



Université Mohamed Khider de Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Génie Electrique

Electromécanique

Réf :

Présentés par :

Soufiane MAOUCHE
Ahmed Oussama BEKOUCHE

Diagnostic des défauts des roulements par l'analyse d'enveloppe

Devant le jury composé de :

Mr. Adel GHOGGAL	Pr	Université de Biskra	Président
Mr. Hamid DERGHAL	MAA	Université de Biskra	Encadreur
Mr. Boualaga RABHI	Pr	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire: 2019 / 2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Génie Electrique
Option :

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème :

**Diagnostic des défauts des roulements par l'analyse
d'enveloppe**

Présenté par :

Soufiane MAOUCHE

Ahmed Oussama BEKOUCHE

Avis favorable de l'encadreur :

Hamid DERGHAI

signature

Avis favorable du Président du Jury

Mr. Adel GHOGGAL

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique
Filière : Génie Electrique
Option : Électromécanique

Thème :

Diagnostic des défauts des roulements par l'analyse d'enveloppe

Proposé par : Soufiane MAOUCHE

Ahmed Oussama BEKOUCHE

Dirigé par : Mr. Hamid DERGHAI

Résumé (Français et Arabe) :

L'objectif de Ce travail à surveiller et diagnostiquer les 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 d'enveloppe « HFRT » qui s'appuie la détection précoce des défauts de type choc.

Mots clés : analyse d'enveloppe, roulement, diagnostic, détections, défaut.

ملخص:

يهدف هذا العمل إلى مراقبة و تشخيص الأعطال الميكانيكية وبشكل خاص أخطاء الحمل.

تعتمد الدراسة التي سنقوم بها على تطبيق تقنية معالجة الإشارة والتي تعد حلاً فعالاً لتشخيص أخطاء المحمل، وهذه الطريقة هي تحليل الغلاف "HFRT" الذي يعتمد على الاكتشاف المبكر لأعطال الصدمات.

الكلمات المفتاحية: تحليل الظرف ، التحمل ، التشخيص ، الكشف ، الخطأ.

Dédicace

Je rends grâce a Dieu de m'avoir donnée le courage et la volonté.

Je dédie ce mémoire à :

*Ma très chère mère,
pour son amour et ses encouragements.*

*Mon très cher père,
qui est le premier soutien pour moi.*

*Mes chers frères et sœurs Yacine, Hamza, Aymen, Sana, Karima, Hanen et
Salima pour leurs grands amours et leurs soutiens qu'ils trouvent ici
l'expression de ma haut gratitude.*

*Mes chers amis Khaled, Hamza, Oussama, Ahmed, et surtout à Sana
Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.*

Toutes la famille Maouche et Ghedabi.

Mon très cher binôme Oussama.

A tous mes chers enseignants qui ont enseigné moi.

Soufiane

Dédicace

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes chères sœurs particulièrement KARIMA pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement,

A mon encadreur HAMID DERGHAL pour m'avoir dirigé ce travail de recherche et m'avoir fait bénéficier de son expérience et de précieux conseils.

A toute ma famille, et mes amis particulièrement OUSSAMA ABABSA Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Enfin A mon binôme qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Oussama

Remerciements

Avant tout, nos remerciements en premier lieu, à الله qui nous a donné la foi, le courage durant ces longues années d'études et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

Nous voudrions exprimer par ce modeste travail notre gratitude, notre reconnaissance, et nos grands remerciements à notre encadreur M.Derghal Hamid pour sa compétence ainsi que son aide qu'a son Aide qui a permis de réaliser ce travail.

Nous remercions très sincèrement tout particulièrement les membres de jury qui ont accepté d'évaluer et juger notre travail.

Un grand merci à l'université de Mohamed Khider et au département génie électrique pour m'avoir soutenu pendant toutes les années d'études.

Nos remerciements s'étendent également à tous, nos enseignants durant les années d'études.

Nous tenons à remercier particulièrement nos parents ; nos succès demeurés loin le fruit de leurs longues années de sacrifices et de patience.

Enfin, nous ne voudrions pas oublier de remercier toute personne qui nous aidions de loin ou de près à réaliser ce travail.

Sommaire

Résumé.....ii

Dédicaces.....iii

Remerciements.....v

Liste des figuresx

Liste des tableaux.....xiii

Liste des abréviations et notations.....xiv

Introduction générale2

CHAPITRE I : généralités sur la maintenance et l'analyse vibratoire

I.1 Introduction.....5

I.2 La maintenance.....5

 I.2.1 Introduction.....5

 I.2.2 Définition et objectif de la maintenance.....5

 I.2.3 Les types de maintenance.....6

 I.2.3.1 La maintenance corrective.....7

 I.2.3.2 La maintenance préventive.....8

I.3 Techniques de surveillance.....9

 I.3.1 Analyse La thermographie infrarouge.....9

 I.3.2 Analyse de tribologie et de l'huile.....10

 I.3.3 Surveillance des vibrations.....11

I.4 Vibration.....13

I.4.1 Définition d'une vibration.....	13
I.4.2 Les différentes formes de vibrations.....	14
I.4.2.1 Vibrations harmoniques.....	14
I.4.2.2 Vibrations périodiques.....	15
I.4.2.3 Vibration aperiodique.....	15
I.5 Origine des vibrations.....	16
I.6 L'analyse vibratoire en tant qu'outil de diagnostic.....	17
I.7 Activités de l'analyse vibratoire.....	23
I.7.1 La surveillance.....	23
I.7.2 La détection.....	23
I.7.3 Le diagnostic.....	23
I.8 Conclusion.....	25

CHAPITRE II : étude théorique sur les roulements

II.1 Introduction.....	27
II.2 Défauts des machines tournantes.....	27
II.2.1 Balourd.....	28
II.2.2 Le désalignement.....	28
II.2.3 Défauts des engrenages.....	29
II.3 Les roulements et leurs avaries.....	30
II.3.1 Géométrie et constitution d'un roulement.....	30
II.3.1.1 La bague extérieure.....	31
II.3.1.2 La bague intérieure.....	31
II.3.1.3 La cage.....	31

II.3.1.4 Les éléments roulants.....	31
II.3.2 Différents types des roulements.....	31
II.3.3 Les facteurs essentiels pour le choix de type de roulement.....	33
II.4 Défauts des roulements.....	33
II.4.1 Causes principales des défauts.....	33
II.4.2 Origine des défauts de roulement.....	34
II.4.3 Principaux défauts.....	34
II.4.3.1 Le grippage.....	34
II.4.3.2 La corrosion.....	35
II.4.3.3 Usure.....	35
II.5 Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement.....	36
II.5.1 Fréquence de défaut sur la bague intérieure.....	38
II.5.2 Fréquence de défaut sur la bague extérieure.....	38
II.5.3 Fréquence de défaut sur la bague extérieure.....	39
II.5.4 Fréquence de défaut sur l'élément roulant.....	39
II.6 Conclusion.....	40

CHAPITRE III : les techniques de traitement de signal applique à l'analyse vibratoire

III.1 Introduction.....	42
III.2 Analyse dans le domaine temporel.....	42
III.2.1 Indicateurs scalaires.....	42
III.2.2 Le moyennage temporel synchronisé.....	45
III.3 Analyse dans le domaine fréquentiel.....	46

III.3.1 Analyse spectrale.....	46
III.3.2 L'analyse cepstrale.....	48
III.3.3 L'analyse d'enveloppe « HFRT ».....	50
III.4 Analyse temps-fréquence.....	51
III.4.1 Transformée de Fourier à courte terme « STFT ».....	51
III.4.2 Distribution de Wigner Ville (DWV).....	52
III.5 Analyse temps- échelle.....	53
III.5.1 La transformée en ondelettes.....	53
III.5.2 Principe de La Transformée en ondelettes.....	55
III.6 Conclusion.....	56

**CHAPITRE IV : application de la méthode d'enveloppe pour le diagnostic
des défauts de roulements**

IV.1 Introduction	58
IV.2 Configuration expérimentale et acquisition de données.....	58
IV.3 Calcul cinématique.....	60
IV.4 Introduction aux fréquences caractéristiques de rupture des roulements.....	61
IV.4.1 Caractérisation des signatures spectrales de roulement à l'état sain.....	63
IV.4.2 Analyse d'enveloppe.....	70
IV.5 Conclusion.....	73
Conclusion générale.....	75
Bibliographie.....	78

Liste des figures

Figure I.1: vue d'ensemble des différents types de maintenance	6
Figure I.2: diagramme représentative de défectives de maintenances	8
Figure I.3 : les vibrations et les modes de détections	9
Figure I.4: principe de l'analyse thermographique	10
Figure I.5: au total (non harmoniques) courbes de vibration dans le domaine temporel	12
Figure I.6: indication graphique de la théorie de la transformée de Fourier	12
Figure I.7: représentation d'une vibration	13
Figure I.8: vibration harmonique	14
Figure I.9: vibration périodique	15
Figure I.10: vibration apériodique	16
Figure I.11: origine des vibrations sur les machines tournantes	16
Figure I.12: effort rencontrent une mobilité	17
Figure I.13: exemple des accéléromètres	18
Figure I.14: les composantes d'un accéléromètre	19
Figure I.15: vélocimetre	19
Figure I.16: capteur de proximité	20
Figure I.17: la mesure Laser	21
Figure I.18: conditionneur	21
Figure I.19: exemples des appareils de mesure	22
Figure I.20: exemple d'une chaine de mesure	22
Figure I.21: les modes de surveillance	23
Figure II.1: défauts désalignement	29
Figure II.2: Piqures	29

Figure II.3: différentes composantes d'un roulement	30
Figure II.4: une variété de roulements	32
Figure II.5: grippage d'une bague	35
Figure II.6: corrosion sur une piste de roulement	35
Figure II.7: écaillage par (a) fatigue et (b) superficiel de la bague interne	36
Figure II.8: caractéristiques d'un roulement	37
Figure III.1 : évolution des valeurs crête, efficace et du facteur de Crête	44
Figure III.2 : transformée de Fourier d'une somme de deux sinusoïdes	47
Figure III.3 : représentations d'un spectre	48
Figure III.4 : utilisation du cepstre pour la surveillance d'un engrenage	50
Figure III.5: arbre de décomposition (AMRO)	55
Figure IV.1: a) Banc d'essais et b) son schéma synoptique	59
Figure IV.2: SKF Micro log Analyser GX	60
Figure IV.3: signal temporel de roulement à l'état sain	64
Figure IV.4 : spectre de roulement à l'état sain avec les fréquences caractéristiques des défauts de roulement	65
Figure IV.5: spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.007 (mm)	65
Figure IV.6: spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.014(mm)	66
Figure IV.7: spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.007 (mm)	67
Figure IV.8: spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.014 (mm)	67
Figure IV.9: spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.007 (mm)	68

Figure IV.10 : spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.014 (mm)	69
Figure IV.11: enveloppe du défaut de bague intérieure avec défaut 0.007 mm	71
Figure IV.12: enveloppe du défaut de bague intérieure avec défaut 0.014 mm	71
Figure IV.13: enveloppe du défaut de bague extérieure avec défaut 0.007 mm	72
Figure IV.14: enveloppe du défaut de bague extérieure avec défaut 0.014mm	72

Liste des tableaux

Tableau III.1 : comparaison entre l'Analyse spectrale et l'Analyses cepstrale	50
Tableau IV.1 : 6205-2RS JEM SKF dimensions des roulements et fréquence des défauts	60
Tableau IV.2 : Charges du moteur et vitesses de rotation en tr/mn	61
Tableau IV.3 : Fréquence caractéristique de défaillance en fonction du type de défaut et de la vitesse de rotation	63
Tableau IV.4 : l'évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bague interne	66
Tableau IV.5 : évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bague	68
Tableau IV.6 : l'évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bille externe	69

Liste des abréviations

BPFO	: Ball Passage Frequency Outer race
BPII	: Ball Passage Frequency Inner race
BSF	: Ball Spin Frequency
RMS	: Root Mean Square
FBE	: Fréquence caractéristique de défaut de la bague extérieure
FB I	: Fréquence caractéristique de défaut de la bague intérieure
FB	: Fréquence caractéristique de défaut de l'élément roulant (Bille)
NT	: Nombre de point du signal numérique
FC	: Le facteur crête
MTS	: Moyennage temporel synchronisé
FFT	: La transformée de Fourier rapide
TF	: Transformée de Fourier
TFFG	: Transformée de Fourier à Fenêtre glissante
DSP	: Densité spectrale de puissance
HFRT	: High frequency Résonance Technique
STFT	: Transformée de Fourier à courte terme
DWV	: Distribution de Wigner Ville
AMRO	: L'Analyse Multi Résolution en Ondelette

Notations

- ω : Fréquence angulaire ou pulsation du mouvement ($2\pi f$) en rad/s.
- F : Fréquence du mouvement en Hz.
- φ : Phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps.
- N : Le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).
- d_m : Le diamètre primitif.
- d_b : Le diamètre des éléments roulants.
- m : Nombre des vecteurs supports
- α : Angle de contact.
- f_{bi} : Fréquence de défaut de la bague intérieure.
- f_{be} : Fréquence de défaut de la bague extérieure.
- f_b : Fréquence de défaut de la bille
- f_{rot} : Fréquence de rotation de la bague intérieure.
- f_{ext} : Fréquence de rotation de la bague extérieure.
- f_{ca} : Fréquence de défaut de la cage.
- N : Le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).
- d_m : Le diamètre primitif.
- d_b : Le diamètre des éléments roulants.
- $s(f)$: la transformée de Fourier du signal
- $S(k)$: la transformée de Fourier discrète,
- $s(t)$: un signal
- $\hat{s}(t)$: Le signal analytique
- $t/n_e = t_e$: la période d'échantillonnage du signal temporel,

LISTE DES ABREVIATIONS ET NOTATIONS

- f_e** : Fréquence d'échantillonnage
- f_r** : Fréquence de rotation
- M** : Nombre d'observations
- K** : représente la fréquence la plus haute, étant égale à la fréquence de coupure du signal
- g** : glissante
- $\bar{f}(u)$** : est le complexe conjugué de $f(u)$.
- W** : Matrice de transformation
- f_e** : Fréquence d'échantillonnage

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Depuis une vingtaine d'années, l'activité de maintenance des installations industrielles fait appel à des techniques de diagnostic de plus en plus sophistiquées. Plusieurs techniques de détection de défauts sont aujourd'hui à la disposition des ingénieurs de maintenance. La maintenance préventive conditionnelle est la plus utilisable dans les différents organismes industriels car sa surveillance et son suivi ne nécessitent pas l'arrêt de production.

Les machines tournantes (ventilateurs industriels, pompes centrifuges, moteurs électriques, réducteurs de vitesse ...) font partie intégrante et indissociable de l'industrie moderne. Leur rôle est généralement de transformer une énergie (électrique, thermique, pneumatique) en un mouvement (rotation ou translation) qui est utile à un mécanisme. Bien que leurs fins soient différentes en fonction du domaine d'application, certains composants mécaniques sont communs à la plupart des machines tournantes. Les arbres transmettent le mouvement de rotation aux différents sous-systèmes qui composent le mécanisme. Ces derniers sont généralement supportés par des roulements qui peuvent être à billes, à rouleaux, à contact obliques, etc. Enfin, les transformations de puissance et de vitesse sont généralement gérées par un ou plusieurs engrenages.

