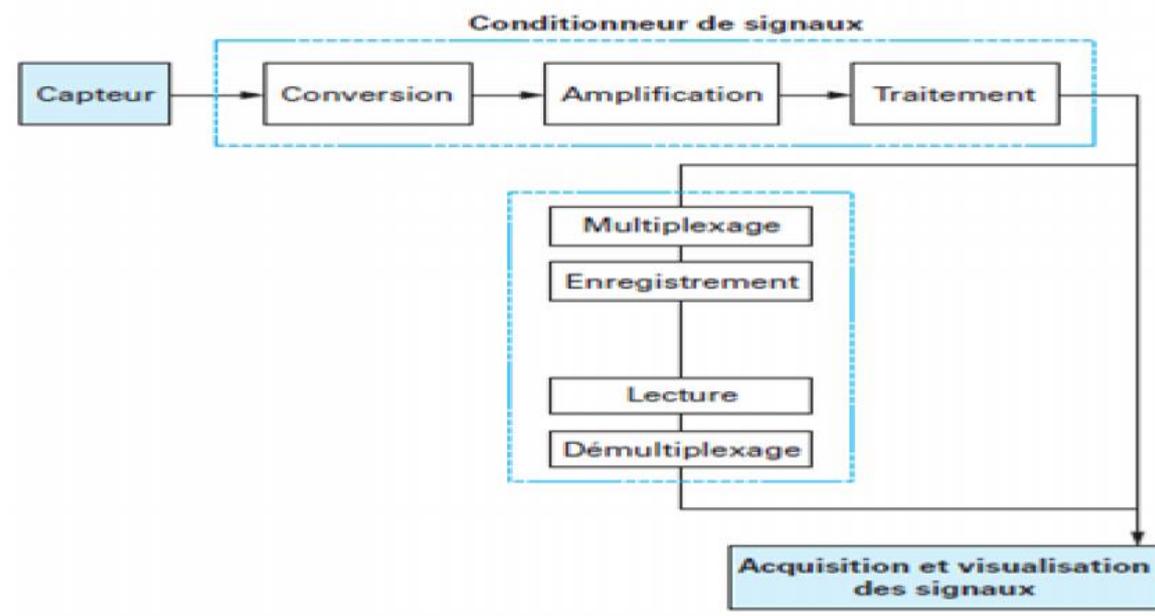


Figure (I-8): la chaîne de mesure analogique. [6]

La chaîne de mesure numérique, dont un exemple est donné **Figure (I-9)**: utilise au départ les mêmes dispositifs que la chaîne de mesure analogique. En sortie du conditionneur de signaux, le signal est échantillonné et numérisé par les éléments suivants :

- l'échantillonneur-bloqueur (E/B) a pour mission, au moment indiqué par le système logique de commande, de figer la valeur instantanée du signal au moins le temps que le convertisseur analogique-numérique effectue sa conversion.
- le convertisseur analogique-numérique (CAN) a pour rôle de coder la valeur instantanée du signal en entrée en un nombre. Son fonctionnement est géré par le système logique de commande qui peut être un microprocesseur. De la même manière que pour la chaîne analogique, dans le cas de plusieurs voies d'acquisition, un multiplexeur peut venir s'intercaler dans la chaîne numérique soit entre le conditionneur et l'échantillonneur-bloqueur, soit entre ce dernier et le convertisseur analogique-numérique. [6]

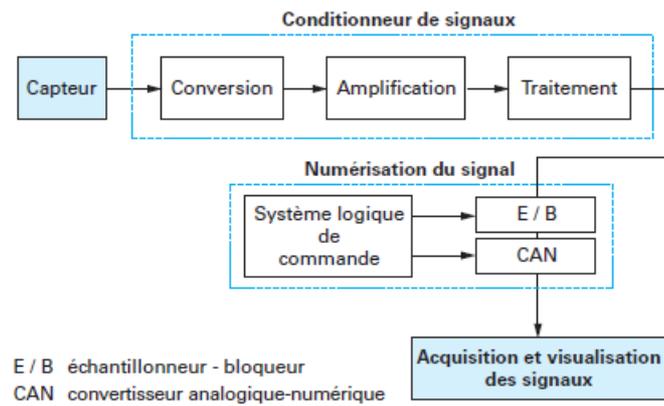


Figure (I-9): la chaîne de mesure numérique. [6]

I.9.1. Capteurs des vibrations :

Le capteur de vibrations est le premier maillon de la chaîne de mesure. Le plus largement utilisé est l'accéléromètre ou capteur piézoélectrique. Le principe de tous ces accéléromètres est de générer un signal électrique proportionnel au niveau de vibration. Ces accéléromètres sont très appréciés car ils possèdent une large bande de fréquence présentant une excellente linéarité, permettent l'intégration du signal pour obtenir la réponse en vitesse ou en déplacement et sont d'une excellente précision et fiabilité.

La façon d'utiliser l'accéléromètre joue un rôle primordial dans la prise de mesure. En effet, le mode de fixation et l'emplacement du capteur influent sur les résultats. La fixation sur la structure doit être réalisée à partir d'une liaison parfaite. Il existe plusieurs modes de fixation tels que le goujon vissé, l'embase collée, l'embase magnétique, la pointe touche. Ces différents modes jouent un rôle considérable sur la bande de fréquence et surtout sur la répétitivité des mesures. Le choix de l'emplacement du capteur se veut important étant donné la conception de celui-ci. En effet, la prise de mesure est fournie pour une direction donnée; c'est pourquoi l'accéléromètre doit être placé à un endroit où la mobilité est maximale.

Actuellement, le capteur est placé au plus près du défaut potentiel pour éviter les contributions extérieures.

Les signaux enregistrés par les capteurs sont souvent le résultat d'un mélange de nombreuses sources vibratoires qui peuvent perturber l'interprétation des niveaux d'analyse introduit dans la section précédente. Et ceci est d'autant plus vrai si le capteur n'est pas placé au plus près du défaut potentiel dû à un manque d'accessibilité. La surveillance d'un composant particulier peut être perturbée par la présence d'autres sources vibratoires. De même, le diagnostic peut s'avérer difficile si des composants identiques sont intégrés à l'équipement étudié. [7]

I.9.2. Types des capteurs :

I.9.2.1. Accéléromètre piézo-électrique :

Le capteur et le conditionneur de signal qui lui est associée sont les deux maillons de base communs à toute chaîne de mesure et tout système de surveillance ou de diagnostic par analyse de vibrations. Sa dynamique de mesure et sa bande passante très étendue font de l'accéléromètre piézo-électrique le capteur le mieux adapté pour l'analyse des vibrations absolues de palier.

Le choix d'un accéléromètre et du conditionneur de signal sera guidé par la spécialité et l'environnement des équipements à surveiller (vitesse, température des paliers, distance entre capteur et unité de traitement...). Les éléments déterminants dans le choix d'un accéléromètre et de son conditionneur, outre la sensibilité et les facteurs d'influences, sont la fréquence de coupure inférieure de la fréquence de résonance. En l'absence de contraintes particulières d'utilisation (température de palier très élevée [$>120^{\circ}\text{C}$] ou vitesse de rotation très basse [$<120\text{tr/min}$]) l'accéléromètre à électronique incorporée (ICP) est de plus en plus utilisé au déterminent de l'association accéléromètre/amplificateur de charge.

I.9.2.2. Capteurs à courant de Foucault :

Le capteur de proximité le mieux adapté à la mesure et à l'analyse du déplacement relatif d'un arbre dans son palier est le capteur à courant de Foucault. Sa bande passante est très étendue mais sa dynamique est faible à cause du bruit élevé induit par les imperfections d'usinage de l'arbre et la non homogénéité magnétique des matériaux le constituant. Ces imperfections géométriques et magnétiques se traduisent dans le domaine spectral par la présence d'un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de rotation. Ce peigne de raies parasite le spectre de signal utile et peut induire de graves erreurs d'interprétation. La réduction de ce bruit nécessite un traitement spécifique de l'arbre au niveau des zones de visée des sondes. [8]

I.9.3. Le conditionnement du signal :

Le signal électrique doit être conditionné pour être traité par les appareils d'analyse. Ce conditionnement est donné par les différents points suivants :

- 1) L'amplification du signal de sortie du capteur pour le rendre exploitable, réalisée par le préamplificateur.
- 2) L'intégration du signal pour passer à la vitesse ou au déplacement réalisée par l'intégrateur.
- 3) La limitation de la plage de fréquences du signal, réalisée par les filtres passe-haut et passe-bas.

I .10.Les indicateurs scalaires :

Les indicateurs scalaires associent à un signal vibratoire, observé le plus souvent sous sa forme temporelle sur une durée déterminée en relation avec la cinématique de l'installation, un nombre ou scalaire. Divers indicateurs sont utilisés dans le suivie vibratoire des machines tournantes, on peut citer à cet effet ; la valeur efficace, la valeur crête ou une combinaison de ces deux grandeurs représentée par le (kurtosis , facteur et valeur de crête ,et valeur efficace(RMS))

I.10.1. Le kurtosis :

$$k = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^4 p(x) dx \quad (\text{I.1})$$

Le kurtosis de la distribution normal est égale à 3, il est supérieur à 3 si la distribution devienne plus centrée ce qui indique la présence d'un défaut et il est inférieur à 3 si la distribution est aplatis. [9]

I.10.2. La valeur crête : V_c

Représente la valeur maximale du signal. Pour un signal $X(n)$ la valeur crête est donné par :

$$\text{Valeur de crête} = \sup |X(n)| \quad (\text{I.2})$$

Est un indicateur qui caractérise l'amplitude maximale des chocs. Il se manifeste dès l'apparition de la première écaillage et donne une information très précoce de la prédiction. Malheureusement, c'est un mauvais indicateur une fois que la dégradation s'accroît. Il faut remarquer aussi, que ces deux indicateurs (V_{RMS} , V_c) dépendent de la vitesse de rotation, des charges de la machine et des dimensions des roulements. Ceci est un inconvénient pour la surveillance des roulements (seuil de la surveillance).

I .10.3. La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square) :

c'est une valeur très caractéristique du signal, vu qu'elle a une relation directe avec l'énergie contenue dans celui-ci :

$$RMS = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}}{1} \quad (\text{I.3})$$

Ce paramètre est le plus couramment utilisé en analyse vibratoire, mais il est beaucoup imprécis dans le cas des roulements, car il ne varie de façon significatif que lorsque le défaut devient très sévères mais il est encore utilisable et très efficace mais pas tout seul. Donc il convient de lui associer un autre indicateur par exemple le skew pour en savoir plus de l'état d'un roulement avec une certaine certitude.

I.10.4. Facteur de crête : c'est le rapport entre la valeur de crête et la valeur efficace (RMS).

$$F_{crête} = \frac{V_{crête}}{RMS} \quad (I.4)$$

Il faut rappeler qu'une vibration de type sinusoïdale aura un facteur de crête voisin de 2, alors qu'une vibration de type impulsional aura un facteur de crête plus important. Lorsqu'il n'y a pas de défaut le F_c reste proche de trois (3) et il faut rappeler que l'apparition d'un défaut entraîne l'augmentation du facteur de crête.

I.11 .Conclusion :

Les vibrations sont le résultat de forces dynamiques à l'intérieur des machines qui comprennent des éléments roulants et à l'intérieur des structures qui sont connectées à la machine. Les différents éléments vibreront à des fréquences et des amplitudes différentes. Les vibrations créent de la fatigue et de l'usure et elles sont souvent à l'origine de la rupture de la machine.

Le défaut de roulement est aussi exigé la complémentarité de plusieurs indicateurs :
(kurtosis ,facteur et valeur de crête ,et valeur efficace(RMS))

Chapitre II:

Diagnostic et maintenance industrielle

II.1. Introduction

Le diagnostic est une composante principale du module de supervision. Il consiste à déterminer chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve. Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'information prévenants d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

Le monde industriel et le monde des transports disposent de machine et d'installation de plus en plus performantes et complexes. Les exigences de haute sécurité, la réduction des couts d'exploitation et la maitrise de la disponibilité des équipements donnent à la maintenance des systèmes, un rôle prépondérant. Elle doit permettre de n'intervenir qu'en présence d'éléments défectueux, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements.

Dans ce chapitre, nous introduisons l'approche de diagnostic et maintenance industriel, nous donnons les différents types de maintenance et présentons les causes de défaillances. Un rappel sur les défauts des machines tournantes est également donné.

II.2. Définitions relatives au diagnostic

II.2.1. Diagnostic

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

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

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

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

La mission pour laquelle le système a été conçu, peut être totalement remplie, partiellement remplie ou non remplie, cela dépend du mode de fonctionnement, un système est dit diagnosticable s'il est susceptible d'être soumis à un diagnostic, il doit alors être muni

d'organes d'observation (capteurs) et d'un système d'analyse pour étudier les informations fournies. La diagnosticabilité sera l'aptitude d'un système à être diagnostiqué. [10]

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

- ❖ **la localisation** : permet de déterminer les ou les éléments défaillants.
- ❖ **l'identification** : estime les caractéristiques statiques et dynamiques de défaut : l'instant d'apparition de la panne, sa durée et son importance .[11]

II.2.2. La détection

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

Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à Considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale. [12]

II.2.3.Défaut

Un défaut est une anomalie de fonctionnement d'un système physique. On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique. Cet écart est idéalement nul en absence de défauts. Les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs ou au niveau du système lui-même.

II.2.4.Défaillance

Evénement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement ses fonctions. Il est clair qu'une défaillance implique l'apparition d'un défaut puisqu'il existe un écart entre la caractéristique mesurée et la caractéristique théorique , Par contre, un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance puisque le dispositif peut très bien continuer à assurer sa mission principale. [10]

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

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

II.2.5. Dégradation

Une dégradation représente une perte de performance d'une des fonctions assurées par un équipement, Si les performances sont au-dessous du seuil défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, Il n'y a plus dégradation mais défaillance.[12]

II.2.6. Panne

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

- ❖ Les pannes permanentes : une fois la panne est produite, elle nécessite une action de réparation.
- ❖ Les pannes intermittentes : le système peut retrouver son fonctionnement normal après l'occurrence de la panne. Une panne intermittente est généralement le résultat d'une dégradation partielle et progressive d'un composant du système, pouvant aboutir à une panne permanente .[11]

II.3. Les différentes étapes de diagnostic

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

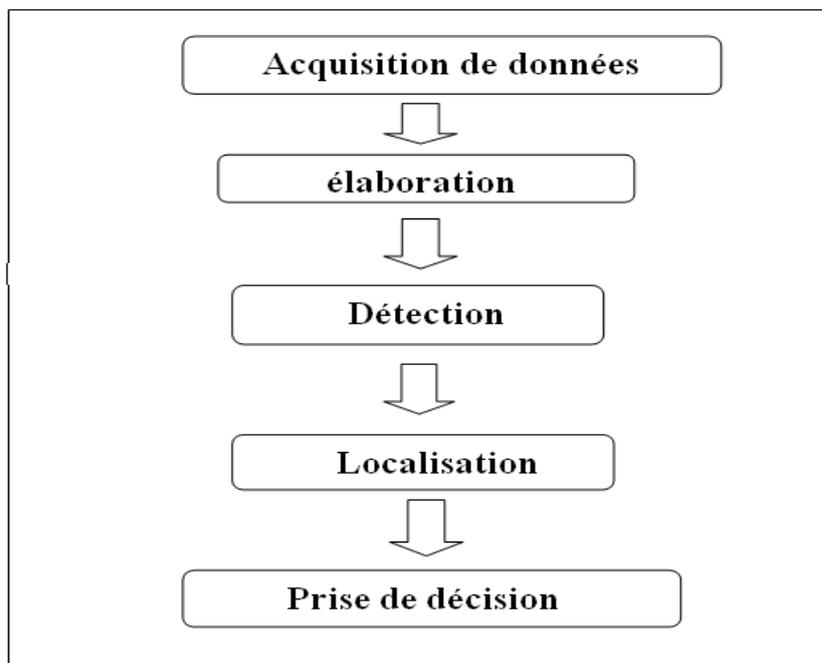


Figure (II-1) : les différentes étapes de processus de diagnostic.

II.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 permettant de mesurer les différentes variables du processus.

II.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 permettant de mettre en évidence les éventuels défauts pouvant apparaître au sein du système. Dans le domaine du diagnostic, les indicateurs de défauts sont couramment dénommés les résidus ou symptômes.

II.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 la non nullité des résidus pour décider de l'apparition d'un défaut car, dans la pratique, les grandeurs mesurées sont toujours entachées de bruits et le système à surveiller est toujours soumis à des perturbations. Par conséquent, cette étape fait le plus souvent appel aux tests statistiques ou, de manière plus simple, est réalisée à l'aide d'un seuillage.

II.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 défectueux. La procédure de localisation nécessite l'utilisation d'un ensemble (ou vecteur) de résidus, qui doivent avoir des propriétés permettant de caractériser de manière unique chaque défaut. Pour ce faire, deux méthodes peuvent être utilisées :

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

II.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 contrôle 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 .[13]

II.4. Techniques et méthodes de diagnostic

II.4.1. Classification des méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic se distinguent selon différents critères :

- la dynamique du procédé (discret, continu ou hybride).
- la complexité du procédé, l'implémentation du diagnostic en ligne et/ou hors ligne.
- la nature de l'information (qualitative et/ou quantitative).
- la profondeur de l'information (structurelle, fonctionnelle et/ou temporelle), sa distribution (centralisée, décentralisée ou distribuée) .[14]

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

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

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

II.4.1.1. Méthodes de diagnostic avec modèles

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

Méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle, Les méthodes de diagnostic par modélisation physique. [15]

II.4.1.2. Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle

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

II.4.1.3. Les méthodes de diagnostic par modélisation physique

Les méthodes de surveillance avec modèle physique ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par le modèle [16]. Tout écart est alors synonyme d'une défaillance, les outils de-là théorie de la décision sont ensuite utilisés pour déterminer si cet écart est dû à des aléas normaux, comme par exemple le bruit de mesure ou s'il traduit une défaillance du système.

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

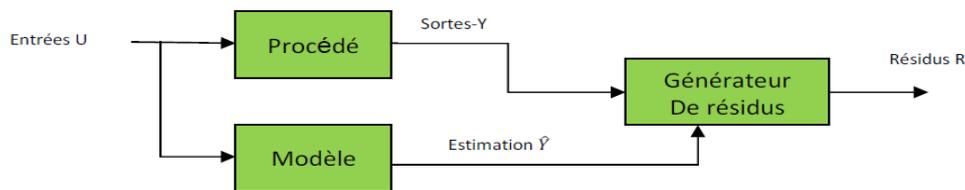


Figure (II-2) : Principe de surveillance avec modèle.

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

Il existe plusieurs approches de génération de résidus, cependant trois sont vraiment essentielles [17], il s'agit de :

a) Estimation des paramètres :

Les résidus sont la différence entre les paramètres nominaux du modèle et les paramètres estimés du modèle.[18]

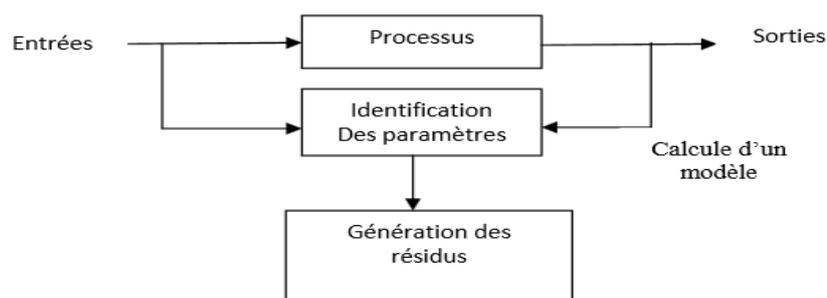


Figure (II-3) : Principe de la surveillance par estimation para métrique.

b) Observateurs :

Les méthodes à base d'observateurs reconstruisent une estimation de la sortie à partir de toutes ou parties des sorties réelles du système. Les résidus sont alors classiquement la différence entre les sorties mesurées et les sorties estimées .[16]

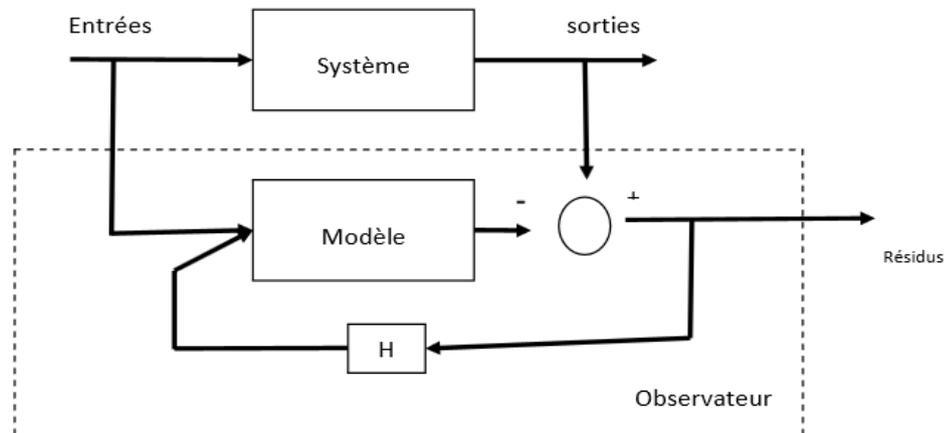


Figure (II-4) : Principe de la surveillance par observateurs.

c) Equations de parité :

Cette méthode consiste à vérifier l'exactitude des équations mathématiques du modèle en se basant sur les sorties du procédé .[19]

II.4.2.Méthodes de diagnostic sans modèles

Nombreuses sont les applications industrielles dont le modèle est difficile, voire impossible à obtenir suite à une complexité accrue ou à de nombreuses reconfigurations intervenantes durant le processus de production. Pour ce type d'applications industrielles, les seules méthodes de diagnostic opérationnelles sont celles sans modèle. Deux techniques existent dans ce cas : technique par les outils de traitement de signal (approche signal) et celle par reconnaissance de formes [20], et la méthode des systèmes experts. Pour des raisons de simplicité le diagnostic par approche signal est la technique la plus utilisée actuellement en diagnostic industriel [21], c'est pour cela on essaiera de le détailler un peu dans ce qui suit.

II.4.2.1.La reconnaissance des formes

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

- Une phase d'analyse qui consiste à déterminer et à réduire l'espace de représentation des données et à définir l'espace de décision permettant de spécifier l'ensemble des classes possibles.
- Une phase de choix d'une méthode de décision permettant de définir une règle de décision qui a pour fonction de classer les nouvelles observations dans les différentes classes de l'ensemble d'apprentissage.
- Une phase d'exploitation qui détermine, en appliquant la règle de décision, le mode de fonctionnement du système en fonction de chaque nouvelle observation recueillie sur le processus.

Ils existent trois techniques de reconnaissance des formes. La première technique est une technique classique de discrimination basée sur les outils de la probabilité. Cette technique peut se montrer insuffisante car elle suppose une connaissance à priori de tous les états de fonctionnement et ne prend pas en compte révolution du système ,[20]. Les deux autres techniques reposent sur la théorie de l'intelligence artificielle. Ces techniques ont l'avantage de ne pas se baser sur les connaissances à priori des états de fonctionnement mais plutôt sur une phase d'apprentissage. Ces deux techniques sont la reconnaissance des formes par la logique floue et la reconnaissance des formes par réseaux de neurones.

II.5. Quelques techniques de diagnostic par approche signal

II.5.1. Analyse temporelle

L'analyse temporelle peut se faire soit à l'échelle du signal, c'est à dire en utilisant des indicateurs obtenus à partir d'une fenêtre glissante sur le signal, cela permet la détection et la localisation du défaut, soit à l'échelle d'un ensemble de signaux, les indicateurs ont une valeur scalaire calculée directement sur la totalité d'un signal. Cette analyse s'applique à des machines simples et consiste à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevée. Cet outil est aisé à employer lorsque le signal est simple (vibration de type sinusoïdal du balourd d'un rotor par exemple), mais devient inexploitable dans le cas de sollicitations multiples et de faible influence sur les défauts .[22]

II.5.2. Analyse fréquentiel

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

L'outil mathématique utilisé dans ce cas est la décomposition du signal à l'aide de la transformée de Fourier. Si cette décomposition est possible, sa représentation dans le domaine temporel est encore inutilisable. Il consiste à représenter dans un diagramme appelé spectre la fréquence et l'amplitude. Avec ce type de représentation, chaque composante sinusoïdale est définie par son amplitude et sa fréquence. La représentation spectrale devient plus nette et réalisable. Le spectre final contient toutes les fréquences sinusoïdales (lignes discrètes) formant le signal de vibration d'origine. A noter que le spectre d'un choc périodique comporte un peigne de lignes à la fréquence de choc.

II.6. Maintenance :

Le terme de maintenance désigne l'ensemble des techniques d'entretien et de la vérification qui sont en œuvre pour permettre une utilisation optimale des machines dans une installation industrielle

II.6.1. But de la maintenance :

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

II.6.1.1 Objectifs financiers :

- Réduire au minimum les dépenses de maintenance.
- Assurer le service de maintenance dans les limites d'un budget.

II.6.1.2 Objectifs opérationnels :

- Maintenir l'équipement dans les meilleures conditions possibles.
- Assurer la disponibilité maximale de l'équipement à un prix minimum.
- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Entretien des installations avec le minimum d'économie et les remplacer à des périodes prédéterminées.
- Assurer un fonctionnement sûr et efficace à tout moment.

II.6.2. Types de la maintenance :

Nous distinguons plusieurs types de maintenance (**figure II.5**) :

II.6.2.1. Maintenance préventive :

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

II.6.2.1.1. Maintenance systématique :

Qui consiste à changer suivant un échéancier établi à l'avance des organes jugés proches de l'usure. Elle est définie par les lois de la conception par le constructeur et remplie par l'expérience des agents de la maintenance. C'est la plus simple et la plus utilisée jusqu'à

présent. Elle consiste donc en des arrêts réguliers de la machine, avec démontage, contrôle des jeux et remplacements systématiques d'organes. La date de l'arrêt est planifié par expérience.

Elle se base sur des données statistiques du dossier historique de l'unité d'intervention ou en fonction d'impératif de sécurité. L'inconvénient d'une telle maintenance est le risque démontage inutile de la machine occasionnant ainsi un manque à gagner certain. De plus, il est toujours délicat de redémarrer un équipement froide dans la quel des réglages parfois longs et complexes. Il se peut aussi qu'on ait des défaillances entre deux interventions systématiques provoquant ainsi des dégâts importants avec arrêt de la production.

II.6.2.1.2. Maintenance conditionnelle :

Qui demande au préalable d'effectuer un diagnostic avant de remplacer l'organe en question. Elle s'appliquée particulièrement aux machines tournantes. Elle est basée sur l'analyse :

- Externe des machines (corrosion, ancrages, etc.....)
- Des paramètres de procès (température, pression débit)
- Des huiles de lubrification et étanchéité.
- Des températures d'organes des machines
- Des vibrations et des bruits au niveau des organes.

La maintenance conditionnelle permet donc d'éviter les inconvénients de la maintenance systématique. Par le fait qu'elle permet de déterminer quel organe défaillant devra être remplacé et la date à laquelle s'impose l'intervention en se basant uniquement sur les analyses en temps réel de la machine et non sur des données statistiques. Bien évidemment, pour faire de telles prédictions, il est nécessaire d'accéder à une bonne compréhension du rôle de la machine dans les procès et de son fonctionnement interne, car il n'est pas possible de prédire l'avenir d'un équipement sans connaître son état de santé au temps présent.

II.6.2.2. 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 rencontré en contrôle techniques ou cercles de qualité ou avec les constructeurs .[23]

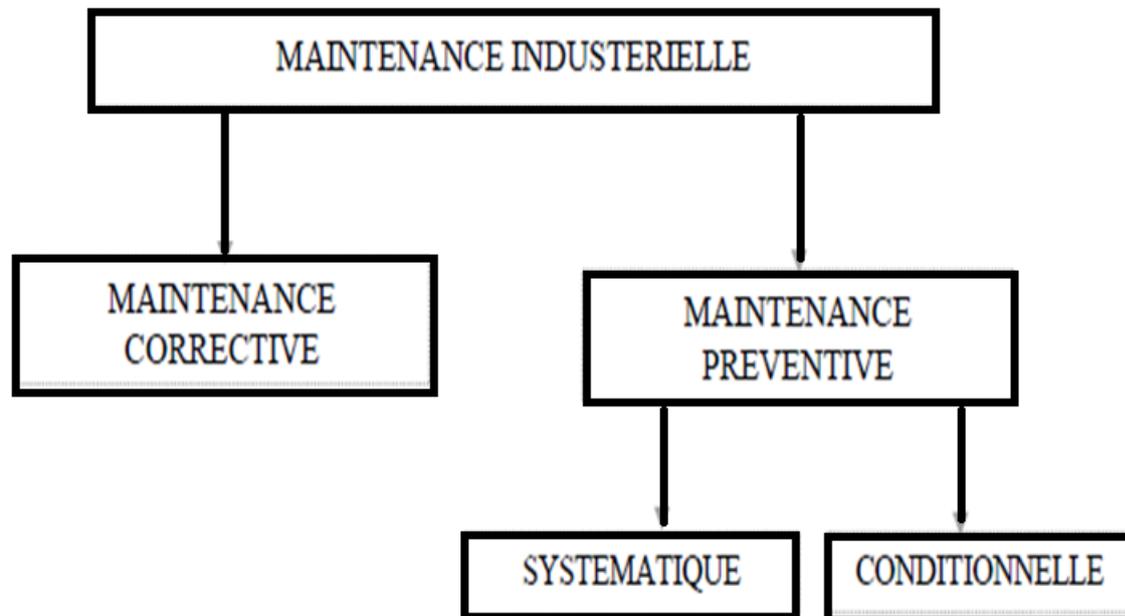


Figure (II-5) : types de maintenance.

II.6.3. Niveaux de maintenance :

La norme NF X 60-010 définit, à titre indicatif, quatre niveaux de maintenance

(Tableau II.1) :

	niveau 1	niveau 2	Niveau3	niveau 4
travaux	- réglages simples - pas de démontage ni ouverture	opérations mineures de maintenance préventive	identification et diagnostic de pannes	travaux importants de maintenance corrective ou préventive
lieu	sur place	sur place	sur place ou dans atelier de maintenance	atelier spécialisé avec outillage général
personnel	exploitant du bien	technicien habilité	technicien spécialisé	équipe avec encadrement technique spécialisé
exemple	remise à zéro d'un automate après arrêt d'urgence	changement d'un relais	identification de l'élément défaillant	intervention sur matériel dont la remise en service est soumise à qualification

Tableau (II-1) : les quatre niveaux de maintenance.