Dans ce contexte, Pour réaliser un bon diagnostic il y a plusieurs sources d'information qui ont été explorées et expérimentées dans le passé, avec plus ou moins d'efficacité. Parmi lesquelles nous pouvons citer, l'analyse d'huile, l'analyse de température, l'émission acoustique et l'analyse vibratoire avec une plus grande intensité.

Parmi les outils de la maintenance conditionnelle, l'analyse vibratoire occupe une place prépondérante dans le dépistage et le diagnostic de défauts des machines tournantes. 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'objectif de notre travail est l'application d'une méthodologie d'analyse vibratoire dans le cadre de la maintenance préventive en utilisant des méthodes de suivi et du diagnostic des différents défauts id fan se résumant par l'application de l'analyse au niveau global et l'analyse spectrale

Cette étude est divisée en 3 parties :

Nous l'entamons par l'introduction générale qui présente le contexte général, la problématique, les objectifs et la démarche à suivre. Cette introduction est précédée par un résumé du projet traduit en langues arabe et anglaise.

En ce qui est du premier chapitre, dans la première partie on a défini la maintenance et leur objectives puis on a cité détaillé les différentes type de maintenance et leur technique, pour la deuxième partie on évoques notions générales sur les vibrations et les outils de surveillance et diagnostique par l'analyse vibratoire, où est défini le moyens de mesure.

Le deuxième chapitre, on a parler sur les principaux défauts des roulements et les fréquences caractéristiques des défauts.

les techniques de traitement de signal appliqué par l'analyse vibratoire vas traiter dans le troisième chapitre.

Quant à la partie pratique l'équipement choisi comme sujet pour l'étude en question présentait quelques anomalies qui ont été observées et interprétées en utilisant l'analyse spectrale et la méthode d'enveloppe comme outils de diagnostic.

CHAPTER I

GENERALITES SUR LA

MAINTENANCE ET L'ANALYSE

VIBRATOIRE

I.1 Introduction :

Une méthode de surveillance perfectionnée a une importance vitale pour assurer une maintenance optimale des machines , permettant fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable et détecter l'apparition et l'évolution de la plupart des défauts mécaniques afin d'éviter les arrêts de production non planifiés les méthodes de surveillance disponible et proposées pour la détection des défauts et le diagnostic ,l'analyse vibratoire est la méthode la plus répandue due a sa indispensabilité a tout service de maintenance pour assurer une surveillance efficace.

Dans ce chapitre, une approche de maintenance et quelques notions de base utilisés dans le domaine de la surveillance des machines tournantes sont présentées. Par la suite, un rappel sur l'analyse vibratoire des machines tournantes est décrit.

I.2 La maintenance:

I.2.1 Introduction:

Maintenance en fonction de soutien dans les systèmes de production a été évaluée comme un rôle critique et même une condition préalable [1]. Ceci, bien sûr, implique également que la maintenance doit être effectuée de manière efficace, en d'autres termes, l'action de maintenance correcte doit être prise au bon moment. Un entretien inadéquat, d'autre part, peut entraîner une augmentation des coûts pour les raisons suivantes [2]:

- La perte de production.
- Ré usinage.
- Ferraille.
- La main d'œuvre.
- Pièces de rechange
- Amendes pour les commandes en retard.
- Les commandes perdues en raison de clients insatisfaits.

I.2.2 Définition et objectif de la maintenance :

L'objectif principal de la maintenance devrait être d'assurer le fonctionnement du système d'équipements de production. En outre, l'entretien devrait fournir les bons paramètres

: Coût, fiabilité, maintenabilité et la productivité, pour tout système de fabrication automatisé. Coetzee (2004) partage cette opinion sur l'objectif de l'entretien, indiquant que : « Il est la tâche de la fonction de maintenance pour soutenir le processus de production avec des niveaux adéquats de disponibilité, de fiabilité et de fonctionnement à un coût acceptable ». Diverses approches pour effectuer l'entretien existent. En outre, diverses définitions de l'entretien ont été proposées au fil des années, le point commun étant qu'ils se sont éloignés de la perception traditionnelle de l'entretien pour réparer les objets cassés. L'entretien selon l'ISO est défini comme : « La combinaison de toutes les actions techniques, administratives et organisationnelles au cours du cycle de vie d'un actif, lui permettant de conserver ou de récupérer un état de fonctionnement spécifié » [2].

I.2.3 Les types de maintenance :

En se concentrant sur « ... la conserver, ou restaurer à ... » dans la définition de l'entretien, il devient évident que l'on peut effectuer l'entretien en deux types principaux : la maintenance corrective et la maintenance préventive (voir **Figure I.1**). Les deux types d'entretien traditionnels sont largement utilisés dans pratiquement tous les secteurs industriels [1].

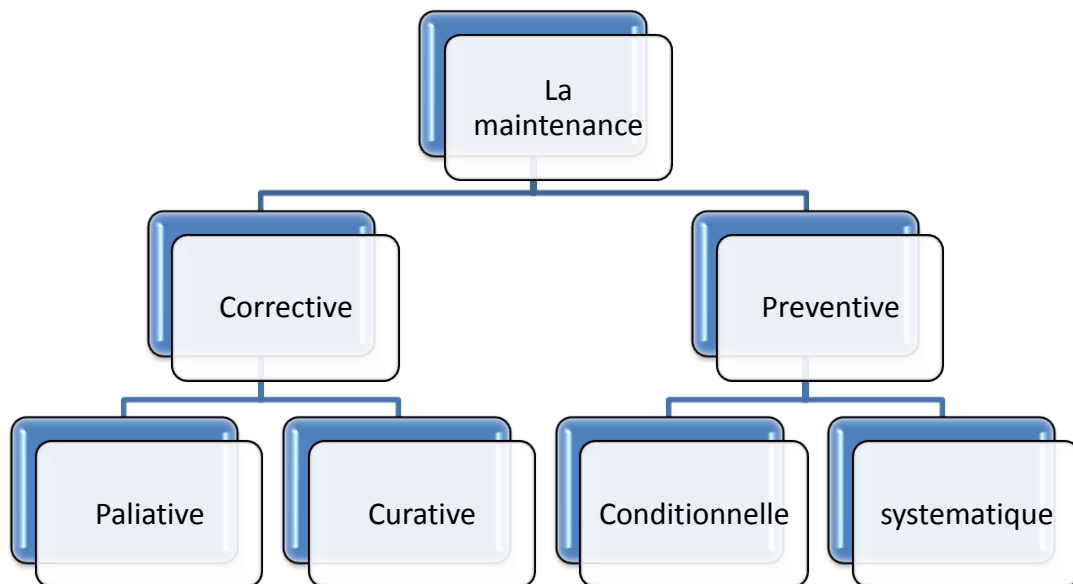


Figure I.1: vue d'ensemble des différents types de maintenance.

I.2.3.1 La maintenance corrective :

Semblable à des travaux de réparation, est entreprise après une panne ou lorsque la défaillance évidente a été localisé. Selon la norme (SS-EN 13306), la maintenance corrective est définie comme suit : « Entretien effectué après la reconnaissance de la faute et destiné à mettre un élément dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. ». Pour les travaux de réparation, certaines approches de modélisation sont disponibles. Avec la réparation minimale, l'élément défaillant n'est restauré à son état de fonctionnement et l'élément continue comme si rien est arrivé. La probabilité d'une défaillance (le taux d'échec) reste le même qu'il était juste avant l'échec. En utilisant l'approche de réparation minimale signifie que l'élément n'est rendu à un « aussi mauvais que vieux » condition [3].

La réparation minimale peut être exécutée pour diverses raisons, comme le manque de temps, les pièces de rechange, la compétence, etc. Si l'article est à la place remplacée par un nouveau composant du même type, ou si elle est restaurée à un état « aussi bon que neuf », le taux d'échec diminue au niveau du moment où l'élément vient d'être mis en service. On appelle cela un processus de renouvellement ou parfois une réparation maximale. Ces types de réparations sont les extrêmes de travail de réparation [3]. En conséquence, la plupart des actions de réparation sont situées quelque part entre les deux, et sont souvent appelés réparation imparfaite [4].

En cas de panne sur les fonctions critiques, la maintenance corrective doit être effectuée immédiatement. Cependant, pour les échecs qui ont pas ou peu de conséquences sur le fonctionnement du système complet, la maintenance peut être différée dans le temps à une occasion mieux adaptée. Cependant, signifie que la maintenance corrective à son meilleur ne doit être utilisé que sur les zones non critiques où les coûts d'investissement sont faibles, les conséquences de l'échec sont faibles, aucun risque de sécurité sont immédiats, et l'identification de l'échec rapide et réparation d'une défaillance rapide sont possibles, signifie également que les entreprises par défaut adoptent souvent la maintenance corrective inappropriée, ce qui à long terme peut devenir coûteux. La maintenance corrective est parfois appelée : l'entretien routier [1], l'entretien entraîné l'échec, l'entretien à base d'échec, et la gestion à l'échec d'entretien [1] [2].

I.2.3.2 La maintenance préventive :

Selon la norme (SS-FR 13306), la maintenance préventive a été définie comme : « Maintenance effectuée à des intervalles prédéterminés ou en fonction de critères prescrits et destiné à réduire la probabilité de défaillance ou de la dégradation du fonctionnement d'un élément. ». La maintenance préventive est divisée en deux types, maintenance systématique et maintenance conditionnelle. Maintenance systématique est planifiée et organisé sans l'apparition de toutes les activités de surveillance. La programmation peut être basée sur le nombre d'heures d'utilisation, le nombre de fois qu'un élément a été utilisé ; le nombre de kilomètres les articles a été utilisés, selon les dates prescrites, et ainsi de suite.

L'entretien est mieux adapté systématique à un élément qui a un âge visible ou USURE caractéristique et où les tâches de maintenance peuvent être effectuées à un moment qui est sûr empêchera un échec de se produire [1].

L'autre type d'entretien préventif, maintenance conditionnelle, n'utilise pas des intervalles prédéterminés et des calendriers. Il surveille plutôt l'état des articles afin de décider d'un calendrier dynamique de prévention.

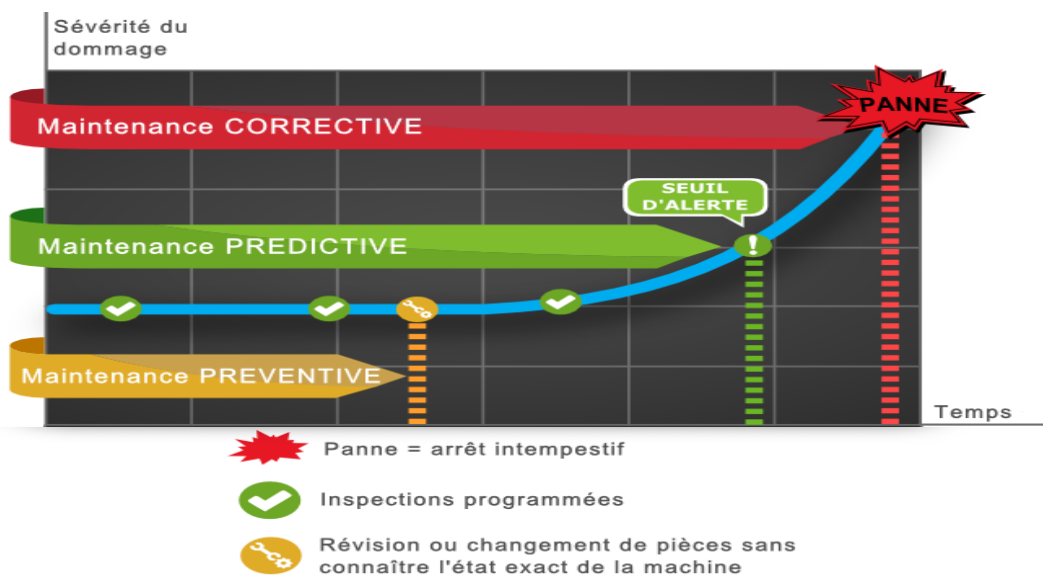


Figure I.2: diagramme représentative de déviations de maintenances.

I.3 Techniques de surveillance :

La mise en place d'un plan de maintenance est basée sur la surveillance de l'état de l'équipement, qui est une méthode générale pour établir la santé d'une machine à l'aide des paramètres mesurés qui reflètent les changements dans l'état mécanique de la machine [5]. Il est donc nécessaire de préciser les caractéristiques des différentes techniques de surveillance d'état pour sélectionner technique appropriée (s) pour chaque pièce d'équipement.

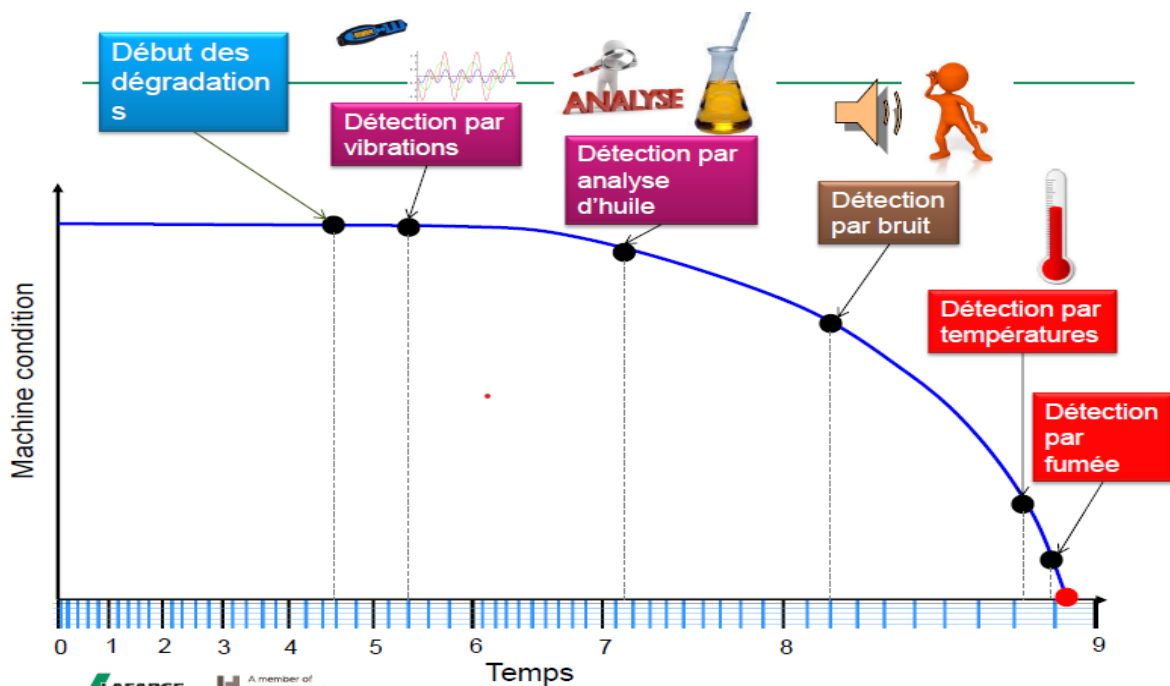


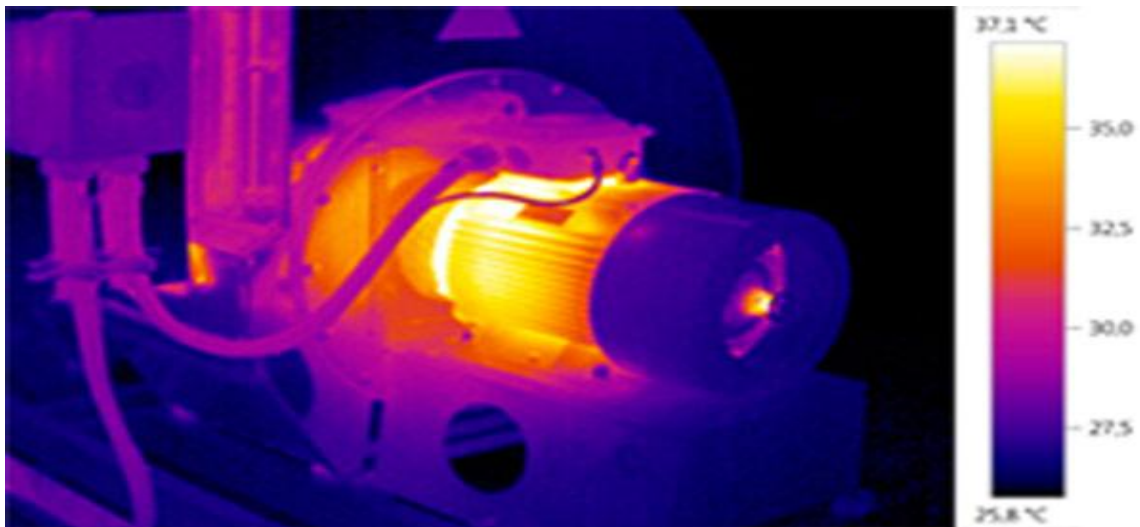
Figure I.3 : les vibrations et les modes de détections.