II.6.4. Organisation de la maintenance conditionnelle :

Dans la référence [24] on définit l'organisation de la maintenance conditionnelle par l'organigramme suivant (figure II.6) :

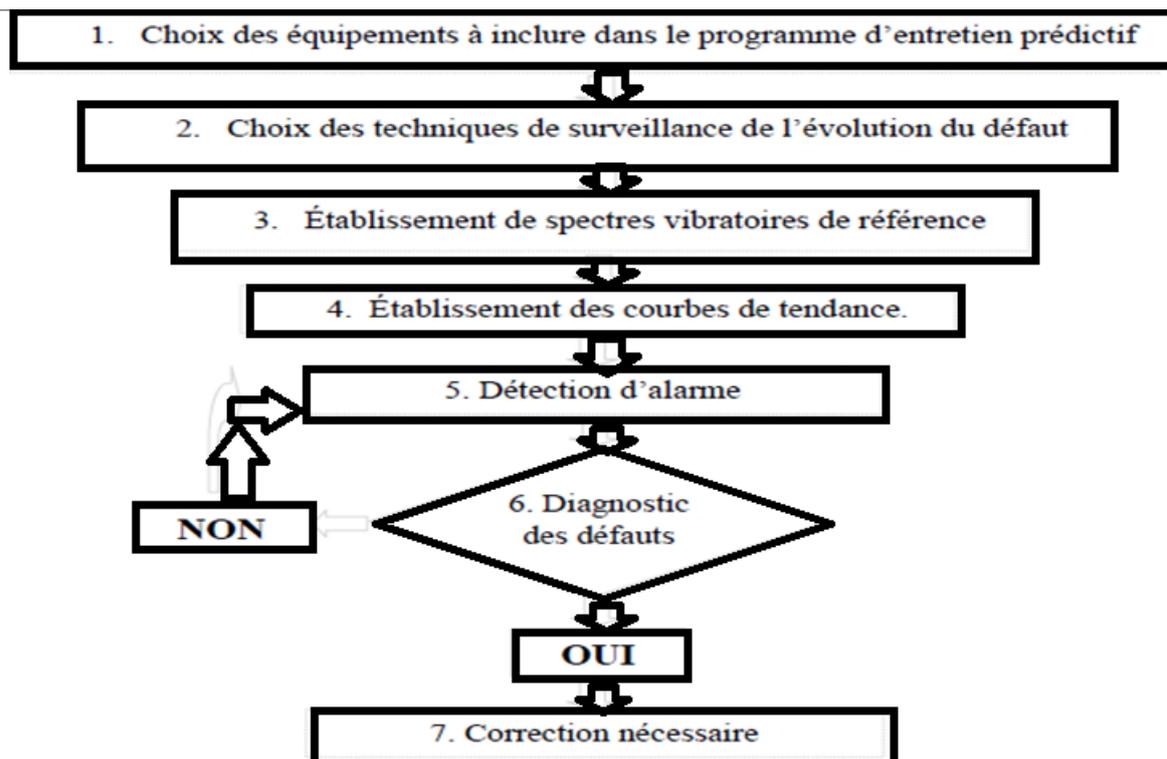


Figure (II-6) : Organisation de la maintenance conditionnelle.[24]

1. Cette étape comprend la codification des équipements, l'inventaire et la sélection du type d'entretien appliqué à chaque équipement
2. Cette étape comprend le choix de la technique de mesure, leur périodicité, leur endroit et repérage, la création d'une route et des dossiers de suivi
3. Cette étape s'occupe de la détermination des alarmes
4. Cette étape comprend la prise de mesure, l'enregistrement et la gestion des données vibratoires.
5. vérification du seuil d'alarme
6. déterminer l'élément défaillant
7. Changer ou corriger l'élément défaillant.

II.6. 5. Classement des machines :

Afin de ne pas surveiller inutilement des machines qui n'ont pas une importance capitale, les industriels établissent souvent le classement suivant :

II.6.5.1. Vitales : machines non doublées dont la panne entraîne l'arrêt de la production. Les frais et les délais de remise en état sont importants. Les pertes de production sont inacceptables.

II.6.5.2. Importante : machines doublées ou non dont la panne entraîne une baisse sensible de la production. Les frais et délais de remise en état sont importants, les pertes de production aussi.

II.6.5.3. Secondaire : machines doublées ou dont une panne ne remet pas en cause les capacités de production.

II.6.6. La cinématique :

On ne peut surveiller correctement une machine que l'on ne connaît pas. Avant de recueillir un signal vibratoire, il faut prendre connaissance de la cinématique de l'installation à surveiller. Parmi les indications les plus importants, le technicien doit connaître :

- la vitesse de rotation de chaque ligne d'arbre ;
- le nombre de pales ou d'aubages sur les ventilateurs et les pompes ;
- le nombre de dents des engrenages ;
- le diamètre des poulies et la longueur des courroies ;
- le type des roulements ;
- le nombre de barres de la cage d'écureuil du moteur, etc.

Tous ces renseignements sont indispensables pour déterminer les outils adéquats à une surveillance efficace. Ils permettent de calculer les fréquences caractéristiques des défauts susceptibles d'apparaître sur les machines .[25]

II.7. Défauts des machines tournantes :

II.7.1. Balourd :

Le balourd (**figure II.7**) est la cause de vibrations la plus commune et la plus fréquemment rencontrée. En dépit du soin apporté à la construction des rotors, il est donc impossible de les équilibrer parfaitement et il existe donc toujours une vibration à la fréquence de rotation dont l'amplitude est directement proportionnelle à l'importance du balourd et au carré de vitesse de rotation. Une modification brusque de l'amplitude correspond systématiquement à une modification du balourd dont l'origine peut-être une rupture ou la déformation d'une partie du rotor (ailettes de turbine par exemple). Si cette modification d'amplitude est plus lente, il peut s'agir d'une usure ou d'un encrassement de la partie tournante (suie, dépôt, etc.). Le phénomène se caractérise par une vibration radiale importante à la fréquence de rotation.

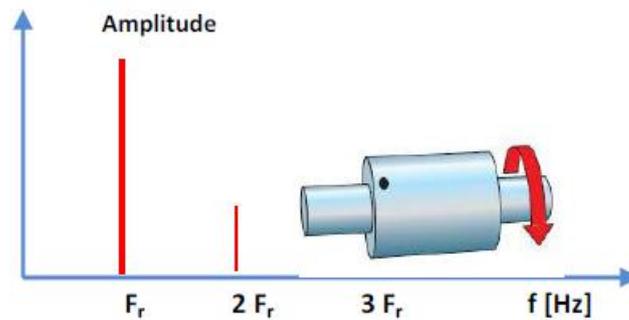


Figure (II-7) : Défaut de balourd. [26]

II.7.2. Désalignement :

Un désalignement (Figure II-8) provoque des vibrations à la fréquence de rotation ainsi qu'aux harmoniques d'ordre 2, 3 et parfois 4 (double, triple, quadruple de la fréquence de rotation et parfois même davantage en particulier pour les accouplements à denture où l'on rencontre les harmoniques liés au nombre de dents et à la fréquence de rotation). La composante axiale de la vibration est particulièrement importante pour l'harmonique d'ordre 2.

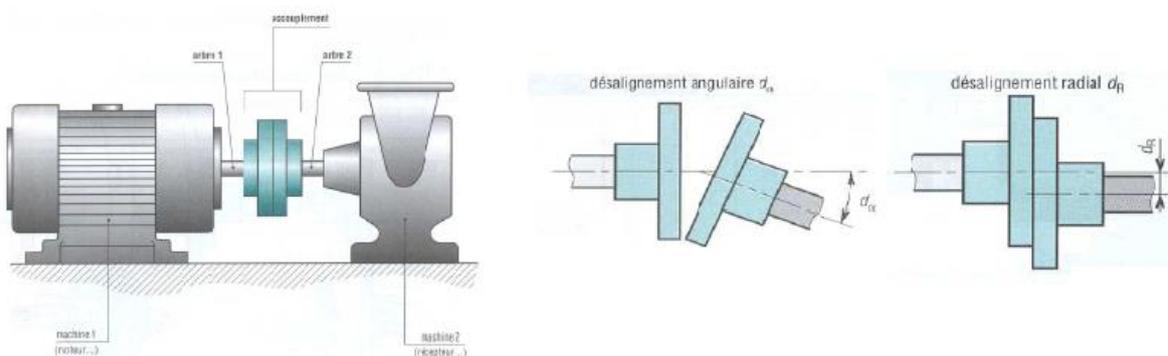


Figure (II-8) : Défauts désalignement. [26]

II.7.3. Mauvais serrage mécanique :

Lorsqu'un palier est desserré ou présente une possibilité de mouvement partiel dans le plan radial, il apparaît une vibration radiale à une fréquence égale à deux fois la vitesse de rotation. Cette vibration se produit sous l'effet du balourd initial et elle peut prendre une amplitude élevée en fonction du degré de desserrage du palier.

II.8. Les roulements :

Des roulements, il y en a partout... des pédales de vélos au ventilateur des PC en passant par les compresseurs ou les roues de véhicules, un très grand nombre de systèmes en rotation en sont équipés. Et dans l'industrie, ce sont des composants stratégiques des machines tournantes : situés entre les parties fixes et les parties mobiles de la structure, ils assurent la transmission des efforts et la rotation de l'arbre.

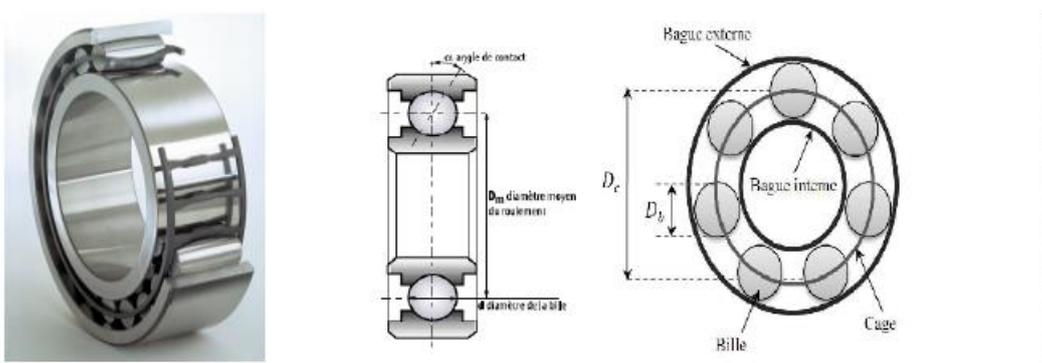
Mais, s'ils sont les plus courants, ces composants sont aussi les plus fragiles. Il faut dire que les différents éléments qui les constituent (les billes, la cage et les bagues) sont en permanence sollicités. Le passage répétitif des billes sur les pistes engendre de fortes contraintes mécaniques qui entraînent peu à peu une dégradation du métal par fatigue, et finissent par provoquer l'apparition de défauts ponctuels (des fissures, un écaillage des surfaces, etc.). Autre cause d'avarie, les défauts de montage et de conception. Ils provoquent en effet des surcharges qui entraînent, à terme, l'usure prématurée du roulement. Enfin, comme tout système de précision, le roulement est sensible à la pollution extérieure.

Un environnement poussiéreux, la présence de copeaux ou d'impuretés dans le corps du système, des lubrifiants pollués ou une atmosphère humide... sont autant d'agents extérieurs susceptibles de causer d'importants dégâts. Pour éviter des arrêts de production imprévus et coûteux, il faut alors surveiller en permanence l'état des roulements, et "traquer" tous les signes précurseurs des défauts : un bruit inhabituel, des vibrations anormales, une élévation de température, etc. [27]

II.8.1. Eléments de roulements :

Le roulement est composé des éléments **Figure (II-9)** suivants :

- ❖ deux bagues concentriques en acier, appelés bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles "roulent" les corps roulants),
- ❖ des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal,
- ❖ une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine).



(Figure II-9): Eléments de roulement.

II.8.2. défauts des roulements :

a. Causes 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, [28]

b. Principales défauts :

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

On qualifie les principaux défauts :

- ❖ Le grippage, dû à l'absence de lubrification, à une vitesse excessive ou un mauvais choix du type de roulement. Ceci se manifeste par un transfert de matière arrachée sur les surfaces et redéposée par microsoudure.
- ❖ Les empreintes par déformation, dues à des traces de coups, des fissures ou des cassures.
- ❖ L'incrustation de particules étrangères, due à un manque de propreté au montage ou de l'entrée accidentelle d'impuretés.
- ❖ La corrosion, due à un mauvais choix du lubrifiant, surtout quand les roulements viennent d'être nettoyés et sont contaminés par la transpiration des mains.
- ❖ La corrosion de contact, due au mauvais choix d'ajustements entre les bagues et les logements ou les arbres.
- ❖ Les criques, fissures étroites ou autres amorces de cassures dues aux contraintes exagérées au montage ou au démontage.
- ❖ L'usure par abrasion, due à une mauvaise lubrification. L'usure par abrasion donne aux roulements un aspect gris, givré.
- ❖ Le cas le plus rencontré est un défaut d'écaillage dû à la fatigue des roulements. L'écaillage de fatigue, est un phénomène normal qui conduit à une défaillance et ce, quel que soit les conditions d'utilisation et de fonctionnement. Ce défaut survient sous l'effet de la fatigue due aux contraintes de cisaillement alternées qui sévissent en 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. [7]

II.9. Caractéristiques du signal engendré par le roulement endommagé :

II.9.1. Défaut de la bague interne :

Il est caractérisé par la présence d'une raie à la fréquence caractéristique du défaut (f_{dbi}). Cette fréquence est modulée par la fréquence de rotation (bandes latérales autour de la raie de défaut.

$$f_{dbi} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} \left(1 + \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \dots\dots\dots (II.1)$$

Avec:

f_r : fréquence de rotation

α : angle de contact

L'image théorique de ce défaut (charge radial et charge axial) est donnée dans les figures suivantes:

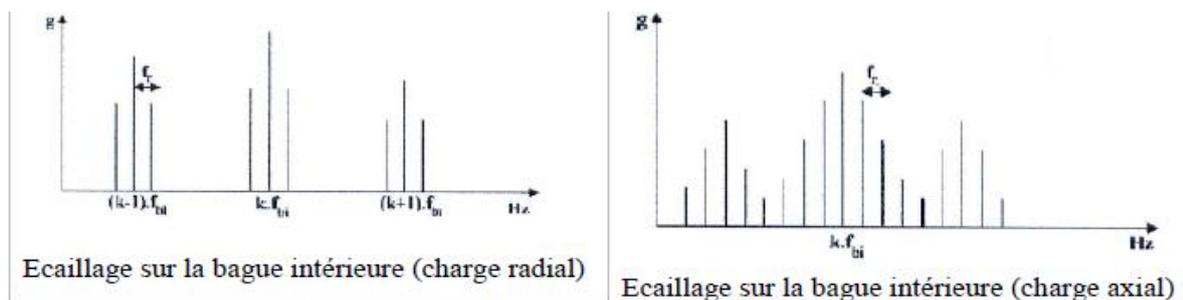


Figure (II-10) : Écaillage sur la bague intérieure. [9]

II.9.2. Défaut sur la bague externe :

Ce défaut est caractérisé par la présence d'une raie à la fréquence (f_{dbe}). 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.

$$f_{dbe} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} \left(1 - \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \dots\dots\dots (II.2)$$