I.3.1 Analyse La thermographie infrarouge(IR) :

La thermographie infrarouge est la technique qui utilise des instruments spécialisés pour surveiller l'énergie infrarouge émis par la machine afin de déterminer son état de fonctionnement. Il est basé sur le fait que tous les objets avec la température au-dessus du zéro absolu émettent de l'énergie électromagnétique. Une partie de ce spectre - bande infrarouge qui est de l'ordre de 1 à 14 microns et hors de portée de l'œil humain - est utilisé par thermographie. IR instrument utilise un système de lentilles optiques pour recueillir l'énergie invisible rayonnée par un objet et de le focaliser sur le détecteur infrarouge. L'énergie est ensuite convertie en un signal électronique amplifié et en outre à un écran image ou numérique qui est lisible et compréhensible.

La thermographie aujourd'hui a développé un instrument relativement mature - thermomètre infrarouge, qui est divisé en thermomètre spot et de l'imagerie infrarouge. Le thermomètre Spot ne peut mesurer la température à un seul point sur une machine, alors que l'imagerie infrarouge permet l'exposition de température fullcolor de la zone plus large.

Thermographie a été utilisé dans une quantité d'industries telles que l'électricité et l'électronique, l'automobile, l'aviation, le verre, le plastique, la chimie, la métallurgie, etc [2].



(a) Image visible d'un disjoncteur électrique.

(b) Visualisation d'un défaut de connexion sur l'image thermique.

Figure I.4: principe de l'analyse thermographique.

I.3.2 Analyse de tribologie et de l'huile :

Tribologie est le terme générique qui fait référence à la conception et à la dynamique de fonctionnement de la structure de support roulement-lubrification-rotor des machines [6]. Comme une technique efficace de diagnostiquer les défauts précoces, l'application de la tribologie remonte au début des années 1940, où il a d'abord été utilisé par une compagnie de chemin de fer aux États-Unis. Dans les années 1980, la tribologie a été utilisée dans une variété d'industries et il se classe seulement en second lieu à la surveillance des vibrations.

Le principe de la tribologie est que, dans une machine en marche, il y a des interactions physiques ou chimiques continus entre les composants - par exemple la force entre deux roues dentées tournantes, ou la réaction entre les éléments de l'eau et les parties métalliques dans le cas

d'une pompe - qui donnent lieu à l'abrasion des composants de l'équipement. En adoptant cette technique, les caractéristiques suivantes de débris d'usure peuvent être déterminées et donc des travaux d'entretien effectués pour réduire l'échec possible [5]:

- Les quantités impliquent le degré d'usure.
- La morphologie indique les différents processus d'usure, tels que l'usure adhésive, usure par abrasion, cavitation, usure corrosive, usure de coupe, etc.
- Distribution de taille démontre le changement dans les activités d'usure.
- Composition des particules montre les sources possibles d'usure.

L'identification et l'analyse des débris d'usure peuvent identifier le type d'usure et aussi d'identifier la source [7], ce qui pourrait être un composant en détresse. Par rapport à l'analyse des vibrations, l'analyse des lubrifiants présente des avantages suivants [5]:

- Seule la machine malsaine contribue des quantités excessives de débris.
- Chemin de débris provenant de la source au point d'échantillonnage est beaucoup plus clair que celle du signal de vibration.
- La composante d'un signal de vibration causé par un défaut peut facilement être masquée par la vaste gamme de grands composants issus de composants de la machine en parfaite santé.

I.3.3 Surveillance des vibrations :

Une vibration est un mouvement périodique ou une qui se répète après un certain intervalle de temps [8]. Le plus simple de mouvement périodique est une fonction harmonique. Cependant, lorsque plusieurs sources de vibrations harmoniques agissent ensemble, la courbe totale tend à être non harmonieuse, comme le montre la **Figure I.5**. Normalement, il y a plus d'un facteur qui influe sur la détermination du profil de vibrations d'une machine ou d'un composant. Par exemple, la signature de vibration d'un arbre de la pompe peut se composer d'un mauvais alignement, déséquilibre, desserrement, défauts de roulement, la résonance, les problèmes d'installation des fondations, etc. Par conséquent, il peut être difficile de distinguer toutes les sources de vibration dans ces courbes non-harmoniques.

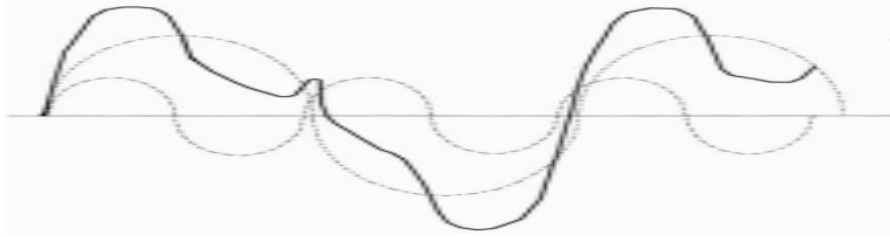


Figure I.5: au total (non harmoniques) courbes de vibration dans le domaine temporel [8].

Sur la base de la théorie de la transformée de Fourier tout en se basant sur le développement de la technologie informatique, cependant, de telles courbes de vibration dans le domaine temporel peuvent être transformées en une série de fonctions sinus / cosinus standard (**Figure I.6**) et en outre graph-domaine fréquentiel par transformée de Fourier rapide (FFT) par des instruments sophistiqués. Compte tenu du fait que chaque signal de vibration a son amplitude unique et la fréquence, il est relativement facile de reconnaître les sources de vibration en comparant les informations contenues dans le graphique des données caractéristiques des différentes forces.

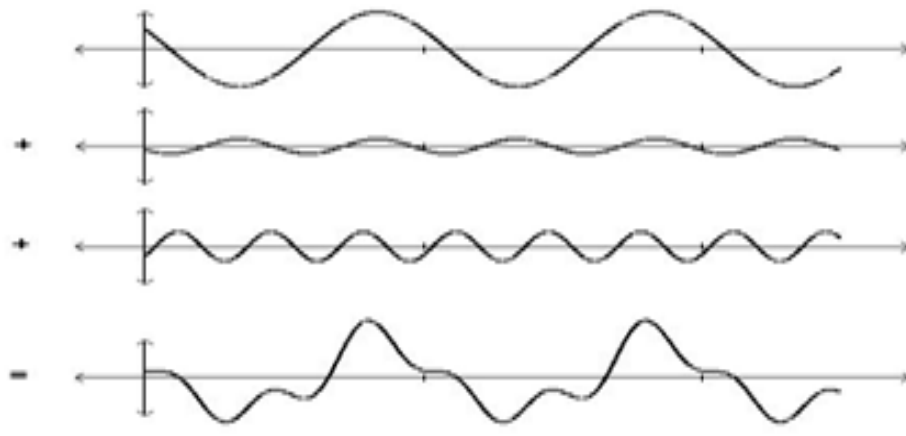


Figure I.6: indication graphique de la théorie de la transformée de Fourier [5].

La raison pour laquelle l'analyse des vibrations est largement employée est basée sur les faits suivants, qui décrivent la base des approches utilisées pour détecter et quantifier les causes profondes de l'échec [8] :

- Tous les problèmes de machines communes ont des caractéristiques de fréquence de vibration respectives qui peuvent être identifiés.
- Des signaux de vibration affichés dans le domaine des fréquences sont constitués de pics discrets représentant les différentes sources de vibrations.

I.4 Vibration :

I.4.1 Définition d'une vibration :

Selon la norme NFE 90-001 [9]: Une Vibration est une variation avec le temps d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique lorsque la grandeur est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence.

Le mouvement Vibratoire le plus simple à étudier est celui traduisant le déplacement d'un point(A) situé sur un cercle et tournant à une vitesse de rotation (ω) (**Figure I.7**).

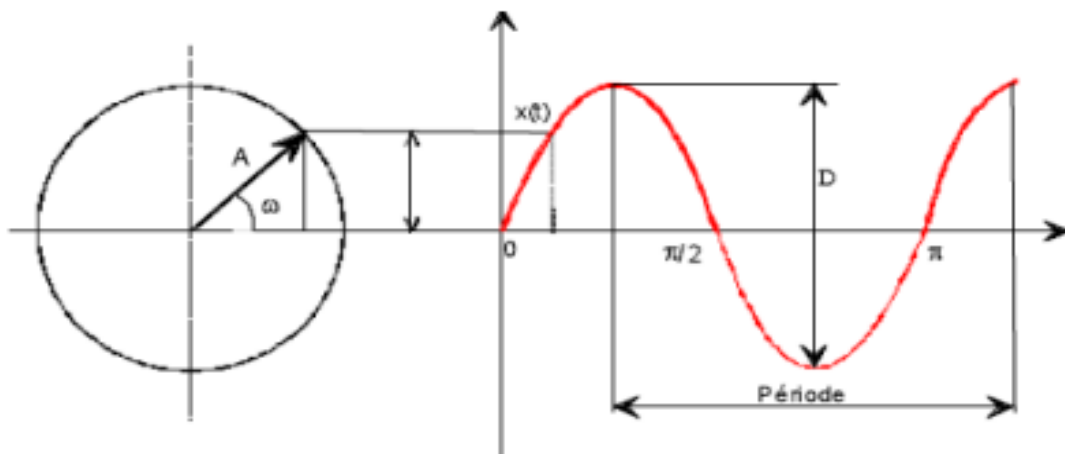


Figure I.7 : représentation d'une vibration.

La rotation de A entraîne une variation sinusoïdale de sa projection X qui répond à la relation (I.1) :

$$X(t) = A \sin(\omega t) \quad (\text{I.1})$$

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque l'unité choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz. Une Vibration qui se produira 50 fois par seconde aura une fréquence de 50 hertz. [10](1 hertz= 1 cycle/1 seconde). La période T du signal correspond à la durée d'un cycle. Si la fréquence d'un phénomène est

de 50 hertz, c'est à dire 50 cycles par seconde, la durée d'un cycle (c'est à dire la période T) est de $1/50^{\circ}$ de seconde La fréquence est donc l'inverse de la période : $F=1/T$.

Le signal Vibratoire obtenu précédemment est une sinusoïde de période T.

La période T est fonction de la Vitesse de rotation : plus on tourne vite (ω) grand et plus la période sera petite, donc plus la fréquence sera grande. Donc il existe un lien entre la fréquence la vitesse de rotation : $\omega=2\pi f$ et $f=N/60$ avec ω en rad/s f en Hz et N en (1 tr/min).

Sur les machines tournantes industrielles, on utilise souvent le tour par minute pour exprimer une vitesse de rotation, parfois noté CPM (cycle par minute) ou RPM (rotation par minute).

I.4.2 Les différentes formes de vibrations :

On classe les vibrations d'après l'évolution de la variable considérée dans le temps (périodicité).

On distingue ainsi les vibrations :

- 1- Harmoniques
- 2- Périodiques
- 3- Apériodiques

I.4.2.1 Vibrations harmoniques :

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.8**) [11].

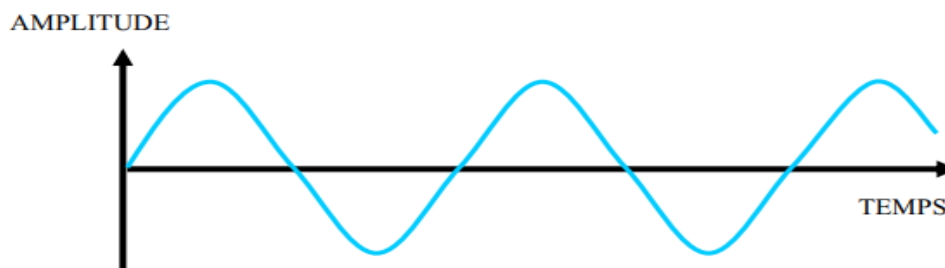


Figure I.8: vibration harmonique.

Elle est décrite par l'équation (I.2) :

$$X(t) = X \sin(\omega t + \varphi) \quad (I.2)[12]$$

Avec :

ω : Fréquence angulaire ou pulsation du mouvement ($2\pi f$) en rad/s.

F : Fréquence du mouvement en Hz.

φ : Phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps.

I.4.2.2 Vibrations périodiques :

Une vibration périodique est telle qu'elle se reproduit exactement après un certain temps appelé période. Une telle vibration est créée par une excitation elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines .Une Vibration périodique est la composée de plusieurs Vibrations harmoniques (**Figure I.9**).

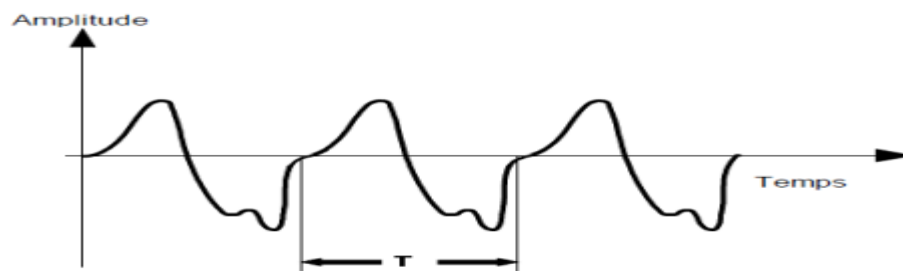


Figure I.9: vibration périodique [13].