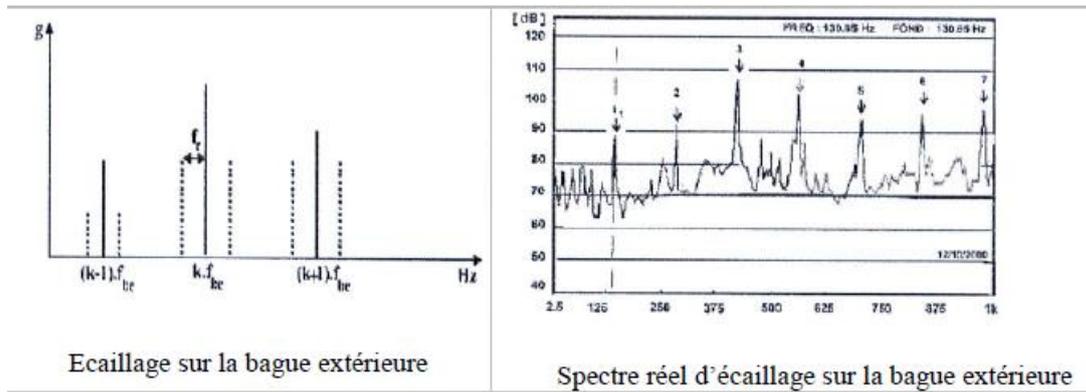


Figure (II-11): Ecaillage sur la bague extérieure. [9]

II.9.3. Défaut de l'élément roulant :

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 interne et une fois la bague externe par tour, il génère donc des chocs à 2 fois cette fréquence.

$$f_{bille} = \frac{f_r \cdot D_m}{2 \cdot D_b} \left(1 - \left(\frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right)^2 \right) \dots\dots\dots (II.3)$$

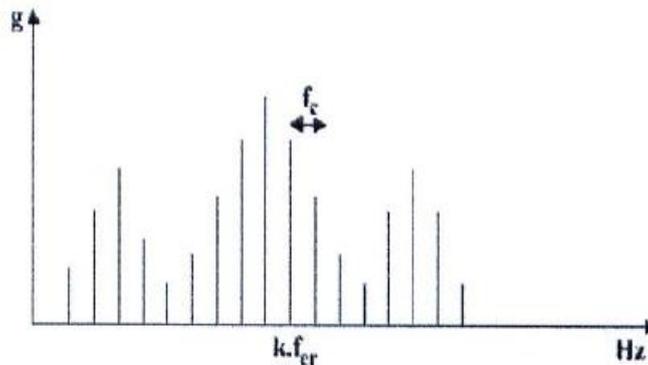


Figure (II-12): Ecaillage sur l'élément roulant.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre on a été consacré à une présentation de quelques définitions relatives au diagnostic et maintenance dans le domaine industriel,

Le choix des méthodes d'analyse des signaux accélérométriques issus de machines tournantes est normalement conditionné par la nature de la machine, mais aussi par la nature du défaut à déceler dans le signal.

Chapitre III:
Détection et
caractérisation des
défauts de
roulement par
l'analyse spectrale

III.1. Introduction

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

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

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

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

III.2. Définitions

III.2.1. La chaîne d'acquisition d'un signal

La chaîne d'acquisition **figure (III-1)** est l'élément essentiel de toutes techniques. Elle permet de transformer un phénomène physique en un signal exploitable via le capteur. Son intérêt est d'améliorer le signal émis en un signal retravaillé pour faire ressortir ses caractéristiques.

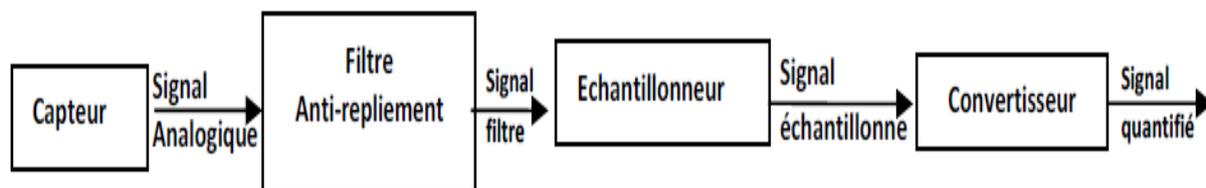


Figure (III-1) : schéma bloc de la chaîne d'acquisition et de traitement de signal.

III.2.2. Echantillonnage

L'échantillonnage consiste à prélever à des instants précis, le plus souvent équidistants, les

valeurs instantanées d'un signal. Le signal analogique $s_e(t)$, continu dans le temps, est alors représenté par un ensemble de valeur discrète :

$$s_e(t) = S(n.T_e) \dots \dots \dots (III.1)$$

Avec :

n Entier.

T_e période d'échantillonnage.

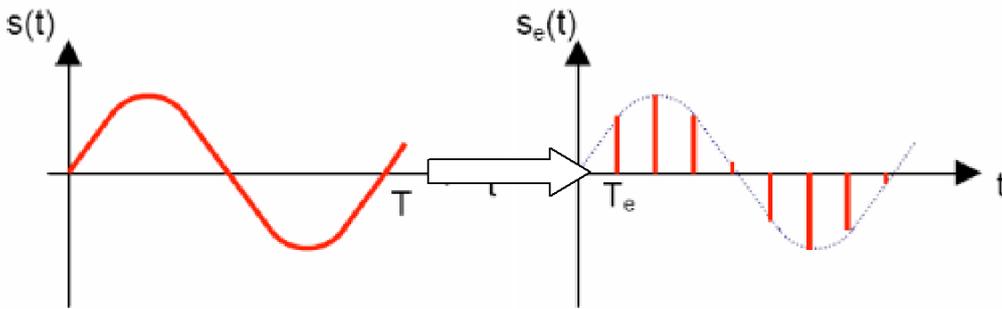


Figure (III-2) : L'échantillonnage d'un signal $s(t)$.

On appelle période d'échantillonnage T_e (en s) le temps entre deux mesures successives. la fréquence

d'échantillonnage F_e , correspond au nombre de mesures effectuées par seconde. On a :

$$F_e = 1/T_e \dots \dots \dots (III.2)$$

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

III.2.3. Théorème de Shannon :

Pour un signal périodique la fréquence d'échantillonnage F_e doit être au moins le double de la fréquence maximale F_{max} du signal .[29]

$$F_e > 2 * F_{max} \dots \dots \dots (III.3)$$

En pratique, la valeur couramment choisie pour la fréquence d'échantillonnage est :

$$F_e = 2.56 * F_{max}$$

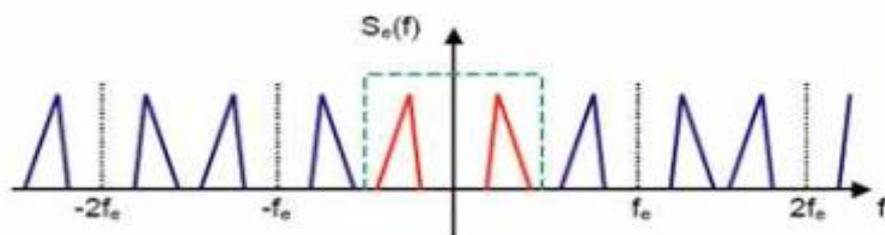


Figure (III-3) : exemple d'un échantillonnage parfait.

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

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

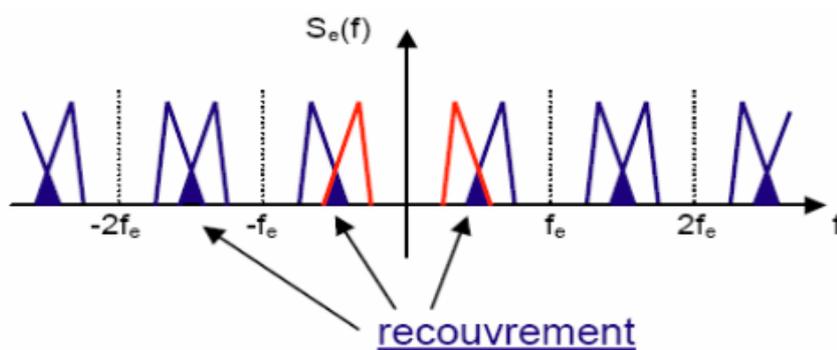


Figure (III-4) : exemple d'un mauvais échantillonnage (recouvrement).

III.3. L'analyse spectrale

L'analyse « en fréquence » est devenue l'outil fondamental pour le traitement des signaux vibratoires. Elle s'appuie sur la transformée de Fourier, qui permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître le contenu spectral d'énergie ou de puissance, présent dans le signal à la fréquence F , et donc de détecter la présence d'un défaut générant un choc périodique à une fréquence de défaut. La comparaison de cette fréquence avec celles des défauts théoriques potentiels (fréquences caractéristiques des défauts) sur le roulement permet sa localisation. Dans la pratique, on utilise la transformée de Fourier discrète rapide (FFT) .[30]

III.3.1. La Transformée de Fourier Discrète et Rapide

La transformée de Fourier est parmi les méthodes les plus robustes pour le traitement des signaux en régime stationnaire. Ses dérivées discrète (TFD) et rapide (TFR) comptent parmi les outils fondamentaux pour le calcul des caractéristiques spectrales des signaux et utilisent des programmes efficaces moyennant les systèmes numériques .[15]

L'analyse dans ce domaine est basée sur la transformation du signal de domaine temporel au domaine fréquentiel, l'avantage de l'analyse dans ce domaine par rapport au domaine temporel, est son aptitude d'identification et d'isolation facile de certains composants fréquentiels d'intérêt.

Ainsi cette analyse de spectre permet de mettre en évidence les différentes périodicités dans le signal original, alors la transformée de Fourier permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel, suivant la relation :

$$X(f)=\int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \dots\dots\dots (III.4)$$

Où :

X(f) est la transformée de Fourier.

t est la variable temps.

f est la variable fréquence.

Exemple :

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

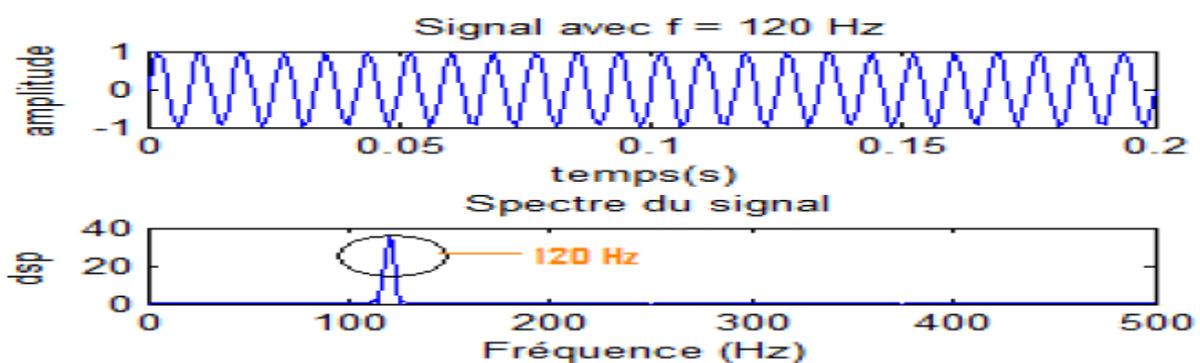


Figure (III- 5) : signal temporel et sa représentation fréquentiel.

III.3.2. Transformation de Fourier à fenêtre glissante

Pour donner un pouvoir de localisation aux fonctions analysantes de la transformée de Fourier, qui oscillent avec la même amplitude sur tout l'axe des réels, on pondère ces

fonctions par une fonction fenêtre de manière à sélectionner uniquement la partie utile du signal. La fenêtre est bien sûr translatée de manière observer toutes les parties utiles du signal. Concrètement, la transformée de Fourier à fenêtre glissante s'exprime par:

$$X(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} w * (t - \tau) dt \dots \dots \dots (III.5)$$

Où (w) est la fonction fenêtre qui est à choisir et " τ " est le paramètre de translation de la fenêtre. On notera que la transformée dépend maintenant de deux variables: une variable de fréquence et une variable de localisation temporelle du contenu fréquentiel. Cette transformée nous permet donc bien d'atteindre le but recherché qui était d'avoir des informations sur le signal en temps et en fréquence à partir de la transformation réalisée.

III.3.3 Filtres anti-repliement

Un filtre anticrénelage, filtre anti aliasing(en anglais), parfois appelé filtre anti repliement, est un filtre passe-bas analogique que l'on retrouve dans les dispositifs de numérisation, qui permet de nettoyer le signal avant de l'étudier. Ce type de filtre ne laisse passer que les composantes dont les fréquences sont en dessous d'une valeur donnée, il est utilisé pour éviter le repliement du spectre Ce dispositif chargé d'éliminer, autant que faire se peut, les parties d'un signal qui ne contiennent aucune information pertinente, parce que leur fréquence est supérieure à la fréquence maximale qu'on envisage de transmettre, s'appelle un filtre anti-repliement.

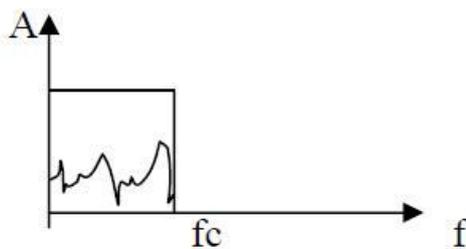


Figure (III-6) : filtre passe-bas.

III.3.4. Principe de détection d'un défaut de roulement par l'analyse spectrale

La détection des défauts des roulements par la méthode de l'analyse de spectre repose principalement sur l'étude des fréquences et leurs amplitudes 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 extérieure).

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

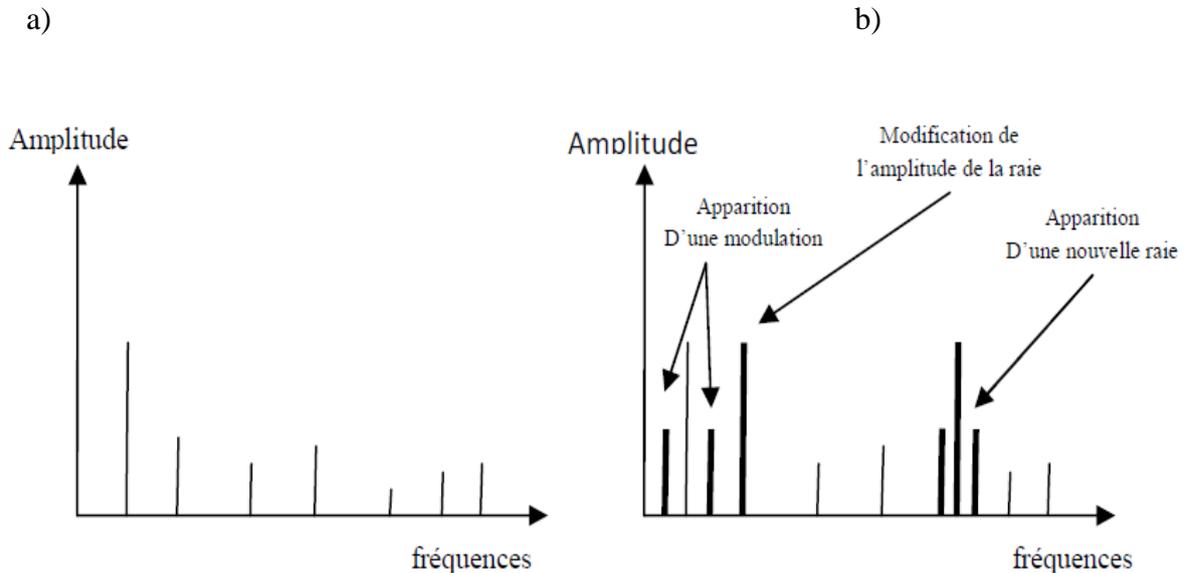


Figure (III-7) : a) *spectre en mode sain*, b) *spectre en mode défaillant*.