Elle est décrite par l'équation (I.3) :

$$v(t) = \sum_{i=1}^{\infty} v_i \times \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (I.3)$$

I.4.2.3 Vibration apériodique :

Une vibration apériodique est telle que son comportement temporel est quelconque [14], c'est-à-dire que l'on n'observe jamais de reproductibilité dans le temps (**Figure I.10**).



Figure I.10: vibration aperiodique.

Elle est décrite par l'équation :

$$v(t) = \sum_{i=1}^{\infty} X_i \times \sin(\omega_i \cdot t + \phi_i) \quad (I.4)$$

I.5 Origine des vibrations :

L'analyse Vibratoire est utilisée en maintenance préventive conditionnelle pour la surveillance des machines tournantes [15]. Les machines tournantes (**Figure I.11**) sont des systèmes dans lesquels peut se distinguer :

- ✓Un rotor.
- ✓Une structure.
- ✓Des liaisons.

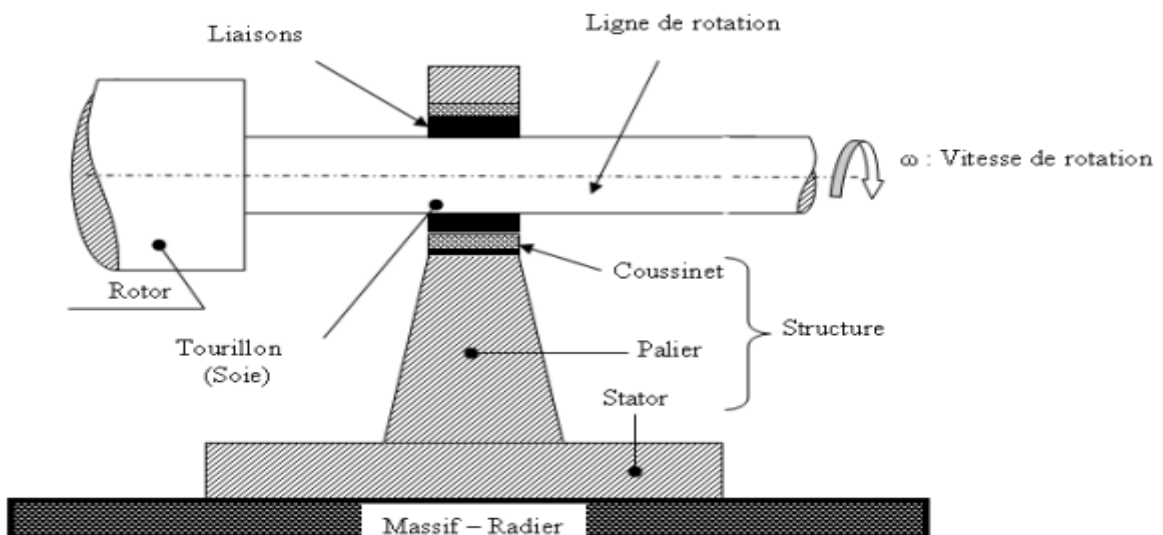


Figure I.11: origine des vibrations sur les machines tournantes.

Le rotor tourne autour d'une de rotation par l'intermédiaire de liaison ayant pour support la structure de la machine. La rotation de rotor engendre des forces qui dépendent de l'état des machines. Ces efforts vont se répercuter sur tous les éléments de la machine. Des vibrations vont être créées si ces efforts rencontrent une mobilité (un jeu ou un élément peu rigide) une vibration peut donc être vue comme dans la **Figure I.12** [10] :

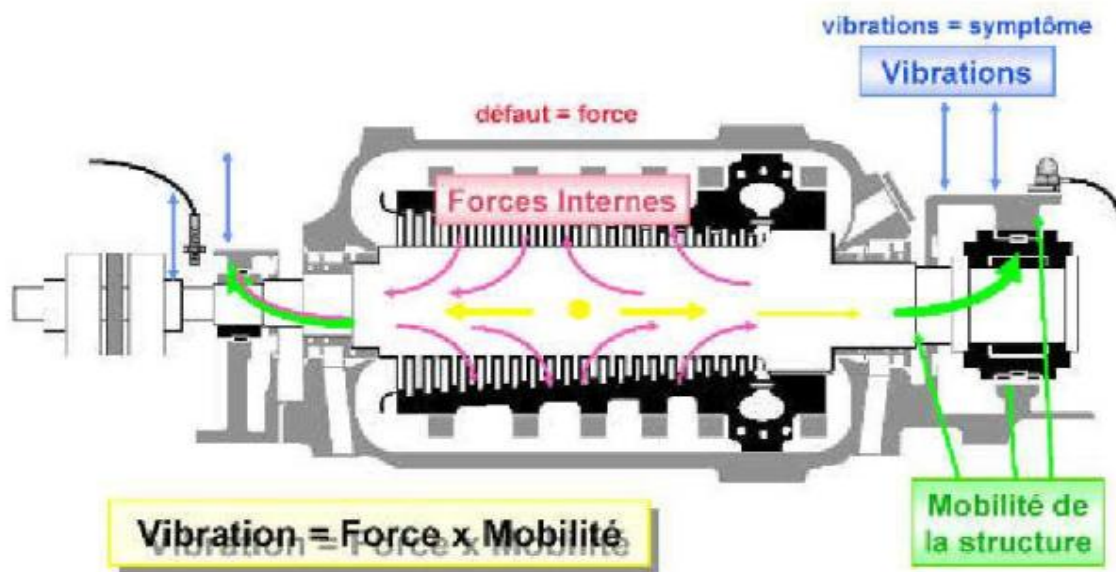


Figure I.12: effort rencontrent une mobilité.

I.6 L'analyse vibratoire en tant qu'outil de diagnostic :

Il est important de savoir comment naissent et d'où proviennent les dérèglages, dysfonctionnements ou pannes sur une installation. Un des moyens pour y parvenir consiste à analyser la signature vibratoire qui en sort. On fait ici l'hypothèse implicite selon laquelle les vibrations sont l'image du comportement dynamique de tout organe mécanique de la machine. L'utilisation de l'analyse des signaux vibratoires comme méthode de diagnostic remonte aux années 1960. Depuis, on y fait largement appel dans la plupart des installations industrielles, particulièrement dans la prévention des pannes mécaniques. Au début, l'analyse fut fondée autour des représentations de la variation temporelle de l'amplitude des vibrations, appelées signatures vibratoires, essentiellement à base de comparaisons.

Pour cela, des techniques analytiques ont été utilisées. Cependant, des lacunes et autres désaccords sont vite apparus lors d'applications sur différents types de machines. Les

limites résident au niveau de l'instrumentation disponible et de l'aptitude effective à identifier des défauts sur un matériel en fonctionnement [2].

- **Chaîne de mesure :**

L'appareillage destiné à la mesure vibratoire se compose principalement de 3 éléments : capteurs, conditionneurs, appareil de mesure.

- **Le capteur :**

C'est un instrument qui convertit une variable d'état, un phénomène physique mesuré en un point d'un système, en un signal électrique adapté au traitement et à l'analyse par la chaîne de mesure. Le capteur, sous l'effet de la vibration, délivre un signal proportionnel au mouvement. Les capteurs vibratoires permettent la mesure d'accélération, de vitesse ou de déplacement vibratoire. Ces unités sont mesurées soit directement, soit a posteriori par intégrations ou dérivations successives. Chaque type de capteur présente des spécificités mécaniques et électriques qui le prédisposent à un domaine d'application particulier : gamme dynamique et fréquentielle, sensibilité, impédance, mesure relative ou absolue [2].

- **L'accéléromètre :** Mesure de l'accélération vibratoire absolue.

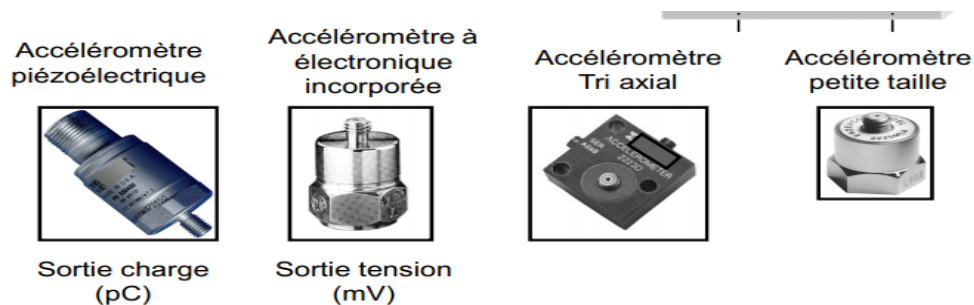


Figure I.13: exemple des accéléromètres.

➤ **Principe :**

Le cisaillement par la masse sismique de l'élément piézoélectrique produit des contraintes mécaniques sur ce dernier qui se manifestent par l'apparition de charges électriques [1].

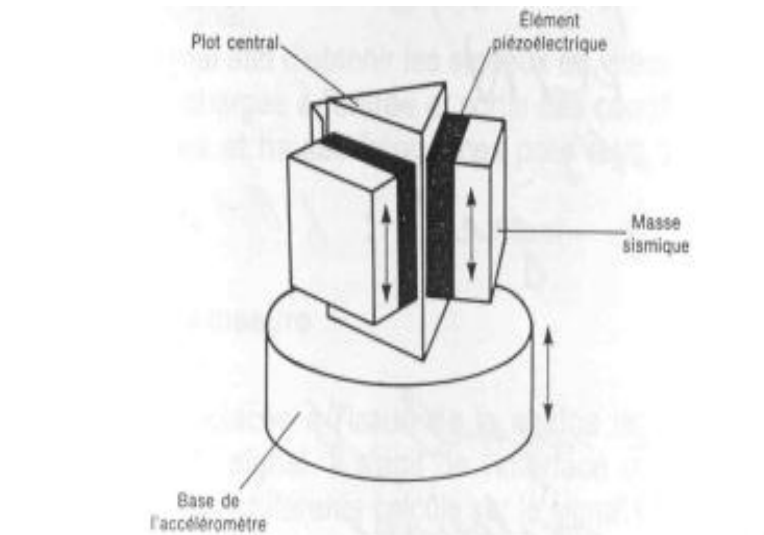


Figure I.14: les composants d'un accéléromètre.

➤ **Caractéristiques générales :**

- Larges gammes dynamiques et fréquentielles.
- Résistance aux chocs par amortissement visqueux.
- Nécessite d'utiliser un conditionneur (interne ou externe) pour transformer les charges électriques en tension.
- Directivité de la mesure.
- **La vélocimétre :** Mesure de la vitesse absolue du palier



Figure I.15: vélocimétre.

➤ **Principe :**

Le mouvement du noyau génère un signal en tension (V) dans la bobine (f.é.m.)

➤ **Caractéristiques générales :**

- Faible impédance.
- Gamme dynamique et fréquentielle limitées.
- Sensible aux champs magnétiques.
- Directivité de la mesure.
- Signal délivré sous forme de tension électrique directement utilisable [2].

- **La sonde de proximité :**



Figure I.16: capteur de proximité.

➤ **Principe :** Le mouvement de l'arbre crée une variation du champ magnétique et des courants induits dans la ou les bobines situées au bout de la sonde.

➤ **Caractéristiques générales :**

- Réponse aux déplacements statiques.
 - Mesures sans contact.
 - Gamme fréquentielle limitée en hautes fréquences.
 - La surface vibrante doit être ferromagnétique.
 - Bruit de fond dû à la qualité de l'état de surface de la cible [2].
- **La mesure Laser :** Mesure de la vitesse relative de la cible.



Figure I.17: la mesure laser.

➤ **Principe :** Le mouvement de la cible est mesuré en vitesse par effet Doppler à l'aide du faisceau Laser. Ce phénomène est traduit en tension par la chaîne de mesures.

➤ **Caractéristiques générales :**

- Mesures sans contact à longue distance.
- Large gamme dynamique et fréquentielle.
- Technologie en plein essor [2].



Figure I.18: conditionneur.

• **Le conditionneur :**

Il est l'interface électronique permettant l'exploitation du signal du capteur par un appareil de mesure. Pour les capteurs piézo-électriques, ce sont des préamplificateurs de charge délivrant une tension proportionnelle à la charge générée par le capteur.

Les conditionneurs peuvent amplifier, atténuer, intégrer, filtrer et indiquer les saturations. Il [2]:

- Transforme le signal du capteur en tension.
- Traite le signal : gain, filtrage, intégration, sensibilité.

- **Appareils de mesure :**

Les appareils de mesure placés en fin de chaîne de mesure permettent le traitement puis l'analyse du signal. C'est à partir de cet élément que les différents traitements du signal vibratoire seront effectués en vue de l'analyse. On distingue 3 types d'appareils de mesures : l'analyseur FFT, le collecteur et le mesureur de niveau global.



Figure I.19: exemples des appareils de mesure.

- L'analyseur FFT permet une grande souplesse d'utilisation sur site et se trouve parfaitement adapté à une expertise de deuxième niveau.
- Le collecteur reste plus figé dans les mesures et nécessite une liaison avec un PC pour programmer et organiser une ronde de mesure. Cet appareil est adapté au suivi de premier niveau.
- Le mesureur de niveau global donne des valeurs qui peuvent être intégrées dans un suivi et permet de détecter les évolutions mais n'indique pas l'origine du défaut [2].



Figure I.20: exemple d'une chaîne de mesure.

I.7 Activités de l'analyse vibratoire :

I.7.1 La surveillance :

Le but est de suivre l'évolution d'une machine par comparaison des relevés successifs de ses vibrations. Une tendance à la hausse de certains indicateurs par rapport à des valeurs de référence constituant la signature alerte généralement le technicien ou l'ingénieur de maintenance, sur un dysfonctionnement probable. La signature est établie à partir d'une première campagne de mesures sur la machine neuve ou révisée. On distingue deux types de surveillance [16] : surveillance « Online », les mesures des indicateurs soit de manière continue, et soit d'une manière périodique qui est la surveillance « Offline ».

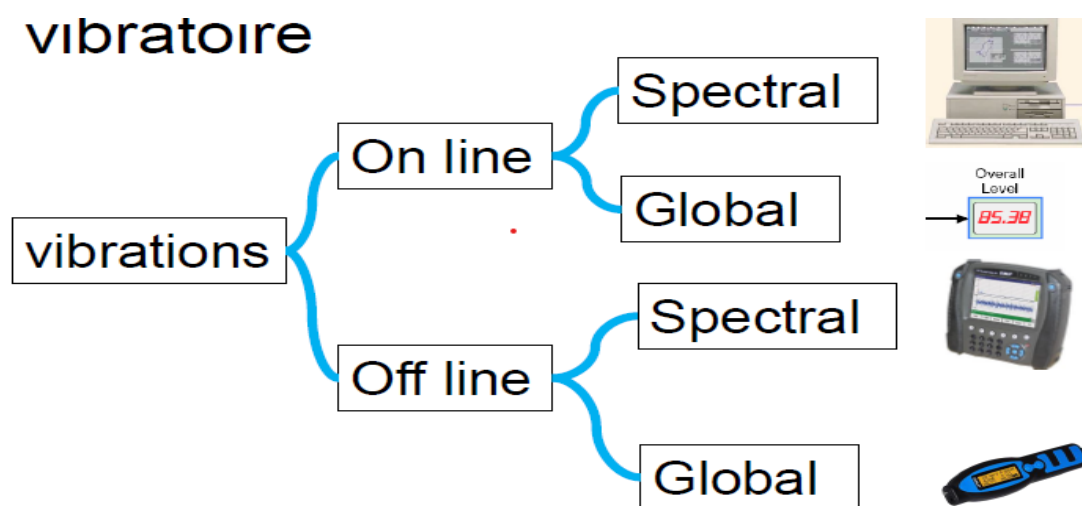


Figure I.21: les modes de surveillance.