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

III.4. L'application de la méthode de l'analyse spectrale pour la détection des défauts des roulements

III.4.1. Description de l'expérience

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

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

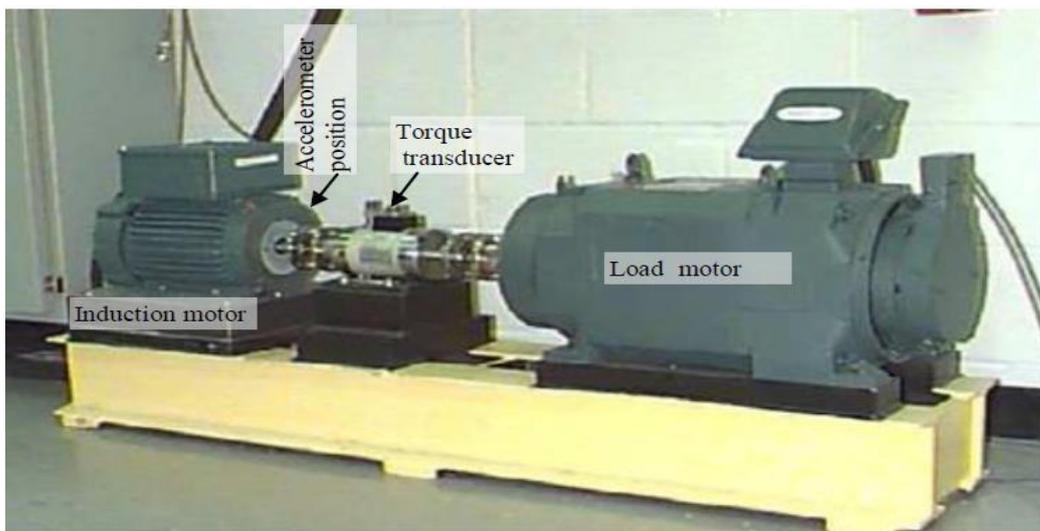


Figure (III-8) : *Le banc d'essai Américain (Data bearing center).*

Le banc d'essai américain **Figure (III-8)** se compose d'un moteur (à gauche), un capteur de couple / le codeur (au centre), un dynamomètre (à droite), et un circuit électronique de commande (non représentée). Les roulements ont été utilisés pour des défauts de diamètres 0.1778 , 0.3556 , 0.5334 (mm). Les essais ont été réalisés sur le palier côté accouplement (Drive End bearing) de type 6205-2RS JEM SKF.

III.4.2. 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 intérieure	Diamètre Extérieure	Epaisseur	Diamètre de bille	Diamètre moyen de roulement
25	52	15	8	39

Tableau (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

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

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 1730 tr/min.

Les fréquences caractéristique qui se trouvent dans le contenu spectral de vibration sont:

$$f_{be} : \text{La fréquence de la bague extérieur } f_{be} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} \left(1 - \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right)$$

$$f_{bi} : \text{La fréquence de la bague interne } f_{bi} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} \left(1 + \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right)$$

$$f_{bille} : \text{La fréquence de rotation des bille } f_{bille} = \frac{f_r \cdot D_m}{2 \cdot D_b} \left(1 - \left(\frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right)^2 \right)$$

f_r : La fréquence de rotation.

N_b : Le nombre de billes.

D_b : Le diamètre de la bille.

D_m : Le diamètre au centre des billes (diamètre moyen) $D_m = \frac{D_{bag-ext} + D_{bag-int}}{2}$.

A : l'angle de contacte (le roulement est à gorge profonde, une charge radiale $\alpha = 0$)

On détermine la fréquence de rotation f_r lorsque la vitesse de rotation est de 1730 tr/min

$$f_r = \frac{1730}{60} = 28.83 \text{ Hz}$$

III.4.3 Caractérisation des signatures spectrales des défauts des roulements

III.4.3.1. Caractérisation des signatures spectrales de roulement à l'état sain

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

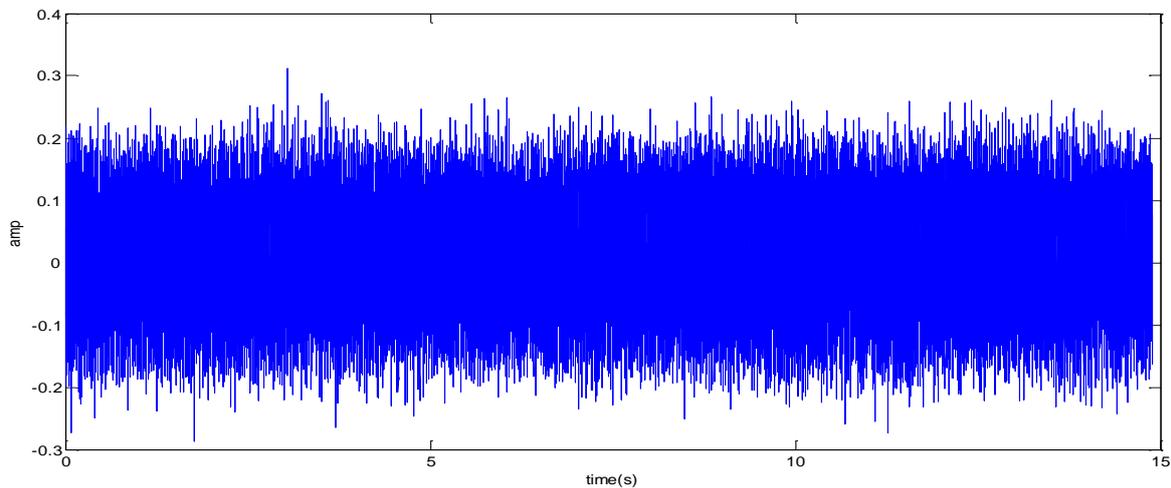


Figure (III-9) : signal temporel de roulement à l'état sain.

III.4.3.2. 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 :

$$f_{\text{défaut}} = f_r * C_{\text{défaut}} \quad \dots\dots\dots \text{(III.6)}$$

- $f_{\text{défaut}}$ fréquence caractéristique de défaut
- f_r fréquence de rotation.
- $C_{\text{défaut}}$ coefficient multiple de fréquence de défaut.

Pour une charge de moteur égale à 3 HP la vitesse de rotation est égale à 1730 tr/min ce qui correspond à une fréquence de rotation $f_r = 28.83 \text{ Hz}$.

Les fréquences caractéristiques de chaque défaut sont les suivantes:

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

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

L'élément défailant	La bague externe	La bague interne	L'élément roulant (la bille)
La fréquence caractéristique de défaut en (Hz)	103.4	156	135.9

Tableau (III-3) : fréquences caractéristiques des éléments défailants de roulement.

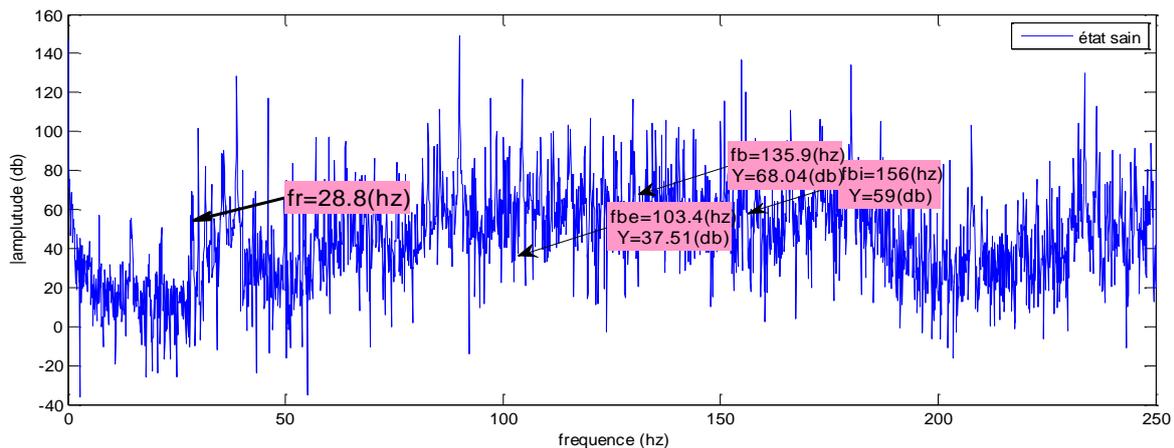


Figure (III-10) : spectre de roulement à l'état sain avec les fréquences caractéristiques des défauts de roulement.

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

- $f_r = 28.83$ Hz : fréquence de rotation de moteur.
- $f_{bi} = 156$ Hz : fréquence caractéristique de défaut de la bague interne, son amplitude est 59 dB.
- $f_{be} = 103.4$ Hz : fréquence caractéristique de défaut de la bague externe, son amplitude est : 37.51 dB.

- $f_{bille} = 135.9\text{Hz}$: fréquence caractéristique de défaut de la bille, son amplitude est: 68.04 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, nécessite de connaître le spectre sain pour chaque charge.

III.4.3.2.1. Signatures spectrales de défaut de la bague externe

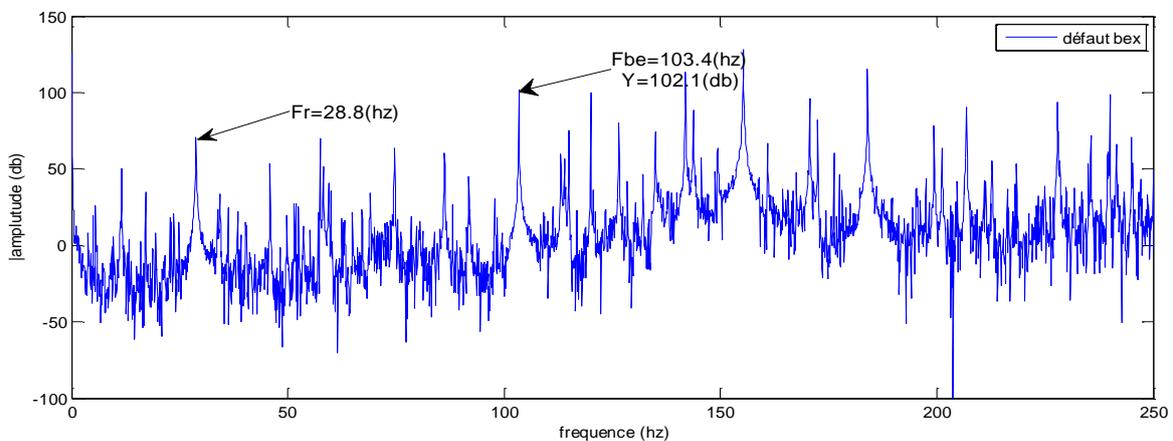


Figure (III-11) : *spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égale à 0.1778 (mm).*

Cette figure présente le spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égale à 0.1778 (mm) , en comparant ce spectre avec celui de la référence on voit qu'il y a une variation d'amplitude de raie de fréquence $f_{be} = 103.4 \text{ Hz}$ de 37.51 dB dans l'état sain à 102.1dB dans l'état défaillant, ce qui nous montre l'existence d'un défaut sur la bague externe de diamètre 0.1778 (mm).

Dans ce qui suit on présentera l'évolution d'amplitude de raie de fréquence $f_{be} = 103.4 \text{ Hz}$ en fonction de diamètre de défaut.

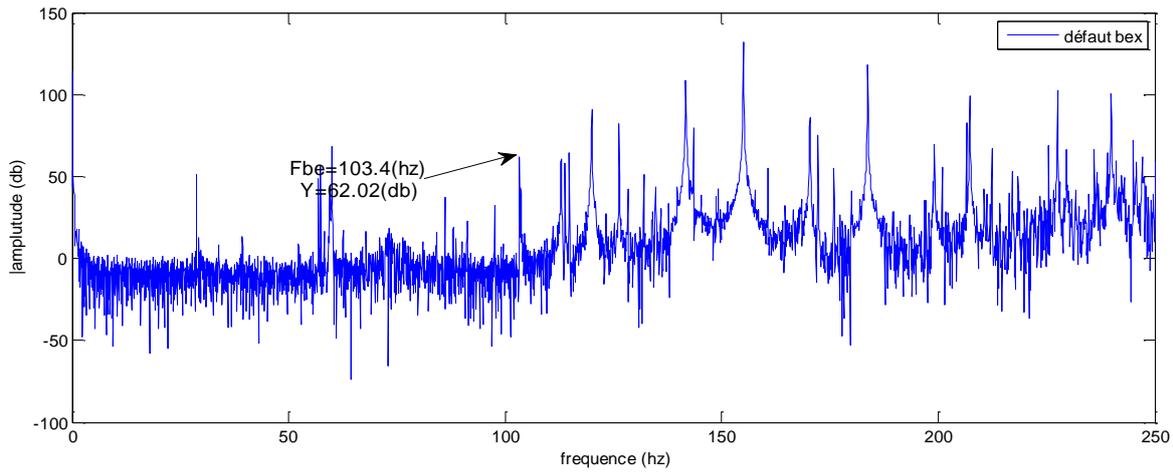


Figure (III-12) : *spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.3556 (mm).*

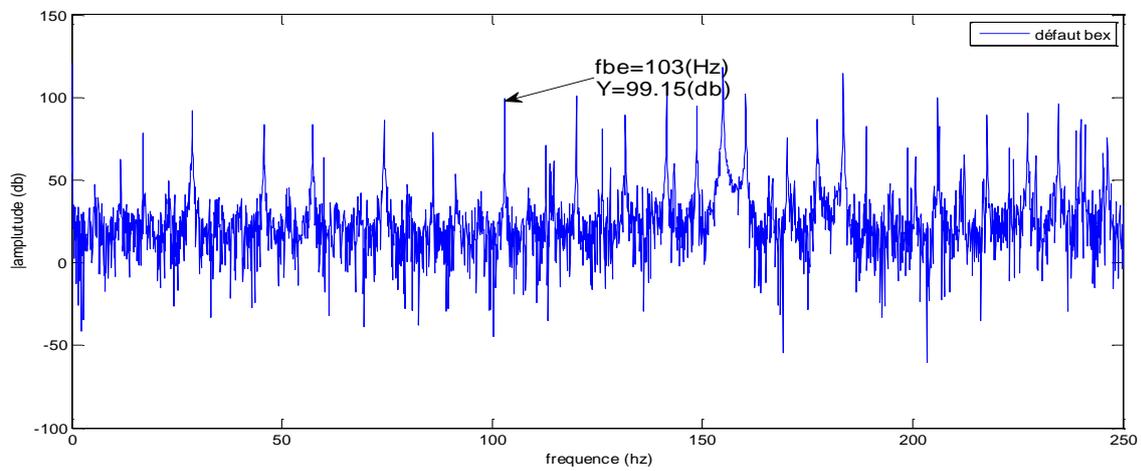


Figure (III-13) : *spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.5334 (mm).*

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.1778	0.3556	0.5334
Amplitude (dB)	37.51	102.10	62.02	99.15

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

La figure ci-dessous donne l'évolution de l'amplitude de raie de fréquence $f_{be} = 103.40$ Hz en fonction de diamètre de défaut.