I.7.2 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, amené à une simplification communément adaptée, qui consiste à considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale.

I.7.3 Le diagnostic :

Il permet de désigner l'élément de la machine défectueux suite à une évolution anormale des vibrations constatée lors de la surveillance (mesures). Le diagnostic n'est réalisé que lorsque la surveillance a permis de détecter une anomalie ou une évolution dangereuse du

signal vibratoire, **Figure I.21**. Le diagnostic dans la majorité des cas est établi en interprétant les signaux vibratoires émis par les machines en fonctionnement [2]. Il est important de savoir comment naissent et d'où proviennent les dérèglages, dysfonctionnements ou pannes sur une installation.

Un des moyens pour y parvenir consiste à analyser la signature vibratoire qui en sort. On fait ici l'hypothèse implicite selon laquelle les vibrations sont l'image du comportement dynamique de tout organe mécanique de la machine. L'utilisation de l'analyse des signaux vibratoires comme méthode de diagnostic remonte aux années 1960. Depuis, on y fait largement appel dans la plupart des installations industrielles, particulièrement dans la prévention des pannes mécaniques. Au début, l'analyse fut fondée autour des représentations de la variation temporelle de l'amplitude des vibrations, appelées signatures vibratoires, essentiellement à base de comparaisons. Pour cela, des techniques analytiques ont été utilisées. Cependant, des lacunes et autres désaccords sont vite apparus lors d'applications sur différents types de machines. Les limites résident au niveau de l'instrumentation disponible et de l'aptitude effective à identifier des défauts sur un matériel en fonctionnement.

I.8 Conclusion

L'analyse vibratoire d'aujourd'hui est un outil puissant dans un monde industriel qui recherche un maximum de productivité. Il s'agit de la méthode la plus robuste pour prévenir les défaillances mécaniques des défauts mécaniques et les détecter afin de traiter plus précisément. L'analyse vibratoire offre trois principaux niveaux d'analyse : la surveillance, le diagnostic et le suivi de l'endommagement.

De nombreux travaux de recherches se développent encore aujourd'hui autour de nouvelles techniques d'analyse vibratoire. Elles reposent souvent sur des méthodes de traitement avancées du signal. Ces techniques se sont également améliorées grâce à la connaissance du système mécanique en terme vibratoire.

Cette remarque nous amène au chapitre suivant qui propose application l'analyse vibratoire sur l'un des composants les plus importants des machines tournantes, les roulements.

CHAPITRE II
ETUDE THEORIQUE SUR LES
ROULEMENTS

II.1 Introduction :

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

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

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

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

II.2 Défauts des machines tournantes :

Il n'y a pas de bon diagnostic sans une bonne connaissance des défauts. C'est pourquoi, la première démarche d'une action de surveillance est de rechercher quels sont les incidents les plus fréquents sur les machines et comment ils se manifestent (qu'elle est leur signature). Comme son nom l'indique, l'analyse vibratoire utilise les vibrations émises par une machine. Ces vibrations permettent de détecter :

- L'importance du balourd.
- L'importance du désalignement.
- Les défauts de roulement.
- Les défauts d'engrenages.

II.2.1 Balourd :

Le balourd est la cause de vibrations la plus commun et la plus fréquemment rencontrée. Le balourd est un déséquilibre massique autour de l'axe de rotation qui provient généralement du défaut d'usinage, d'assemblage et de l'échauffement dissymétrique du rotor lors du fonctionnement, il est connu de certains automobilistes qui demandent un équilibrage après le changement des pneumatiques pour s'affranchir de l'éventuelle gêne qu'il occasionnerait.

On ne peut réaliser la concentricité parfaite d'un rotor. De cet état imparfait de la concentricité, en rotation, il en résulte des forces centrifuges f qui déforment le rotor et engendrent des déséquilibres. Par l'expression suivante on détermine la force centrifuge [17] :

$$F = mr\omega^2 \quad (\text{II.1})$$

Où m représente la masse qui balourd, r le rayon du rotor et ω la vitesse de rotation de l'arbre.

II.2.2 Le désalignement :

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements, il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe. L'arbre moteur et l'arbre récepteur d'une machine ne sont pas parfaitement alignés.

L'objectif du lignage de deux machines est de faire en sorte que les axes des deux lignes d'arbres soient parallèles et confondus. Deux types de défauts de lignage sont donc rencontrés :

a) Désalignement angulaire : il se produit quand l'axe de rotation de deux machines a un angle différent. Le désalignement angulaire se caractérise par une vibration axiale élevée.

b) Désalignement axial : il se produit quand les axes de rotation des deux machines ont le même angle d'orientation. Mais ils sont séparés verticalement, chacun de l'autre. Le désalignement axial (parallèle) se caractérise par une vibration radiale élevée [18].

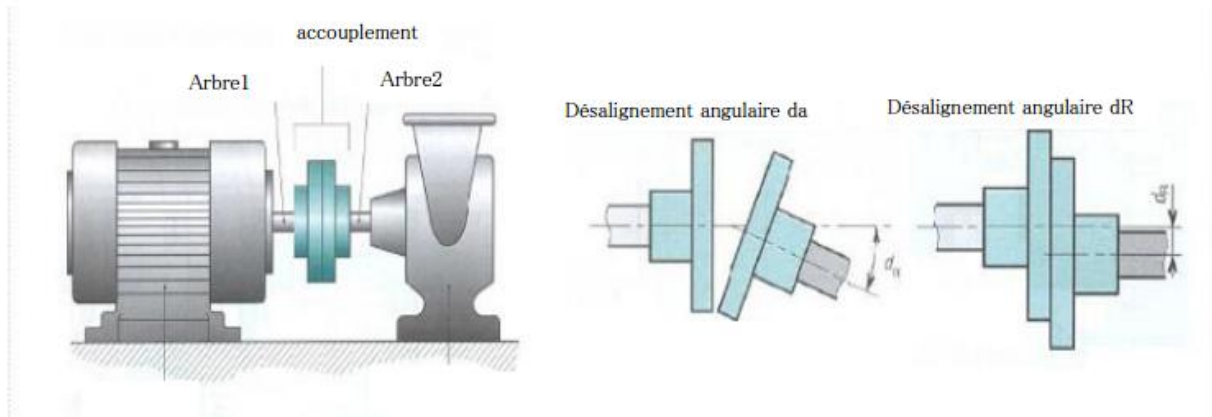


Figure II.1 : défauts désalignement [19].

II.2.3 Défauts des engrenages :

Nous pouvons utiliser les engrenages pour transmettre le mouvement et la puissance mécanique entre deux arbres parallèles ou non parallèles, concourants ou non concourants et

Perpendiculaires ou non perpendiculaires [19]. Ces défauts sont liés aux dégradations de la denture (denture cassée ou abimée, usure uniforme ou non, les piqûres (pitting) localisé ou réparti, mauvais centrage). On peut observer aussi la corrosion de contact (fretting) qui se traduit par un enlèvement de métal lorsque l'engrenage est lubrifié et que les efforts sont importants.



Figure I.2: piqûres [19].

II.3 Les roulements et leurs avaries :

Des roulements, il y en a partout... des pédales de vélos, les compresseurs ou les roues de véhicules...etc. 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.

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 [20].

II.3.1 Géométrie et constitution d'un roulement :

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

Le roulement sans glissement des éléments roulants sur les chemins (pistes) assure la transmission de la charge (l'énergie) d'une bague à une autre. Afin d'assurer un roulement parfait [19], il faut que les éléments roulants soient complètement séparés par une cage.

De manière générale, les roulements sont constitués de quatre composants essentiels [21]:

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



Figure I.3: différentes composantes d'un roulement [19].

II.3.1.1 La bague extérieure :

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

II.3.1.2 La bague intérieure :

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

II.3.1.3 La cage :

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

II.3.1.4 Les éléments roulants :

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

II.3.2 Différents types des roulements :

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

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

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

➤ Les roulements rigides à billes (à rouleaux cylindriques) : ce sont les roulements les plus répandus, ils sont conçus pour des charges radiales, mais peuvent supporter une petite

charge axiale. Les roulements à rouleaux peuvent supporter des charges plus élevées.

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

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

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

➤ Roulements à rotules sur billes (de même sur rouleaux) : Ce type de roulement est célèbre, inventé en 1907 par le fondateur de SKF Sven Wing quist, a permis de résoudre l'un des problèmes industriels les plus épineux de l'époque, celui des arrêts de production récurrents dus à des défaillances de roulements. Comme l'alignement des arbres n'était pas suffisamment précis pour permettre une utilisation normale des roulements rigides à billes, les pannes étaient fréquentes. Les roulements à rotule sur billes à deux rangées, qui tolèrent un défaut d'alignement pour une durée de service identique, ont permis de résoudre le problème [22].



Figure I.4: une variété de roulements [19].

II.3.3 Les facteurs essentiels pour le choix de type de roulement :

Le choix du type et de la taille d'un roulement est basé sur les conditions de fonctionnement et les caractéristiques de construction à fin d'assurer un bon fonctionnement à des coûts réduits [19]. Les facteurs qu'il faut tenir en considération pour réaliser un choix optimal de roulement sont les suivants :

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

II.4 Défauts des roulements :

II.4.1 Causes principales des défauts :

Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme:

- Contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable...
- Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides...
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement.
- Mauvais alignement du rotor.
- Courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques [23].

II.4.2 Origine des défauts de roulement :

✓ **Mauvaise lubrification:**

Le mauvais choix d'un lubrifiant où des quantités inadaptées de lubrifiant causent environ 36% des avaries de roulements. Une mauvaise lubrification réduite d'une manière significative la durée de vie d'un roulement et comme, bien souvent, un roulement est un composant mécanique difficile d'accès, cela engendre des arrêts de maintenance longs et donc coûteux.

✓ **Pollution:**

Un roulement est un composant mécanique de précision. Son bon fonctionnement risque d'être gravement compromis par la contamination des chemins de roulement et/ou du lubrifiant par des corps étrangers. On estime ainsi que 14% des défaillances de roulements sont dues à ce phénomène.

✓ **Mauvais montage :**

Environ 16% des avaries de roulements sont dues à un mauvais montage ou à l'utilisation d'outils inadaptés.

✓ **Fatigue:**

Les machines ne fonctionnent pas toujours dans des conditions optimales, loin s'en faut. Surcharges, entretiens insuffisants ou inadaptés sont responsables d'environ 34% des défaillances de roulements. Un roulement qui fonctionne dans des conditions de surcharge.

II.4.3 Principaux défauts :

Les roulements sont parmi les composants les plus critiques des machines et représentent une source de panne fréquente. On peut noter deux types des défauts caractéristiques de la détérioration des roulements : les défauts dits naturels dus à la fatigue des roulements et des défauts dus à un mauvais montage ou une mauvaise utilisation du roulement.

En associant les différentes techniques de contrôle, l'expérience du personnel de la maintenance ainsi que l'historique des machines. Nous pouvons identifier les types de détérioration des roulements de la manière suivante :

II.4.3.1 Le grippage :

Le grippage est un mode d'endommagement instantané. Les matériaux en contact se soudent sous pression et température généralement dans des conditions de vitesses moyennes et élevées. Il résulte d'un manque de lubrifiant ; les contacts métal-métal entraînent des

échauffements qui facilitent les microsoudures et le transfert de métal.

Donc, on peut dire que le grippage est un phénomène caractérisé par des micro - arrachements des particules métalliques.

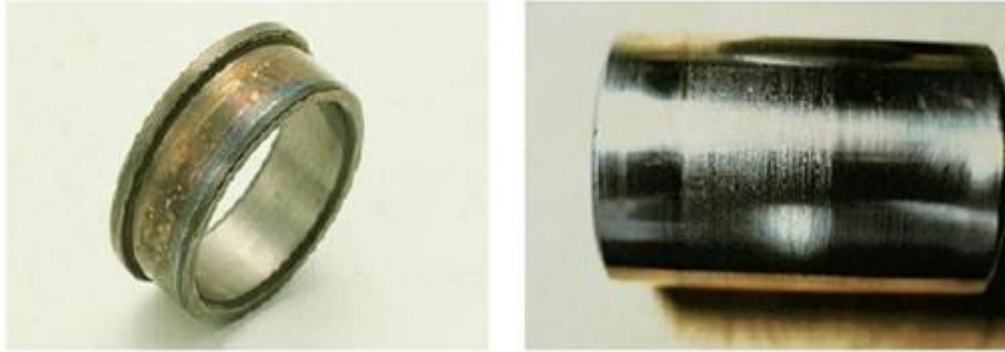


Figure I.5: grippage d'une bague [24].

II.4.3.2 La corrosion :

La corrosion chimique se produit par la présence de l'humidité aux points de contact des éléments roulants avec les chemins. Surtout quand les roulements viennent d'être nettoyés et sont contaminés par la transpiration des mains.

La corrosion de contact (fretting) apporte une pâte brune formée par la rouille et le lubrifiant. Une corrosion profonde entraîne la rupture des bagues. due au mauvais choix d'ajustements entre les bagues et les arbres.



Figure I.6: corrosion sur une piste de roulement [24].

II.4.3.3 Usure :

Usure par déformation : C'est une déformation plastique des chemins des roulements, causée par des chocs importants ou une vibration à haute fréquence. C'est une usure sans perte de matière (présence des empreintes) [25].

Usure par abrasion : L'usure par abrasion donne aux roulements une couche brillante, due au glissement des éléments roulants sur les pistes, et ce par le manque ou une mauvaise lubrification.

a. La fissuration des bagues :

C'est l'apparition de fissures et de petites cassures sur les éléments du roulement. Les coups lors du montage, le non-respect des portées de roulement (ajustement trop serré). Sont responsables sur ce type de détérioration, elle provoquée par une déformation plastique.

b. L'écaillage :

Le cas le plus rencontré est un défaut d'écaillage dû à la fatigue des roulements. Ce défaut survient sous l'effet de la fatigue due aux contraintes de cisaillement alternées qui sévissent en sous-couche. Le fonctionnement élastohydrodynamique (type de lubrification dépendant l'élasticité du matériau) crée, par dépassement de la limite d'élasticité, des microdéformations permanentes et des fissures qui se propagent vers la surface et conduisent [25].

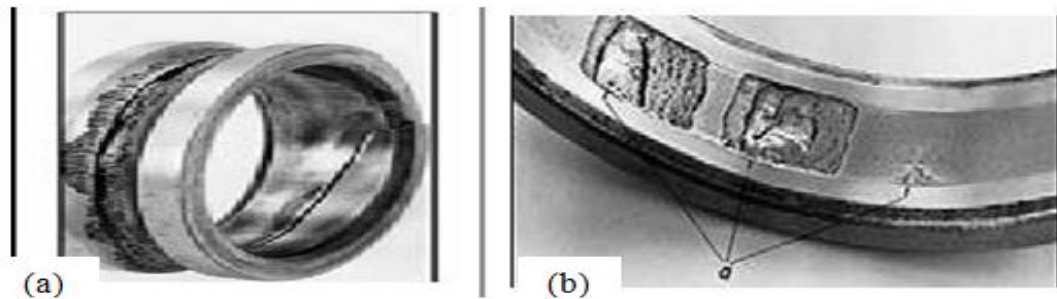


Figure I.7: écaillage par (a) fatigue et (b) superficiel de la bague interne [25].

II.5 Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement :

Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage) ; les avaries les plus fréquentes sur les roulements sont les défauts d'écaillage. Lors de la mise en rotation, un train d'impulsion est généré par ces défauts, à une fréquence bien définie que l'on appelle "fréquence caractéristique" de défaut du roulement. Ce signal périodique est l'origine de nombreuses méthodes de détection de défaut de roulement. Les fréquences caractéristiques sont déterminées à partir de la géométrie du roulement et de la cinématique de la machine étudiée [26].

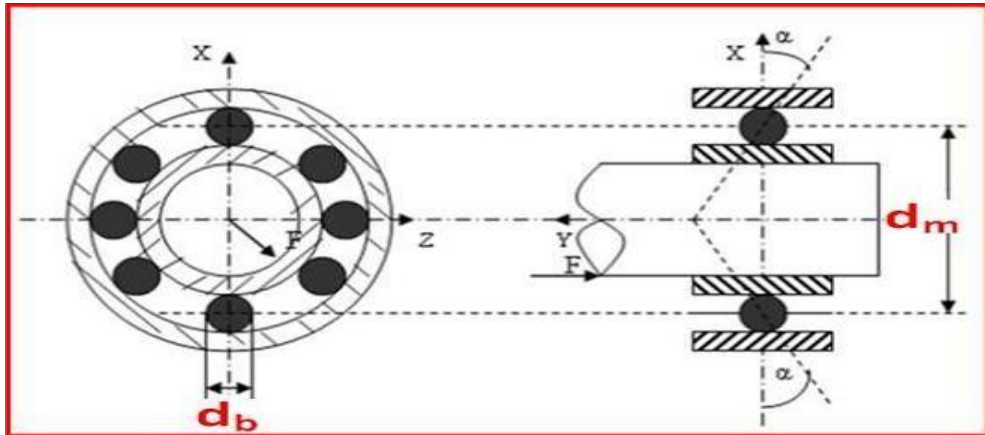


Figure I.8: caractéristiques d'un roulement.

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

d_m : Le diamètre primitif.

d_b : Le diamètre des éléments roulants.

α : Angle de contact.

1. Un défaut sur la bague extérieure générera un signal contenant des chocs espacés de la période de passage des billes sur la bague extérieure, la fréquence de ces chocs est appelée BPFO (Ball Passage Frequency Outer race).

$$\text{BPFO} = f_{\text{outer}} \text{ (HZ)} = \frac{n}{2f_r \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos \alpha\right)} \quad (\text{II.2})$$

f_r : est la vitesse de rotation.

2. La fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague intérieure, cette fréquence est BPFi (Ball Passage Frequency Inner race).

$$\text{BPFi} = f_{\text{inner}} \text{ (HZ)} = \frac{n}{2f_r \left(1 + \frac{d_b}{d_m} \cos \alpha\right)} \quad (\text{II.3})$$

3. Pour un défaut sur une bille, la vibration sera générée à deux fois la fréquence de rotation de la bille BSF (Ball Spin Frequency), puisque la bille sur un tour cognera sur la piste externe et interne :

$$\text{BSF} = f_{\text{ball}} \text{ (HZ)} = f_r \frac{d_m}{d_b} \left[1 - \left(\frac{d_b}{d_m} \cos \alpha\right)^2\right] \quad (\text{II.4})$$

Le calcul de ces fréquences caractéristiques nécessite une connaissance précise des

caractéristiques dimensionnelles du roulement.

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

II.5.1 Fréquence de défaut sur la bague intérieure :

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (II.5). Cette fréquence est modulée par sa fréquence de rotation de l'arbre (bandes latérales autour de la raie de défaut).

$$f_{bi} = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d_b}{d_m} \cos \alpha (f_{rot} - f_{ext}) \right) \quad (II.5)$$

Avec :

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

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

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

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

d_m : Le diamètre primitif.

d_b : Le diamètre des éléments roulants.

α : Angle de contact.

II.5.2 Fréquence de défaut sur la bague extérieure :

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (II.6). Bien que la charge appliquée sur la bague externe soit constante, on peut remarquer une modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre autour de la fréquence de défaut.

$$f_{be} = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos \alpha (f_{rot} - f_{ext}) \right) \quad (II.6)$$

Avec :

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

II.5.3 Fréquence de défaut sur la bague extérieure :

La fréquence de passage d'un défaut de cage est donnée par l'équation (II.7) Ce défaut se manifeste par la présence de raies à la fréquence et ses harmoniques.

$$f_{ca} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) \right) f_{rot} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) \right) f_{ext} \quad (II.7)$$

Avec :

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

II.5.4 Fréquence de défaut sur l'élément roulant :

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

$$f_b = \frac{1}{2} \frac{d_m}{d_b} \left(1 - \left(\frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) \right)^2 \right) (f_{rot} - f_{ext}) \quad (II.8)$$

Avec :

f_b : Fréquence de défaut de la bille [19].

II.6 Conclusion :

L'étude théorique des organes mécaniques des machines tournantes et leurs défauts permettent donner une idée sur les impacts des défauts présentés par les signaux à analyser.

Les roulements sont les éléments très répandus et sollicitent dans les machines tournantes mécaniques et sont la cause principale de leurs défaillances. Les défauts peuvent être provoqués par un grand nombre de facteurs. Parmi eux, ces facteurs l'emportent que la fatigue, l'usure, l'écaillage, la corrosion, le grippage, la déformation plastique et manque de la lubrification.

Dans ce chapitre, nous avons donné les différents défauts qui peuvent affecter les roulements, et on a mentionné les fréquences caractéristiques du chaque défaut.

Dans le chapitre suivant on verra un aperçu général sur les techniques de la surveillance pour ces machines tournantes basées sur les traitements et les méthodes les plus utilisés dans le domaine du traitement des signaux vibratoires.

CHAPITRE III

**LES TECHNIQUES DE
TRAITEMENT DE SIGNAL
APPLIQUE A L'ANALYSE
VIBRATOIRE**

III.1 Introduction :

Les techniques de diagnostic et d'analyse de défauts de machines tournantes connaissent un intérêt sans cesse croissant et un essor très important C'est à cause des besoins industriels Ces besoins ont ainsi généré des études et des recherches dans des domaines technologiques et scientifiques variés mais complémentaires; on peut citer: l'automatique, le traitement du signal, la modélisation des phénomènes physiques, la reconnaissance de formes.

Dans ce chapitre, nous allons introduire Nous donnons les techniques les plus utilisées dans l'analyse des signaux vibratoire avec une étude de différentes méthodes utilisées, telles que : l'analyse temporelle, l'analyse spectrale, l'analyse d'Enveloppe (AE), l'analyse cepstrale (AC), l'analyse en ondelettes. Le but de l'étude est d'examiner ces techniques d'analyse e vibrations et en explorer les capacités.

III.2 Analyse dans le domaine temporel :

III.2.1 Indicateurs scalaires :

Les indicateurs scalaires sont des outils statistiques appliqués à un signal temporel puis traités afin d'aider à l'analyse des vibrations. Ils permettent de suivre l'évolution d'une grandeur décrivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal. Sa valeur peut ne pas avoir de signification intrinsèque, c'est son évolution dans le temps qui est significative du défaut. De nombreux indicateurs existent dans la littérature ont été utilisés dans le domaine de diagnostic vibratoire automatisé, et certains sont le résultat de la combinaison de plusieurs d'entre eux. Zhang a proposé un ensemble d'indicateurs pour le diagnostic automatisé des défauts de roulements [27]. Il s'agit des indicateurs statistiques suivants:

a) La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square) :

Le RMS, nommée aussi valeur efficace ou moyenne quadratique d'un signal, correspond à la racine carrée du moment d'ordre deux et est calculé comme montré par l'équation (III.1) [27]:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [s(t)]^2} \quad (\text{III.1})$$

Le RMS est un des premiers indicateurs utilisés en industrie, dû notamment à sa simplicité et à sa rapidité d'exécution. Une variation excessive du niveau *RMS* signifie en général un changement de l'état de fonctionnement et donc une défaillance. L'un des inconvénients majeurs de l'utilisation du *RMS* c'est qu'il donne généralement une alarme assez tardive, notamment pour le cas des défauts de roulements, où la variation du signal due à l'apparition du défaut est masquée par d'autres composantes d'amplitudes plus élevées [28].

b) Facteur crête :

Contrairement à la valeur efficace de l'amplitude d'un signal, des indicateurs spécifiques comme le facteur crête est le mieux adapté pour représenter un signal induit par des forces impulsionnelles telles que les écaillages de roulements [29]. Le facteur crête FC est un indicateur plus spécifique, qui permet d'observer de plus près le signal vibratoire. Le suivi du facteur crête permet un dépistage plus précoce des défauts en mesurant le rapport entre la valeur maximale du module du signal (valeur crête) sur la valeur efficace [30], comme montré par l'équation (III.2) :

$$FC = \frac{\text{Valeur crête}}{\text{RMS}} = \frac{\text{Sup } |s(t)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [s(t)]^2}} \quad (\text{III.2})$$

Le facteur crête suit une distribution normale, sa valeur varie en générale entre 3 et 6, pour un fonctionnement sans défaut et peut aller au-delà de 6 dès l'apparition d'une défaillance. D'autres indicateurs ont été développés sur la base du facteur crête, tels que le facteur K, en multipliant la valeur crête par la valeur efficace ou la valeur crête à crête comme montré dans l'équation (III.3) [1] :

Facteur $k = \text{valeur crête} \times \text{valeur efficace} =$

$$\text{Sup } |s(t)| \cdot \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [s(t)]^2} \quad (\text{III.3})$$

Mesurant l'écart entre les amplitudes des pics supérieur et inférieur.

Le facteur K est plus sûr pour effectuer une analyse ponctuelle des roulements. Sa valeur est directement liée à l'état du ou des roulements. Contrairement au facteur de crête, le facteur K est un indicateur instable.

Le facteur de crête comporte l'avantage de détecter les défauts avant la valeur efficace. Ceci provient du fait que pour un roulement sans défaut, le rapport reste sensiblement constant et augmente lorsqu'une dégradation apparaît alors que la valeur crête croît pendant que la valeur efficace reste à peu près constante. Si la détérioration du roulement croît, la valeur crête augmentera jusqu'à une valeur asymptotique et la valeur efficace, quant à elle, augmentera à son tour, rendant le facteur de crête sensiblement égal à sa valeur de départ (**Figure III.1**). Les états caractéristiques normaux ou anormaux qui peuvent se manifester sur des roulements peuvent être définis à partir de la valeur efficace de l'accélération et de la valeur crête de la vitesse.

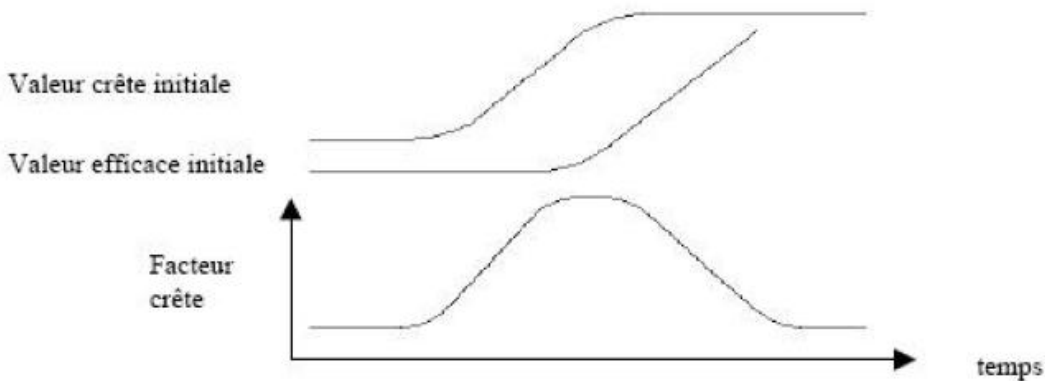


Figure III.1 : évolution des valeurs crête, efficace et du facteur de Crête.

c) Le Kurtosis :

Le Kurtosis est une distribution Gaussienne est égale à 3, cette valeur est devenue référence pour évaluer le degré d'aplatissement d'une distribution par rapport à celle normale, Plus spécifique au dépistage des défauts de roulements, le kurtosis est une grandeur statistique permettant d'analyser le caractère « pointu » ou « plat » d'une distribution, et donc d'observer la forme du signal. Dérivé du moment statistique d'ordre quatre, il est défini comme le rapport de la valeur moyenne du signal élevée à la puissance 4 sur le carré de son énergie [31]. Il est donné par la formule suivante (III.4) :

$$\text{kurtosis} = \frac{M_4(s(t))}{M_2^2(s(t))} = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (s(t) - \bar{s})^4}{\left[\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (s(t) - \bar{s})^2 \right]^2} \quad (\text{III.4})$$

Où M_4 et M_2 sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2, est la valeur moyenne des amplitudes. Le Kurtosis approche la valeur de 3 pour un fonctionnement sans défauts de roulement, et augmente de façon remarquable dès l'apparition d'impulsions dues à la naissance d'un défaut. Le Kurtosis tend à revenir à 3 dès que la dégradation entre en phase terminale. Pour être plus efficaces le Kurtosis et le facteur crête sont calculés dans certaines bandes fréquentielles où l'effet engendré par les dégradations est plus visible.

III.2.2 Le moyennage temporel synchronisé :

Le moyennage temporel synchronisé (MTS) représente une autre approche très populaire dans le domaine temporel. L'idée générale de MTS consiste à découper le signal vibratoire en segments de même longueur et d'effectuer une moyenne d'ensemble sur ces segments afin d'éliminer ou réduire le bruit, elle est donnée par [27].

$$\bar{s}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S(t + nT); 0 \leq t < T \quad (\text{III.5})$$

Ceci peut être modélisé comme la convolution du signal $S(t)$ avec un train de N fonctions déplacées par des multiples entiers de la durée de période T . Cette technique a été appliquée dans plusieurs études pour le suivi vibratoire des machines tournantes. Rappelons enfin que cette technique suppose un signal parfaitement stationnaire [27].