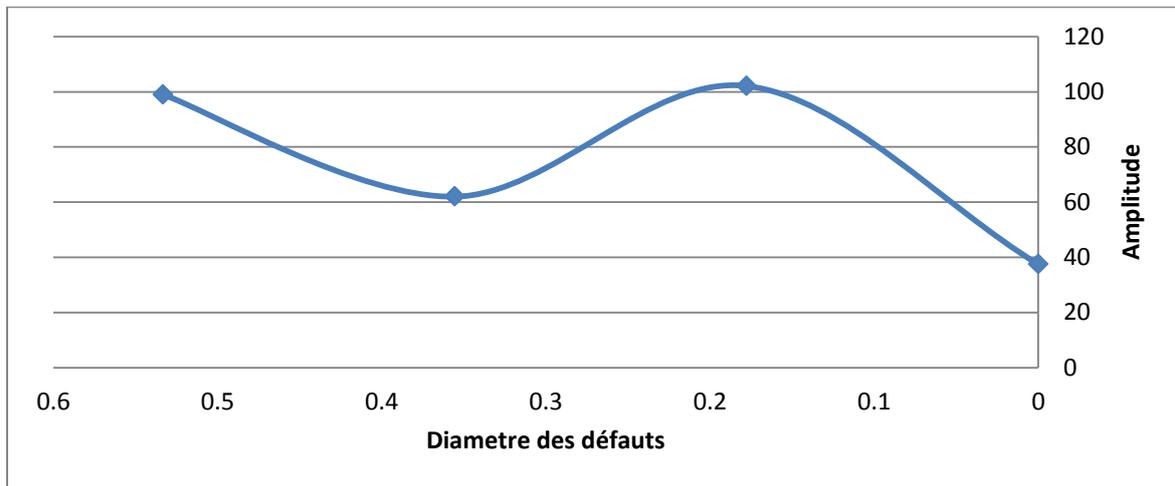


Figure (III-14) : *l'évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.*

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.4.3.2.1.1. Kurtosis

Le kurtosis est un indicateur permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut de roulement.

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.1778	0.3556	0.5334
kurtosis	1.2428	1.2546	1.2449	1.2687

Tableau (III-5) : *évolution de l'indicateur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.*

La figure ci-dessous donne l'évolution de l'indicateur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut.

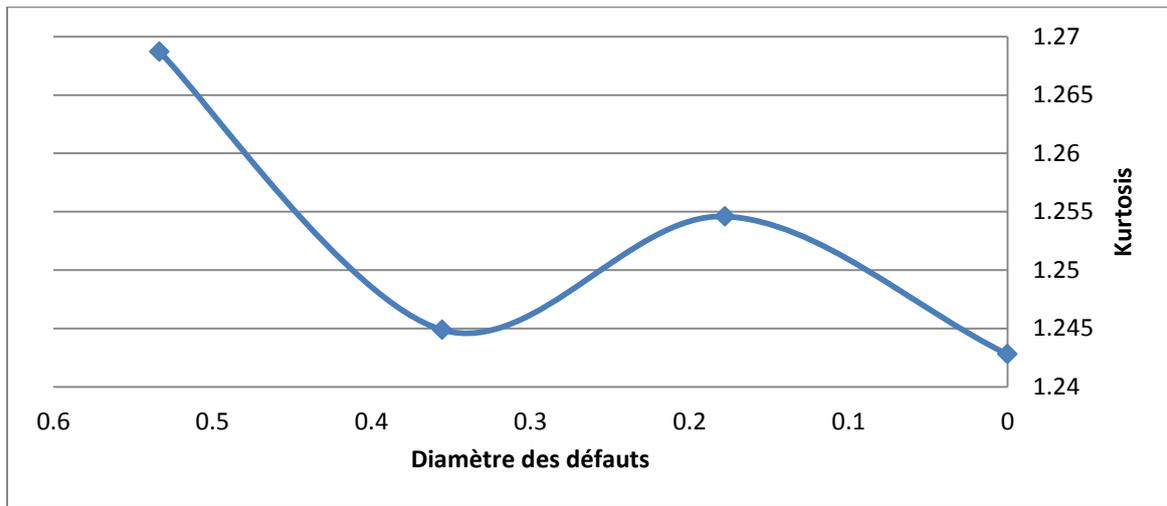


Figure (III-15) : l'évolution de indicateur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.

D'après les résultats résumés dans le tableau et présentés dans la **figure (III-15)**, l'évolution kurtosis, ils y' une variations aléatoire suivant l'augmentation de diamètre de défaut.

III.4.3.2.1.2.RMS

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.1778	0.3556	0.5334
RMS	0.0659	0.5804	0.0947	0.5590

Tableau (III-6) : évolution de inducteur scalaire RMS en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.

La figure ci-dessous donne l'évolution de indicateur scalaire RMS en fonction de diamètre de défaut.

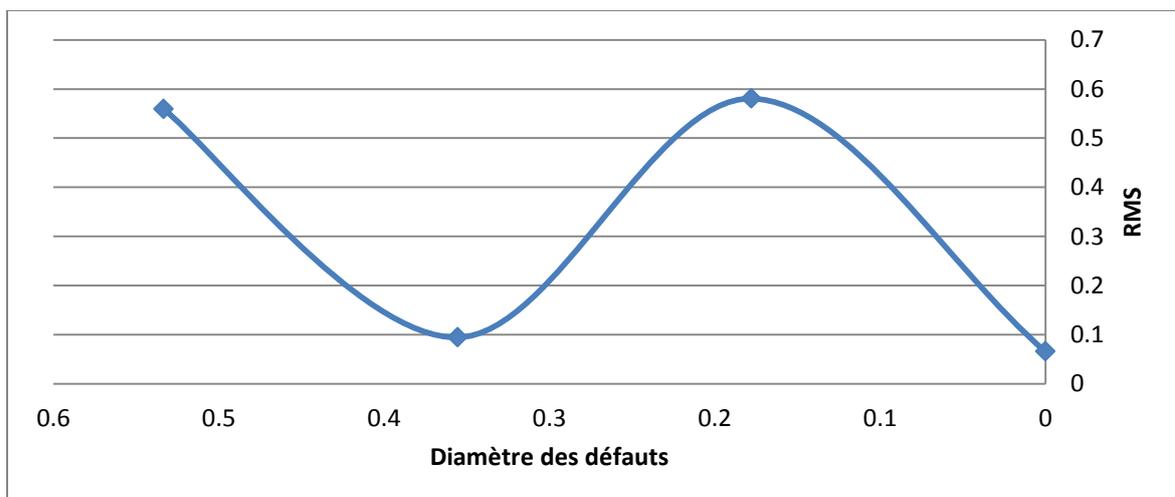


Figure (III-16) : l'évolution de indicateur scalaire RMS en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.

III.4.3.2.1.3. Facteur de crête (Fc)

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.1778	0.3556	0.5334
Fc	4.6515	5.5757	7.0228	11.9019

Tableau (III-7) : évolution de inducteur scalaire **Fc** en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.

La figure ci-dessous donne l'évolution de inducteur scalaire **Fc** en fonction de diamètre de défaut.

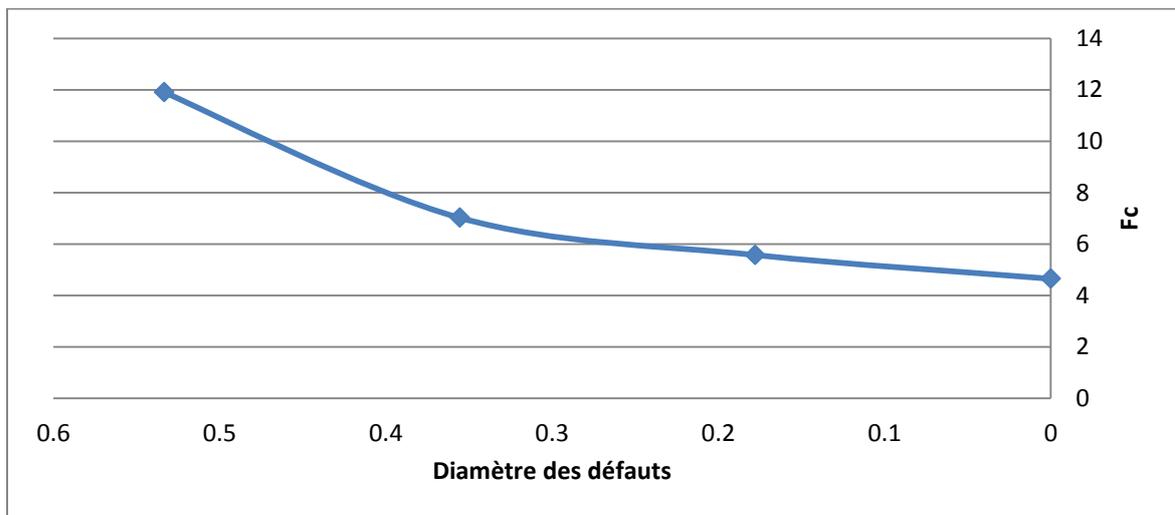


Figure (III-17) : l'évolution de inducteur scalaire **Fc** en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.

III.4.3.2.2. Signatures spectrales de défaut de la bague interne

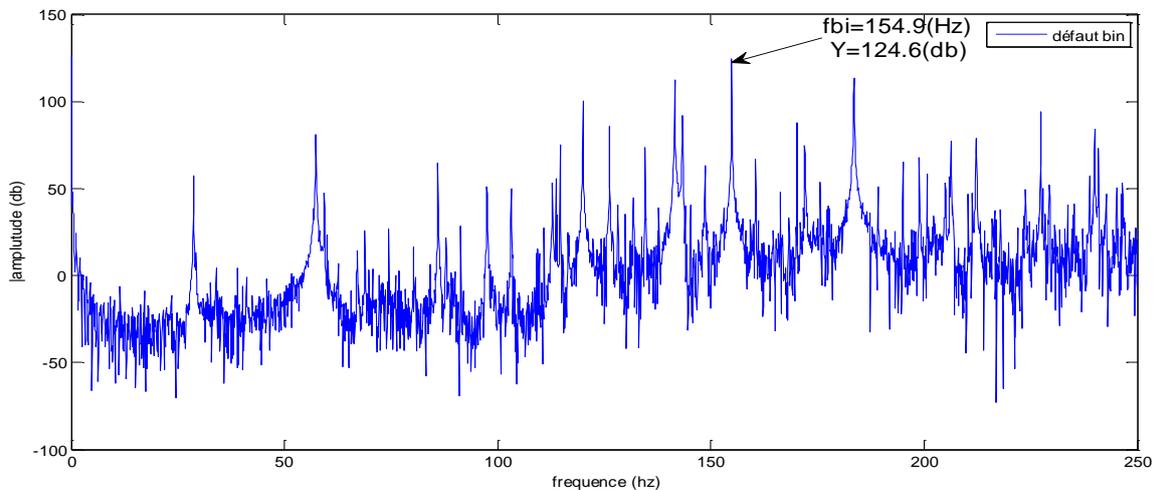


Figure (III-18) : spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.1778 (mm).

Cette figure présente le spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égale à 0.1778 (mm).

La comparaison entre ce spectre avec celui de la référence montre une variation d'amplitude de raie de fréquence $f_{bi} = 154.90 \text{ Hz}$ de 59 dB dans l'état sain à 124.6 dB dans l'état Défaillant, ce qui nous montre l'existence d'un défaut de la bague interne de diamètre 0.1778 (mm).

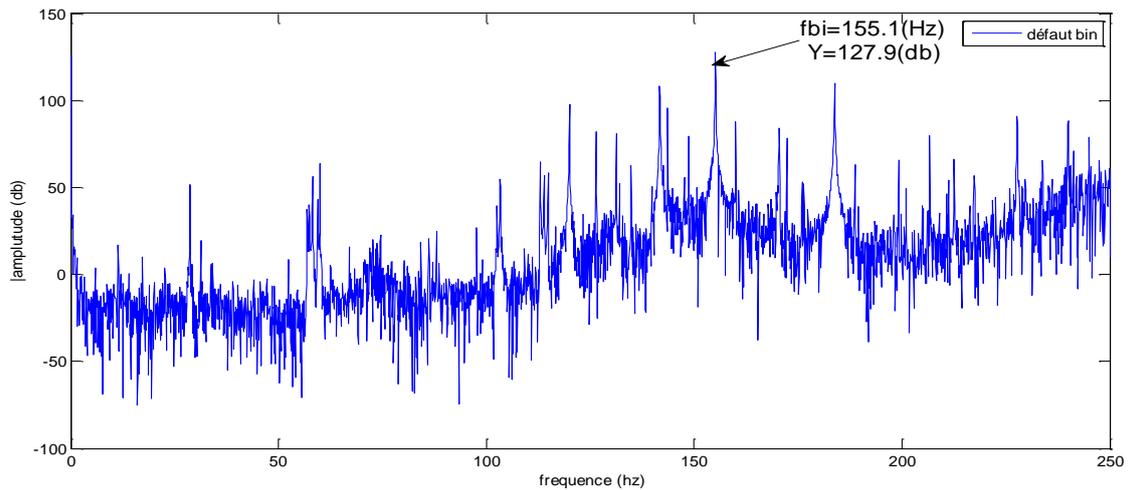


Figure (III-19) : *spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.3556 (mm).*

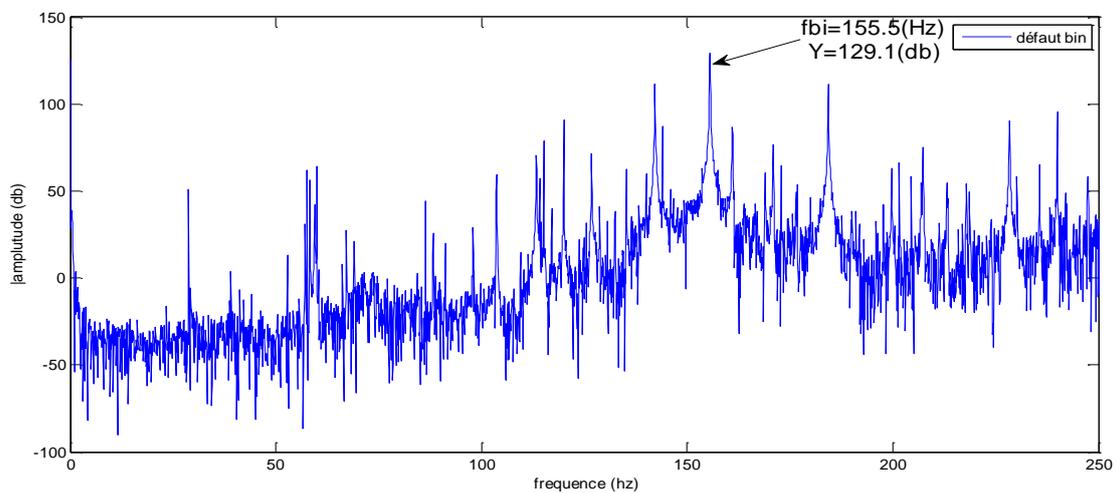


Figure (III-20) : *spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de default égal à 0.5334 (mm).*

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.1778	0.3556	0.5334
Amplitude (dB)	59	124.60	127.90	129.1

Tableau (III-8) : évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.