Dans [32], il a été noté que, généralement, la vitesse de rotation des machines n'est pas constante même en mode d'opération normal. Dans ce cas là, le nombre de points par rotation est différent pour une fréquence d'échantillonnage donnée. Une opération d'interpolation est, donc, nécessaire pour rendre le nombre de point par révolution le même avant d'exécuter le moyennage temporel synchronisé.

Cette interpolation transforme le signal vibratoire du domaine temporel au domaine *angulaire* et redéfinit la fréquence d'échantillonnage pour être en fonction de la position angulaire plus que la position temporelle. Cette méthode nécessite la présence d'un signal top tour ou un signal codeur optique.

III.3 Analyse dans le domaine fréquentiel:

III.3.1 Analyse spectrale :

L'analyse spectrale ou l'analyse de fréquence, Le signal vibratoire extrait d'une machine tournante est très complexe, originaire des différents organes la composant. La transformée de Fourier est un outil mathématique permettant de transformer ces signaux complexes, de les décomposer en une multitude de composantes élémentaires sinusoïdales et de les représenter sous forme d'un spectre « Amplitudes-fréquence » [33] [31]. La transformée de Fourier rapide FFT développée par James Cooley et John Tukey, ne requiert qu'un temps de calcul minime pour appliquer la transformée de Fourier Discrète. La FFT a été largement implémentée dans les systèmes de diagnostic des machines tournantes. Mathématiquement [34], la transformée de Fourier rapide est donnée par (III.6):

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{III.6})$$

Où $s(f)$ es la transformée de Fourier du signal, $s(t)$ est la variable temps, f est variable fréquence. La transformée de Fourier discrète correspondante s'exprime par (III.7):

$$S(k) = \sum_{i=1}^{N_e} S(i) e^{-j2\pi k \frac{1}{N_e}} \quad (\text{III.7})$$

Où :

$S(k)$ est la transformée de Fourier discrète,

$t/n_e = t_e$ est la période d'échantillonnage du signal temporel,

K : représente la fréquence la plus haute, étant égale à la fréquence de coupure du signal [58].

Sur la **Figure III.2** il est possible de visualiser la transformée de Fourier de la somme de deux signaux sinusoïdaux de fréquences respectives 140 Hz et 250 Hz. Elle présente un lobe principale par fréquence et plusieurs lobes secondaires.

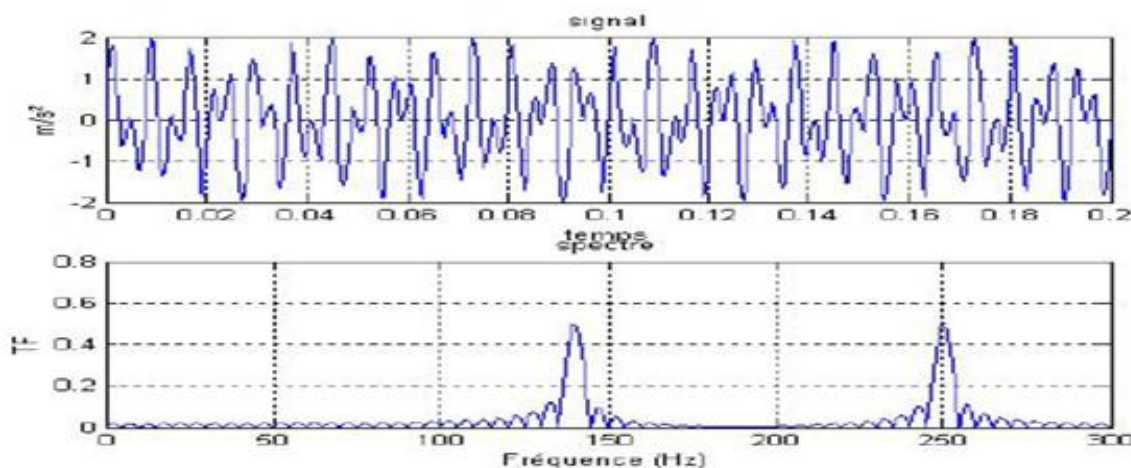


Figure III.2. : transformée de Fourier d'une somme de deux sinusoïdes.

Le théorème de Parseval exprime que l'énergie contenue dans le signal temporel est égale à celle dans sa représentation fréquentielle. A partir de là nous pouvons parallèlement construire sur les signaux de puissance finie des spectres de puissance, représentatifs du carré du module de la transformée de Fourier, rapportée au temps d'observation (Densité spectrale de puissance DSP) (III.8) :

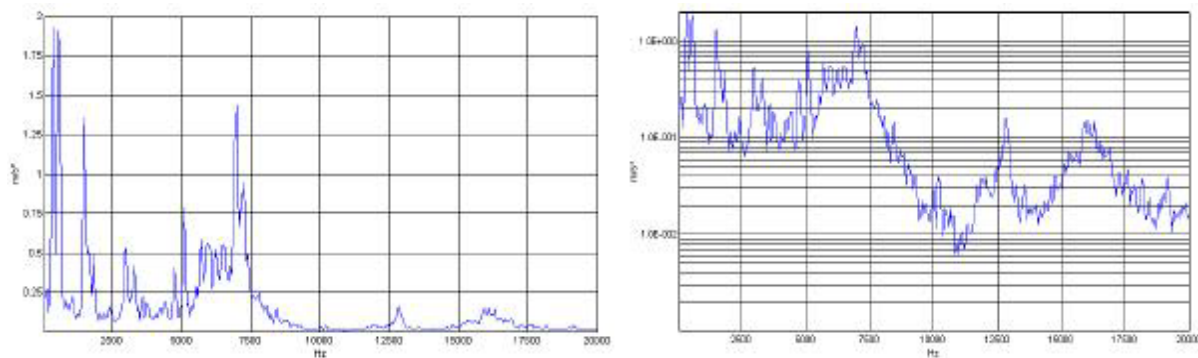
$$\text{DSP}(f) = \frac{|S(f)|^2}{d_0} \quad (\text{III.8})$$

Dans des conditions de fonctionnement stationnaires « vitesses de rotations et chargements stationnaires », chaque organe de la machine émet des vibrations à un certain niveau d'amplitude, et à une cadence « fréquence » constante dans le temps. L'apparition de défauts dans les organes de la machine tournante génère des efforts supplémentaires qui se traduisent par des vibrations se répétant à une cadence « fréquence » constante, relative à la fréquence de rotation. Suivre les amplitudes des vibrations à ces fréquences permet de suivre les conditions de fonctionnement des différents organes de la machine tournante.

Pour faciliter le diagnostic, on préfère souvent les échelles logarithmiques, ainsi les raies de « faible énergie » restent visibles et facilement interprétables.

En effet, les fréquences caractéristiques des roulements peuvent se trouver noyées car certains mécanismes possèdent des composants mécaniques à plus forte densité énergétique,

comme les engrenages par exemple. La **Figure III.3** illustre la différence de représentation pour un spectre entre les échelles linéaire et logarithmique.



(a) : Echelle d'amplitude linéaire

(b) : Echelle d'amplitude logarithmique

Figure III.3 : représentations d'un spectre.

III.3.2 L'analyse cepstrale :

Le « cepstre » (anagramme du mot « spectre ») est un opérateur mathématique qui, associé à un spectre, L'analyse cepstrale est une technique complémentaire d'analyse, développée sur plusieurs variantes, dont les plus utilisées sont le cepstre complexe ; définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier, s'exprime selon une variable uniforme au temps [33], et est représentée par (III.10):

$$C = TF^{-1}[\text{Ln}|X(f)|] \quad (\text{III.10})$$

Le cepstre définit aussi comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal du carré du module de sa transformée de Fourier « spectre de puissance ». Sa formule mathématique est (III.11) :

$$C = TF^{-1}[\text{Ln}|X(f)|^2] \quad (\text{III.11})$$

De même que la transformée de Fourier permet de mettre en évidence les périodicités d'un signal temporel, le cepstre met en évidence les périodicités de sa transformée de Fourier. Opinant par la même occasion, de rechercher, d'identifier et de quantifier rapidement toute les

familles de composantes périodiques, qui peuvent se manifester dans le spectre sous forme de peignes de raies ou bandes latérales de modulation autour d'une fréquence caractéristique ce qui n'est pas toujours évident dans le cadre de l'analyse spectrale. Les unités et grandeurs sont autres dans le cepstre que ceux utilisés dans l'analyse spectrale, ainsi on trouve entre autres ; les périodicités qui sont appelées Quéfrances et sont exprimées en secondes ou millisecondes et les harmoniques qui deviennent des Rahmoniques. Cependant, la bonne utilisation de cet outil nécessite de prendre plusieurs précautions dans la définition des plages fréquentielles, des résolutions et du nombre de lignes spectrales, et de toujours l'associer à d'autres techniques « analyse spectrale par exemple ». Ceci est notamment dû à sa sensibilité importante au bruit de fonds influençant l'évolution de ces amplitudes [27].

Il a pour but d'identifier et de quantifier toutes les structures périodiques contenues dans le spectre. Il permet de définir des indicateurs adaptés à la détection précoce des défauts induisant, à des stades plus ou moins avancés, des énergies vibratoires que les indicateurs issus de techniques traditionnelles Mettraient difficilement en évidence.

Le cepstre et ses dérivées représentent les amplitudes des composantes dont les quéférences correspondent aux périodes de répétition des chocs induits par les défauts de la machine surveillée. Il est largement utilisé pour la détection de défauts d'engrenage et dans une moindre mesure pour les défauts de roulements. Le tableau montre la similitude/différence entre spectre et cepstre. La **Figure III.4** montre un exemple d'une analyse cepstrale d'un signal d'engrenages.

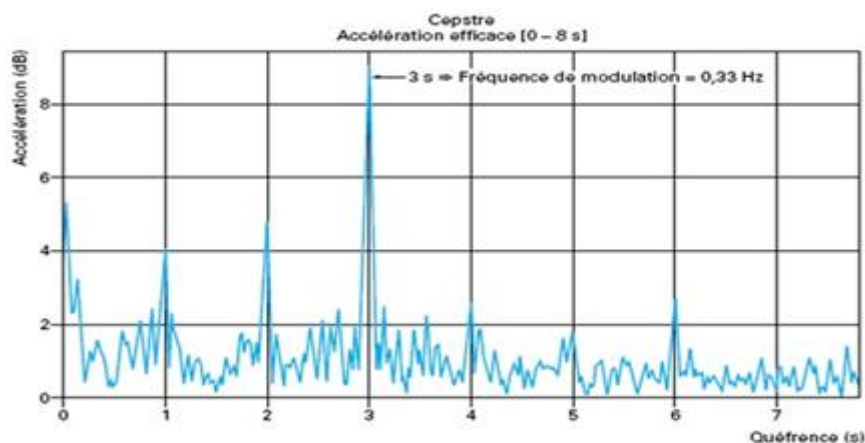


Figure III.4 : utilisation du cepstre pour la surveillance d'un engrenage.

Analyse spectrale	Analyses cepstrale
Spectre	Cepstre
Fréquence	Quéfrence
Harmonique	Rahmonique
Phase	Saphe
Filtre	Lifre

Tableau III.1 : comparaison entre l'Analyse spectrale et l'Analyses cepstrale.

III.3.3 L'analyse d'enveloppe « HFRT » :

L'analyse d'enveloppe ou la HFRT (High frequency Résonance Technique) est une technique de détection précoce des défauts de type choc..La HFRT repose sur l'étude du signal enveloppe obtenu grâce à la transformée de Hilbert [35], Mathématiquement est donnée par (III.12) :

$$H[S(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (III.12)$$

Pour ce faire le signal vibratoire est relevé dans une bande fréquentielle large, et filtré autours d'une fréquence de résonance [31]. Le signal est ensuite redressé « en mettant au positive toutes les valeurs négatives », et la transformée d'Hilbert est appliquée afin de relever son enveloppe et ainsi dissocier, le signal modulé (fréquences de résonance) du signal modulant correspondant au défaut recherché. Le diagnostic final pourra par la suite être rendu après analyse spectrale de l'enveloppe [36].

III.4 Analyse temps-fréquence :

L'analyse spectrale classique basée sur la transformée de Fourier présente un inconvénient sérieux, vu qu'elle suppose que la majorité des signaux sont infinis dans le temps ou périodiques, alors qu'en réalité ils peuvent être de courte durée comporter des variations au cours du temps d'acquisition. Pour pallier cet inconvénient, des techniques ont été développées analysant les variations fréquentielles au cours du temps. Parmi ces techniques on trouve, la transformée de Fourier à Court Terme, la Distribution de Wigner-Ville, ou les techniques à base d'ondelettes.

III.4.1 Transformée de Fourier à courte terme « STFT » :

Développée par Gabor en 1946 La transformée de Fourier à court terme, transformée de Fourier à fenêtre glissante ou bien encore connue sous le nom de Short-Time Fourier Transforme (*STFT*), est un développement basé sur la technique de transformée de Fourier standard. Cette technique permet d'outrepasser les lacunes de la FFT en analysant des variations fréquentielles de courte durée au cours de l'acquisition. Le principe de cette technique est de scinder le signal étudié en segments supposés stationnaires. Ceci est fait en multipliant le signal par une fonction g , appelée « fenêtre », caractérisée par une largeur « où le signal peut être considéré comme stationnaire » et une position temporel « glissante » [27]. Étant donné un intervalle de temps $T > 0$, soit $g(u)$ une fonction (fenêtre) qui s'annule en dehors de l'intervalle $-T \leq u \leq 0$. La (*TFCT*) d'une fonction $f(u)$ est définie par l'équation (III.13) :

$$F(\omega, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{g}(u - t) f(u) e^{2\pi i \omega u} du \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$g(u)$, le complexe conjugué de la fonction $g(u)$ (appelée fenêtre) et t le paramètre de localisation temporelle de la fenêtre \bar{g} . Une des principales limitations de cette méthode est caractérisée dans le principe d'incertitude d'Heisenberg, où l'image temps-fréquentielle obtenue n'est représentative que d'un intervalle de temps dans lequel une bande de fréquence existe. Ceci se traduit mathématiquement par l'équation (III.14) :

$$\Delta f \cdot \Delta t = \frac{1}{4\pi} \quad (\text{III.14})$$

Ce qui montre un sérieux problème de résolution. En effet, une fenêtre g de très large dimension (haute résolution fréquentielle), amènerai à perdre une grande partie de l'information relative au temps, de même que pour la transformée de Fourier classique [37]. Aussi, une fenêtre trop étroite (haute résolution temporelle), conduirai à une faible résolution fréquentielle (une bande de fréquence au lieu d'une raie).

III.4.2 Distribution de Wigner Ville (DWV) :

La Distribution de Wigner Ville (DWV) est une transformation non linéaire, qui de même que pour la transformée de Fourier à court terme permet de visualiser le signal sous forme « temps-fréquence ». Le principal atout de cette méthode, c'est qu'elle n'oppose aucune restriction sur les résolutions temporelle et fréquentielles, elle est donc en théorie très adaptée à l'analyse des signaux non stationnaires. Cette transformation peut être interprétée comme la densité spectrale de puissance instantanée du signal et possède donc des unités de puissance et non d'amplitude. Etant donné une fonction $f(u)$, la Distribution de Wigner Ville est définie par l'équation (III.15) [27] :

$$W(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{f}\left(t + \frac{u}{2}\right) f\left(t - \frac{u}{2}\right) e^{i\omega u} du \quad (\text{III.15})$$

Avec :

$\bar{f}(u)$: est le complexe conjugué de $f(u)$.