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

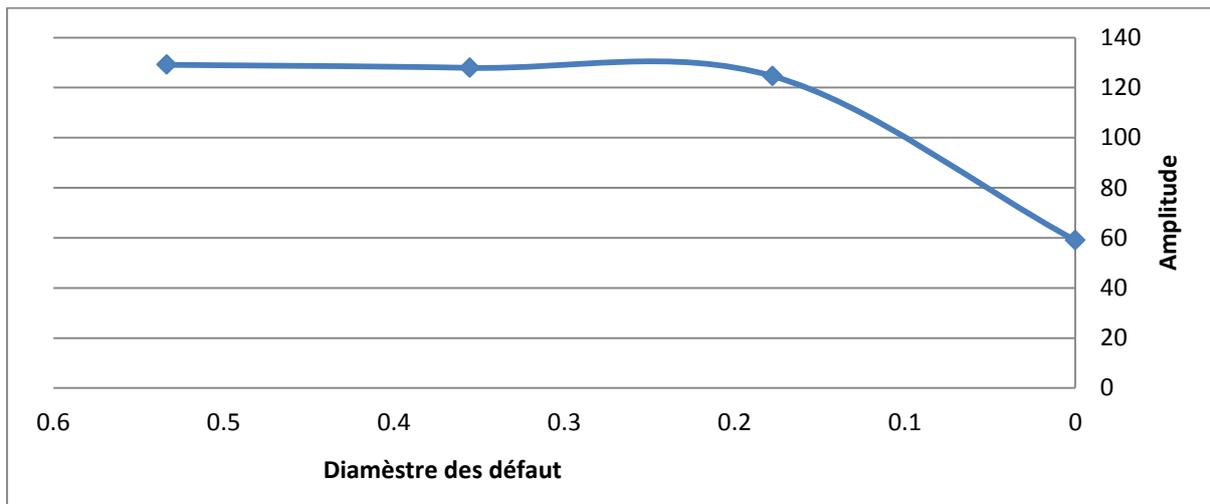


Figure (III-21) : l'évolution de l'amplitude des raies en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.

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

III.4.3.2.2.1. Kurtosis

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.1778	0.3556	0.5334
Kurtosis	1.2428	1.2480	1.2890	1.2597

Tableau (III-9) : évolution de l'indicateur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.

La figure ci-dessous donne l'évolution de l'indicateur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut.

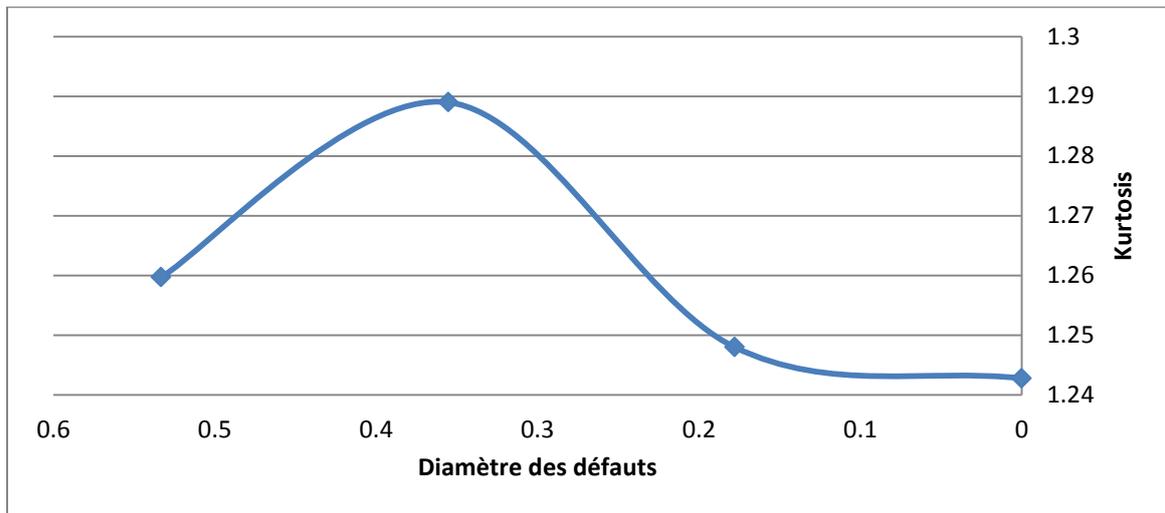


Figure (III-22) : l'évolution de indicateur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.

D'après les résultats résumés dans le tableau et présentés dans la **figure (III-22)**, l'évolution kurtosis, ils y' une variations aléatoire suivant l'augmentation de diamètre de défaut.

III.4.3.2.2.2.RMS

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.1778	0.3556	0.5334
RMS	0.0659	0.3136	0.1808	0.4487

Tableau (III-10) : évolution de inducateur scalaire **RMS** en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.

La figure ci-dessous donne l'évolution de indicateur scalaire **RMS** en fonction de diamètre de défaut.

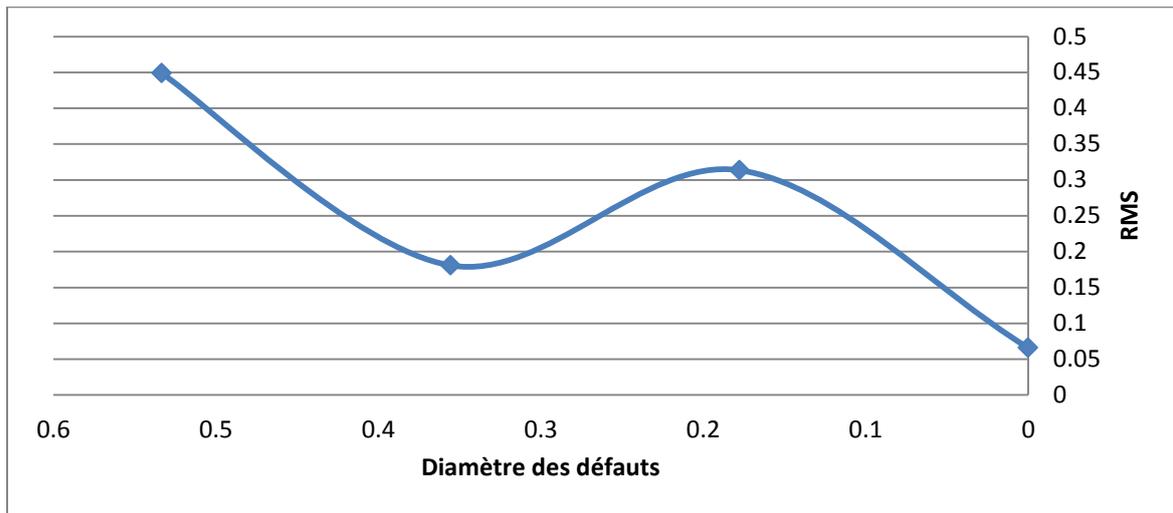


Figure (III-23) : *l'évolution de indicateur scalaire **RMS** en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.*

III.4.3.2.2.3.Facteur de crête

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.1778	0.3556	0.5334
Fc	4.6515	5.3298	11.7649	8.0560

Tableau (III-11) : *évolution de inducateur scalaire **Fc** en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.*

La figure ci-dessous donne l'évolution de indicateur scalaire **Fc** en fonction de diamètre de défaut.

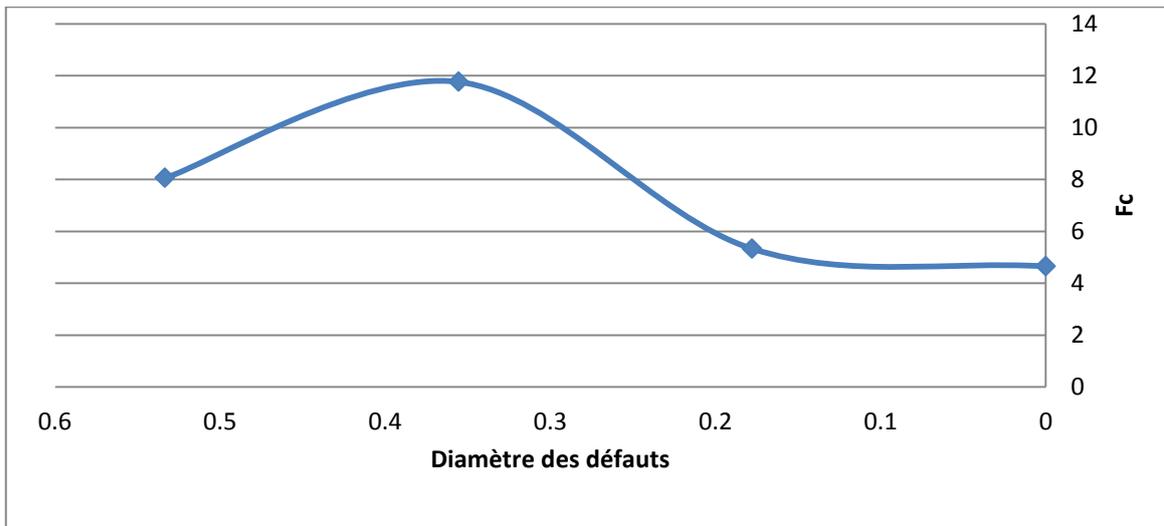


Figure (III-24) : l'évolution de indicateur scalaire F_c en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.

III.4.3.2.3. Signatures spectrales de défaut de la bille

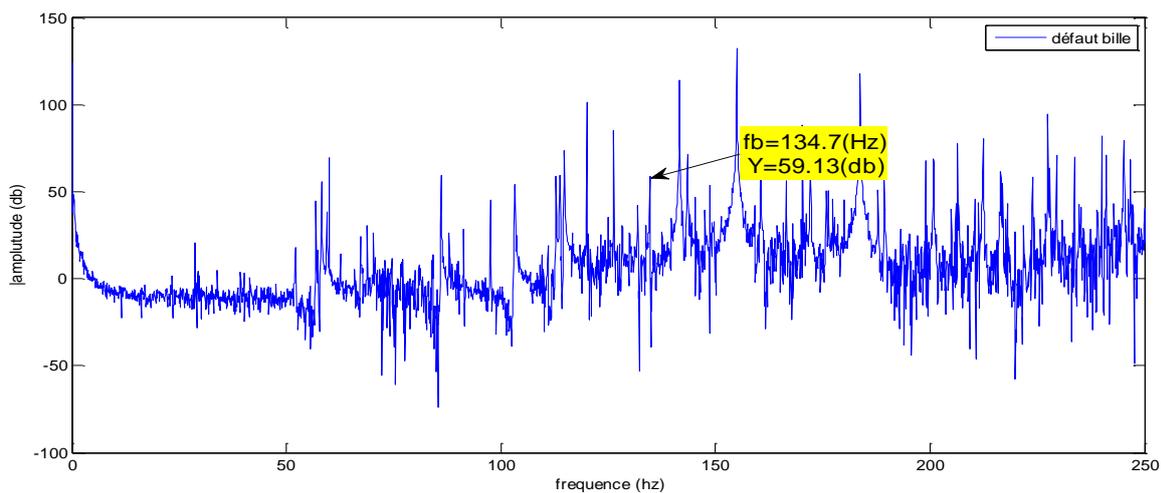


Figure (III-25) : spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.1778 (mm).

Cette figure présente le spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égale à 0.1778 (mm) , en comparant ce spectre avec celui de la référence on voit qu'il y a une variation d'amplitude de raie de fréquence $f_{bille} = 134.70 \text{ Hz}$ de 68.04 dB dans l'état sain à 59.13 dB dans l'état défailant ,ce qui nous montre l'existence d'un défaut de bille de diamètre 0.1778 (mm).

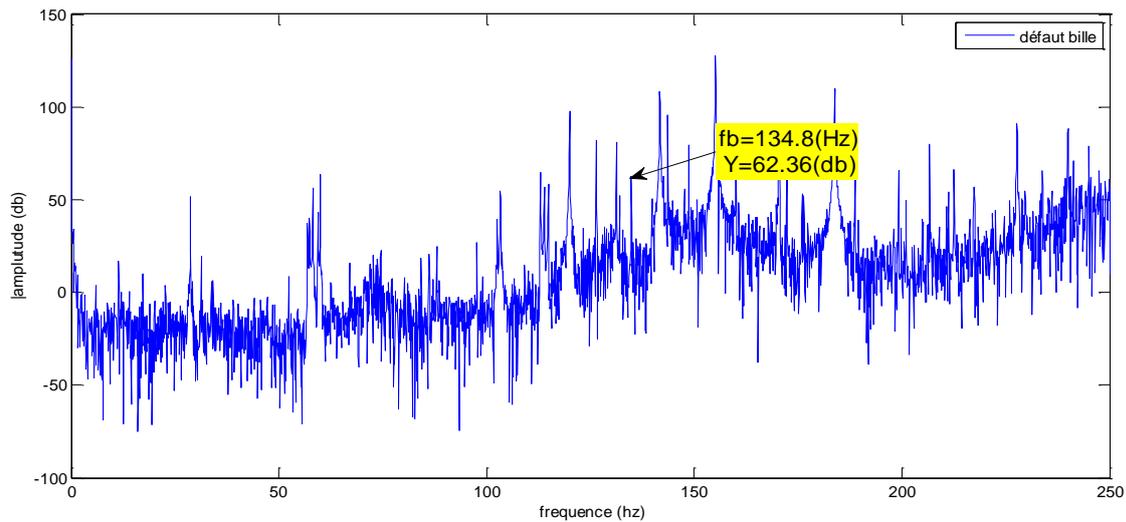


Figure (III-26) : *spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.3556 (mm).*

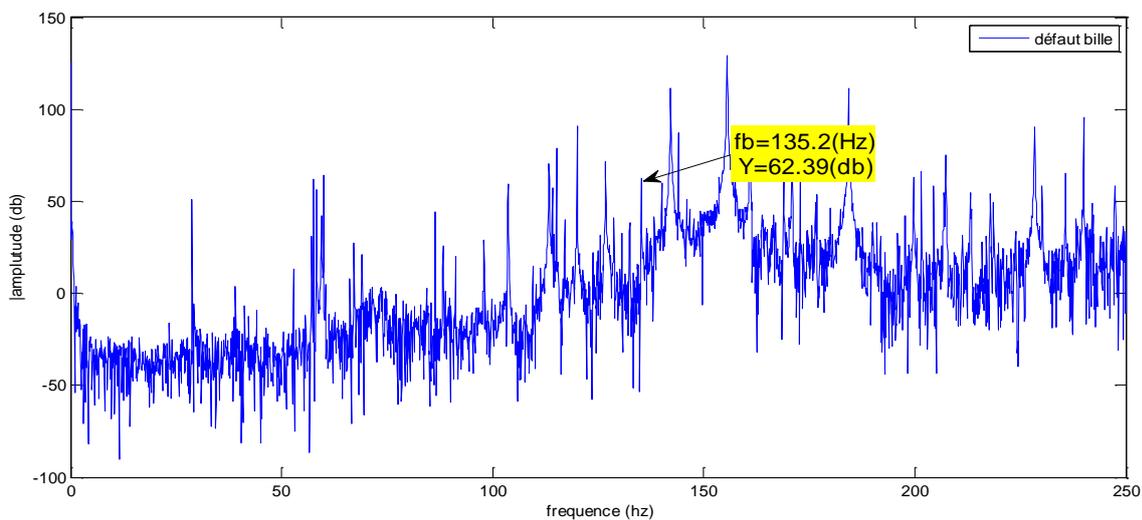


Figure (III-27) : *spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.5334 (mm).*

Diamètre de défaut (mm)	Etat sain (0)	0.1778	0.3556	0.5334
Amplitude(dB)	68.04	59.13	62.36	62.39

Tableau (III-12) : *évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bille.*

La figure ci-dessous donne l'évolution de l'amplitude de raie de fréquence $f_{bille} = 135.9$ Hz en fonction de diamètre de défaut.

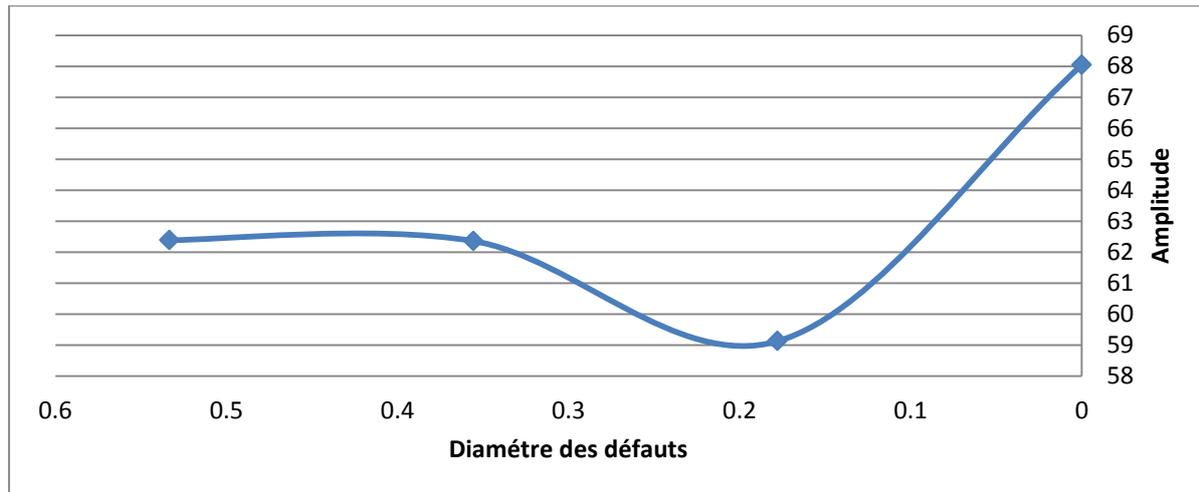


Figure (III-28) : l'évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bille.

D'après les résultats résumés dans le tableau et présentés dans la figure (III-28), l'évolution l'amplitude de la raie de fréquence caractéristique de défaut de la bille , ils augmente suivant l'augmentation de diamètre de défaut.

III.4.3.2.3.1.Kurtosis

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.1778	0.3556	0.5334
Kurtosis	1.2428	1.2657	1.2649	1.2499

Tableau (III-13) : évolution de inducteur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut de la bille.

La figure ci-dessous donne l'évolution de inducteur scalaire kurtosis en fonction de diamètre. défaut de la bille.

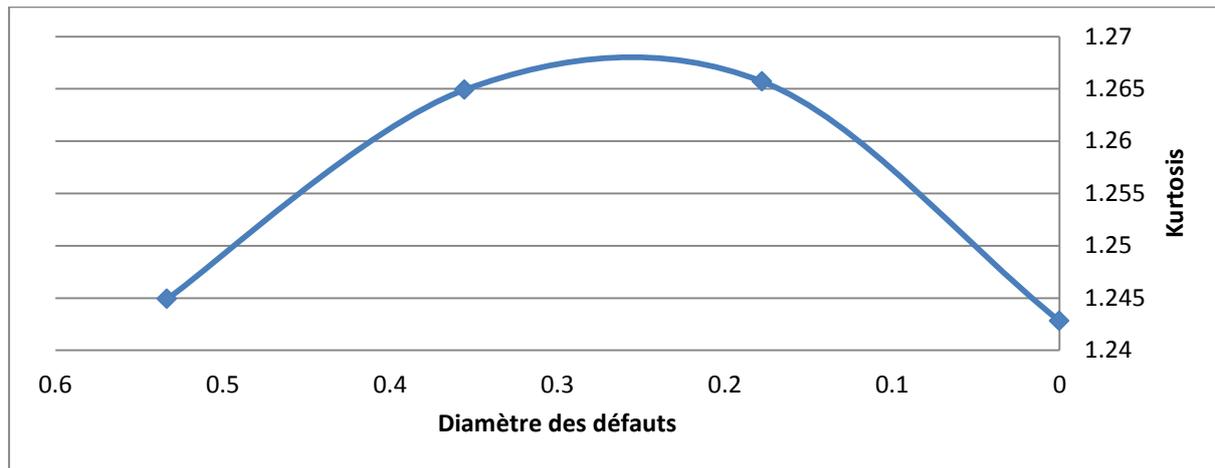


Figure (III-29) : *l'évolution de indicateur scalaire kurtosis en fonction de diamètre de défaut de la bille.*

D'après les résultats résumés dans le tableau et présentés dans la **figure (III-29)**, l'évolution kurtosis, ils diminueront suivant l'augmentation de diamètre de défaut.

III.4.3.2.3.2.RMS

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.1778	0.3556	0.5334
RMS	0.0659	0.1536	0.1337	0.1180

Tableau (III-14) : *évolution de l'indicateur scalaire RMS en fonction de diamètre de défaut de la bille.*

La figure ci-dessous donne l'évolution de l'indicateur scalaire **RMS** en fonction du diamètre de défaut de la bille.

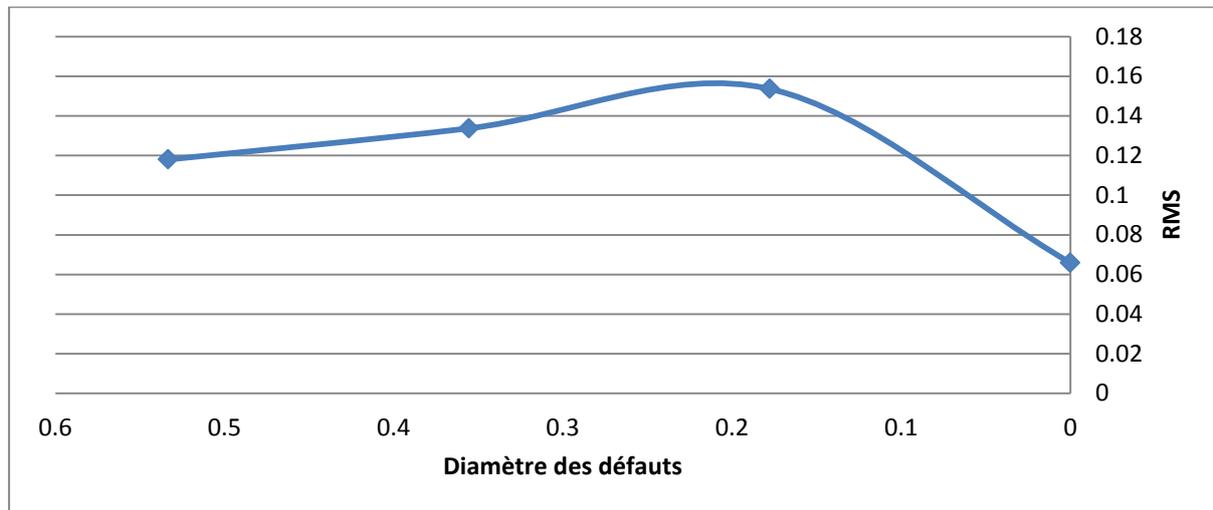


Figure (III-30) : l'évolution de indicateur scalaire **RMS** en fonction de diamètre de défaut de la bille.

III.4.3.2.3.3.Facteur de crête

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.1778	0.3556	0.5334
Fc	4.6515	4.6901	14.8786	4.8855

Tableau (III-15) : évolution de inducteur scalaire **Fc** en fonction de diamètre de défaut de la bille.

La figure ci-dessous donne l'évolution de indicateur scalaire **Fc** en fonction de diamètre de défaut de la bille.

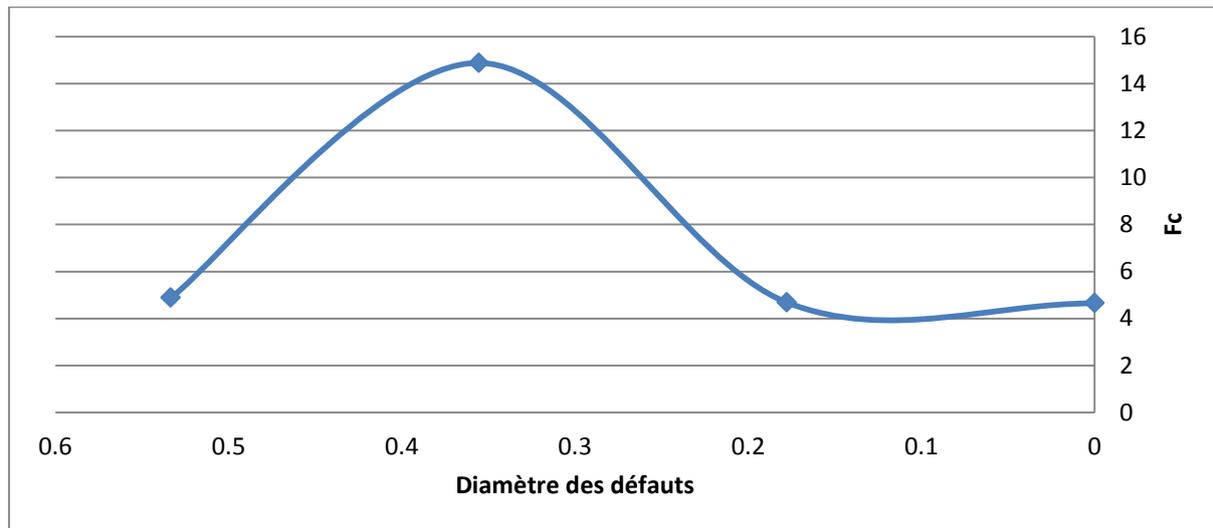


Figure (III-31) : *l'évolution de l'indicateur scalaire F_c en fonction de diamètre de défaut de la bille.*

Interprétation sur les trois indicateurs scalaire

Les indicateurs (RMS, K et F_c) les trois indicateurs scalaires dans le défaut niveau (1) ont des valeurs supérieures par rapport au cas sans défaut car les engrenages ont subi un rodage.

III.5.Conclusion

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

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

Le bon choix de l'indicateur de vibration joue un rôle très important pour réaliser un diagnostic et par conséquent la détection de n'importe quel défaut de roulement, par exemple pour la détection d'un défaut de roulement, on trouve qu'il est utile d'utiliser l'analyse spectrale, le facteur de défaut de roulement est aussi exigé la complémentarité de plusieurs indicateurs (facteur crête et valeur efficace).

Conclusion générale

La détermination de la loi de la détérioration des roulements revêt grande importance dans le domaine des machines tournantes, pour la maintenance. Au cours de cette étude, nous avons montré l'influence des conditions d'exploitation d'un roulement sur la durée de vie, et de donner la méthode de la maintenance réelle à suivre pour l'évaluation de la durée restante de survie pour bien approvisionner, et prévoir les arrêts de chaque machine tournante à l'avance et ce avec l'application de l'analyse vibratoire comme outil à fin de statuer sur l'état réel de notre roulement.

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

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

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

Le 1^{er} chapitre rappelle sur généralités du vibration les principes de base de l'analyse vibratoire appliquée à la maintenance conditionnelle, les notions de base de dynamique appliquée aux milieux continus. Leurs applications à des systèmes réels sont brièvement exposées.

Le 2^{ème} chapitre a été consacré à un état de l'art sur le diagnostic et maintenance dans l'industrie, on a vu les étapes essentielles à suivre pour faire un diagnostic, puis on avait

Conclusion générale

présenté les différentes techniques de diagnostic, ou on a basé sur la technique qui utilise les outils de traitement de signal.

Le 3ème chapitre a été divisé à deux parties:

la première partie c'est un rappel relatif au traitement de signal (signal, échantillonnage, type des signaux, théorème de Shannon), puis on avait parlé suffisamment sur l'analyse spectrale qui est la transformée de Fourier en indiquant le principe de détection des défauts des roulements par cette analyse.

la deuxième partie 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 pannes surtout lorsque on parle des défauts liés aux éléments des machines tournantes qui produisent des chocs périodiques comme les roulements, les engrenages... Cette méthode est rapide car il suffit juste d'avoir le signal vibratoire en lui caractérisant dans le domaine fréquentiel (transformée de Fourier) afin d'obtenir son spectre, puis on le compare avec celui de référence, s'il y a des apparitions des nouvelles fréquences des défauts ou bien des modifications des amplitudes des raies des fréquences des défauts, cela signifiera qu'un défaut est apparu au niveau de roulement.

Références bibliographiques

- [1] Augeix D Technique de l'ingénieur (traité génie mécanique – analyse vibratoire.
- [2] Document réalisé par : Jacky DUMAS (01dB-STELL (Groupe MVI technologies Version Février 2001.
- [3]: Serge Dos Santos «COURS DE TRAITEMENT DU SIGNAL» École Nationale d'Ingénieurs du Val de Loire Année 2008-2009.
- [4] : Université de Caen « signaux aléatoire »
- [5]: Claire BRENEUR, «éléments de maintenance préventive des machine tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements», thèse de l'université de l'INSA de Lyon, année 2002.
- [6]: Technique de l'ingénieur « Essais de vibrations, Mesures et exploitation des résultats »
- [7] 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.
- [8] Alain Boulenger, Christian Pachaud «Analyse vibratoire en maintenance».
- [9] Amar Chiter «Détection et diagnostic des défauts de roulement : contribution à la maintenance des machines tournantes». Thèse de Magistère en optique et mécanique de précision UFAS 2001
- [10]: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.
- [11] : Zwingelstein, G., (1995).Diagnostic des défaillances : Théorie et pratique pour les systèmes industriels, Editions Hermès.
- [12] : 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
- [13]: Boulenger A, Pachaud C : « Aide mémoire : Surveillance des machines par analyse des vibrations ». Edition Dunod, Paris 2009.
- [14] :M. ZEMOURI, « contribution a la surveillance des systèmes de production a l'aide desréseaux de neurones dynamiques : application a la maintenance »,Thèse de doctorat présenté à l'université de Franche-Comte, France.2003.
-

Références bibliographiques

- [15] :DrRAHMOUNE Chemseddine (2011), « Analyse et traitement du courant statorique pour la détection des défauts dans les systèmes électromécaniques ». Mémoire de magister présenté UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES.
- [16]: Frank, P.M., (1990). Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge Based Redundancy – A survey and New Results, Automatica, Vol. 26, pp. 459-474.
- [17]: Leo H. Chiang, Evan L. Russell, et Richard D. Braatz (2001). Fault
- [18]: R. Isermann (1993). Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing - tutorial paper. Automatica, 29(4) :813-835, 1993.
- [19]: J. Gertler (1997). Fault detection and isolation using parity relations. Control Engineering Practice, 5(5) :653–661, 1997.
- [20] :Dubuisson, B., E. Boutleux, P. Dague, T. Denoeux, E. Didelet, Y. Gandvalet et M. Masson (2001). Diagnostic, Intelligence Artificielle et reconnaissance de formes, Ed. Hermes.
- [21] : buivietphuong (2007). « Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite. Application à l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide ». Thèse de doctorat l'INPGRENOBLE .
- [22]: Mr. TOUAFEK Ishak « Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L'EMD et des ondelettes (WT) » Mémoire de magister présenté à l'UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF UFAS (ALGERIE).
- [23] Drouiche K., « Quelques techniques du traitement du signal pour la maintenance prédictive », Thèse de l'ENST de Paris, 1993.
- [24] :fran François Lafleur « L'organisation d'un programme de maintenance prédictive » 2003
- [25]: BM 5 145 Technique de l'ingénieur « Analyse vibratoire des machines tournantes »
- [26] Landolsi Foued « COURS DE TECHNIQUES DE SURVEILLANCE »
- [27] : Tendence revue mesures 754 avril 2003 « les roulements, des composants à surveiller de près »
- [28] Ali IBRAHIM « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée ». Thèse de Doctorat 10 Mars 2009.
- [29] : Schenk S A « vibrations équilibrage sur le site : Application à la maintenance industrielle ». Edition Schenk S A. 1994.
- [30] : Dron J.P., " Elaboration et adaptation d'outils pour l'étude et le suivi de L'endommagement de composants mécaniques par analyse vibratoire ", Thèse de Doctorat de l'Université de Reims (1995).
-