La non-linéarité de cette transformée est l'un des principaux freins quand l'utilisation massive de cette technique, se manifestant par l'apparition d'interférences et d'énergies négatives dans la distribution temps fréquence de l'énergie du signal. Ces phénomènes apparaissent, par exemple, lorsqu'il y a présent ce de deux événements distincts en temps et en fréquence. Ce phénomène est totalement irréaliste d'un point de vue physique et rend très difficile l'interprétation de l'image «temps-fréquentielle» obtenue. Pour pallier à ce problème des solutions « post-traitement » sont trouvées dans la littérature, parmi les quelles, on peut citer l'utilisation d'un noyau de lissage (fonction à deux variables) afin d'adoucir localement la rigueur de la résolution.

III.5 Analyse temps- échelle :

Comme il a été décrit dans la section précédente, l'analyse temps-fréquence étudie la variation des caractéristiques fréquentielles dans le temps. Mais on peut également considérer la représentation temps-fréquence comme étant une projection du signal sur des fonctions de base fixes. D'autres approches pour l'analyse des signaux non stationnaire considèrent que les signaux non stationnaires sont des superpositions des composantes calculés des fonctions de base qui sont plus ou moins localisées dans le temps.

L'analyse en ondelettes est, sans doute, l'un des outils mathématiques les plus utilisé en traitement de signal et qui a connu une évolution rapide dans les dernières années. Comme la transformée de Fourier, les variantes de la transformée en ondelettes peuvent être classées en continue et discrète. Les ondelettes continues sont mieux adaptées pour l'analyse temps-fréquence et pour la visualisation, tandis que les ondelettes discrètes sont très utiles en décomposition, compression et pour l'extraction des indicateurs [27].

III.5.1 La transformée en ondelettes :

Contrairement à la STFT, La transformée d'ondelette est une méthode de traitement de signaux possédant une résolution adaptative à la taille de l'objet ou du détail analysé. De même que pour la transformée de Fourier cette technique décompose le signal dans une base de fonctions particulières, sauf que ces fonctions « appelées ondelettes », contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier, sont des fonctions oscillantes au sens large et peuvent être rapidement amorties.

[1] Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, une ondelette dilatée observe les composantes basses fréquences nécessitant une large fenêtre temporelle, alors qu'une ondelette contractée observe les composantes hautes fréquences où une haute résolution temporelle est requise [38]. Ses premières applications sont apparues avec les travaux de Morlet et de Daubechies [27] définissant ses bases.

Les éléments de base de la Transformée en Ondelettes sont des fonctions localisées en temps autour d'un paramètre b et oscillant à une fréquence a . Et sont générées par translation b et

dilatation a à partir d'une fonction, l'ondelette mère moyenne nulle, comme montré dans l'équation (III.16) :

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III.16})$$

La transformée en Ondelettes d'une fonction $x(t)$ est définie au moyen du produit scalaire montré par l'équation 20 conduisant à une représentation temps-échelle en fonction des variables décalage et échelle. Comme montré dans l'équation(III.17) :

$$TOC(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) * \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{III.17})$$

Une discrétisation de la transformée est possible en posant 2^m et 2^n au lieu des paramètres a et b , avec m et n des entiers [19], comme montré dans l'équation (III.18) :

$$TOD(m, n) = 2^{-\frac{m+n}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) * \Psi^*(2^{-m}(t - n)) dt \quad (\text{III.18})$$

Dans le cadre des signaux numériques, L'Analyse Multi Résolution en Ondelette (AMRO) est largement utilisée, permettant de décomposer un signal, en sous bandes fréquentielles, sans perte ou redondance d'informations [38]. Cette technique génère à chaque niveau un coefficient d'approximation contenant l'information (basses fréquences), et un coefficient de détail contenant l'information (hautes fréquences) du signal d'origine. L'opération peut être répétée sur plusieurs niveaux et conduit à la création de l'arborescence montrée dans la **Figure II-5** :

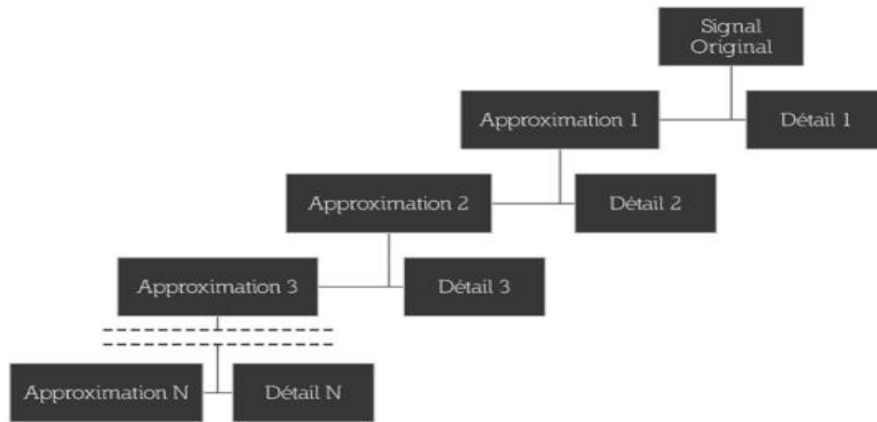


Figure III.5: arbre de décomposition (AMRO).

III.5.2 Principe de La Transformée en ondelettes :

La transformée en ondelettes est un outil récent de traitement du signal, son principe repose sur la décomposition d'un signal en une famille d'ondelettes d'échelles et des positions différentes. Ces ondelettes sont obtenues en dilatant ou contractant une ondelette-mère et en la translatant le long de l'axe temporel. Les méthodes d'analyse de signaux ont été développées pour des signaux stationnaires, c'est-à-dire donc les caractéristiques ne varient pas dans le temps. La transformée en ondelettes par contre, lorsque l'ondelette est plus courte et que sa fréquence centrale est plus élevée, la résolution temporelle est meilleure et la résolution fréquentielle est moins bonne. L'inverse se produit lorsque la fréquence centrale diminue: dans ce cas, la résolution temporelle est dégradée et c'est la résolution fréquentielle qui est meilleure.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu des technologies de surveillance de ces machines rotatives basées sur le traitement et des méthodes les plus utilisées dans le domaine du traitement des signaux vibratoires.

L'analyse des signaux vibratoires dépend de l'efficacité de la technique de traitement. De nombreuses techniques ont été utilisées telles que: l'analyse temporelle et l'analyse fréquentielle, mais ces techniques ne permettent malheureusement pas de détecter les informations inhérentes au signal en raison de l'instabilité. Pour résoudre ce problème, une analyse d'enveloppe a été proposée.

La portée de son application sera élargie dans nos travaux, nous présentons les détails de cette méthode dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

APPLICATION DE LA

METHODE D'ENVELOPPE POUR

LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS

DE ROULEMENTS

IV.1 Introduction :

Le diagnostic de défauts est une tâche extrêmement importante dans la surveillance. Il fournit aux opérateurs l'information sur le processus. Le diagnostic précoce peut aider à éviter une progression anormale des événements et à réduire la perte de productivité. Différentes techniques de surveillance ont été développées, tels que la dynamique, les vibrations, la tribologie et la non-destruction les techniques.

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

L'analyse des signaux de vibration dépend de l'efficacité de la technique de traitement. Plusieurs techniques ont été utilisées telles que: l'analyse temporelle et l'analyse fréquentielle, malheureusement, ces techniques ne sont pas capable de révéler les informations inhérentes du signal due à la non stationnarité. Pour résoudre ce problème, l'analyse d'enveloppe, a été proposé.

L'analyse d'enveloppe est efficace et bien adaptée aux signaux induisant des chocs périodiques ou modulation en amplitude [39], [40].

IV.2 Configuration expérimentale et acquisition de données :

Les mesures expérimentales présentées dans ce travail sont entièrement basé sur les données de vibration obtenues à partir de la base de données de l'université de Western Reserve Comme il montre la (**Figure IV.1**), le système est composé d'un moteur asynchrone connecté à un dynamomètre et un capteur de couple, par un couplage auto-aligné. Les données ont été recueillies à partir d'un accéléromètre monté sur l'extrémité de l'entraînement du moteur. Le roulement utilisé dans ce travail est de type SKF. Les données ont été obtenues dans les quatre modes suivants :

1- Etat normal;

- 2- Défaut de bague intérieure;
- 3- Défaut de bague extérieure ;
- 4- Défaut de bille.

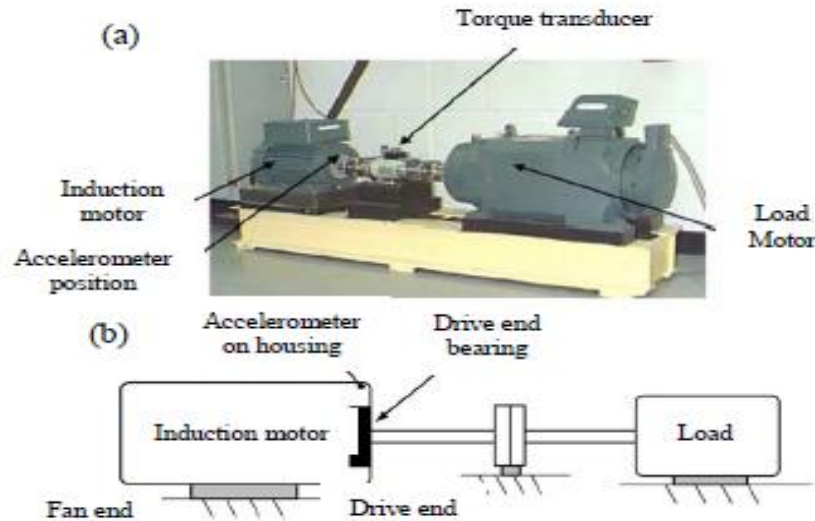


Figure IV.1 : a) Banc d'essais et b) son schéma synoptique.

Les roulements d'essai soutiennent l'arbre du moteur. Un point de défaillance unique est introduit dans les roulements à l'aide d'une machine EDM avec des diamètres de défaillance de 7 millièmes de pouce, 14 millièmes de pouce, 21 millièmes de pouce et 28 millièmes de pouce.

Les roulements SKF ont été utilisés pour les diamètres de rupture de 7, 14 et 21 millièmes de pouce et pour les 28 millièmes de pouce, ils ont utilisé des roulements NTN équivalents aux précédents.

Pour la prise de mesures, l'ensemble suivant a été utilisé un roulement 6205 2RS-JEM SKF comme cible pour notre étude. L'outil de prélèvement de mesure utilisé est le SKF Micro log Analyser GX (**Figure IV.2**). et Matlab installé sur un PC de bureau. Le Matlab nous facilite la détection des fréquences caractéristiques des défauts, les harmoniques et les modulations de fréquence.



Figure IV.2: SKF Microlog Analyser GX.

IV.3 Calcul 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

Le diagnostic des pannes dans un système mécanique se base sur la connaissance des fréquences des défauts susceptibles de se produire durant son fonctionnement et qui nous permet d'identifier les spectres typologiques initiaux (sans défaut) et évolués (avec présence de défaut). Les fréquences des défauts dépendent principalement des caractéristiques géométriques des organes de la machine et leurs vitesses de rotations. (**Tableau IV.1**)

Roulement: 6205-2RS JEM SKF				
Dimensions en millimètres.				
Diamètre intérieur	Diamètre extérieur	Epaisseur	Diamètre de la bille	Diamètre de la piste
25,0012	51,9988	15,0012	7,9400	39,0398
Fréquences de défaut(multiplies de la vitesse de rotation en Hz).				
Piste interne	Piste externe	Défaucage	Défaut bille	
5,4152	3,5848	0,39828	4,7135	

Tableau IV.1 : 6205-2RS JEM SKF dimensions des roulements et fréquence des défauts.

Les fréquences de défauts sont données en fonction de la vitesse de rotation puisque le test est effectué à 4 vitesses de rotation différentes (**Tableau IV.2**) et comme nous le verrons dans la section 3.2, ces fréquences théoriques dépendent de la vitesse de rotation.

Charge du moteur (HP)	Vitesse du moteur (tr/mn)
0	1797
1	1772
2	1750
3	1730

Tableau IV.2 : Charges du moteur et vitesses de rotation en tr/mn.

Les données de vibration sont obtenues par des accéléromètres, qui sont fixés au boîtier par des bases magnétiques. Les accéléromètres sont situés à la position 12 heures sur les deux extrémités du boîtier du moteur. Pendant l'expérience, un accéléromètre est attaché au support de base du moteur (base).

Les signaux de vibration sont collectés à l'aide d'un collecteur à 16 canaux et post-traités dans MATLAB®. Tous les fichiers de données sont au format Matlab (* .mat). Les données numériques sont collectées à 12 000 échantillons par seconde et 48 000 échantillons par seconde pour le roulement d'extrémité du moteur. Les données de vitesse et de puissance sont obtenues à l'aide d'un convertisseur / encodeur de couple et sont sélectionnées manuellement.

IV.4 Introduction aux fréquences caractéristiques de rupture des roulements:

Avant de procéder à l'analyse du signal, une brève analyse sera faite des raisons des défaillances des roulements et de la manière dont elles influencent votre analyse de fréquence.

Les roulements sont du type de roulement capable de supporter et de transmettre les forces générées par l'axe sur lequel ils sont montés sur un autre élément structurel de la machine, étant des éléments à haut risque de défaillance en raison des charges élevées et des cycles de charge qu'ils supportent.

CHAPITRE IV: APPLICATION DE LA METHODE D'ENVELOPPE POUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE ROULEMENTS

Les roulements sont utilisés comme fusibles mécaniques, car ce sont des éléments bon marché par rapport aux autres éléments d'une machine et ils sont généralement faciles à

Remplacer. Les roulements ont une durée de vie limitée, mesurée en heures de fonctionnement, qui dépend principalement des tours effectués par le roulement et de l'ampleur de la charge qu'il supporte, fournissant une estimation du moment où remplacer un roulement avant qu'une défaillance ne se produise.

Etant donné que les conditions de fonctionnement ne seront pas idéales (variations de l'ampleur de la charge, charges discontinues ...), le matériau finira par se fatiguer, provoquant des fissures dans la couche juste en dessous de la surface, qui se propageront progressivement à la surface provoquant le défaut encore plus tôt que prévu par le fabricant.

Cette mesure de la durée de vie des roulements fait partie de la maintenance préventive, où les roulements sont remplacés avant la fin de la durée de vie prévue par le fabricant, évitant une défaillance des roulements en fonctionnement qui provoquerait des vibrations dommageables pour la machine ou dans le pire des cas. Cas la nécessité d'arrêter en raison d'un dysfonctionnement.

Dans ce projet, nous allons analyser la possibilité d'effectuer une maintenance prédictive des roulements en analysant les signaux vibratoires obtenus à partir d'un roulement en fonctionnement, avec une gravité de défaut différente, afin de pouvoir discerner entre un roulement sain et un roulement avec un certain type de défaut en plus de pouvoir reconnaître le type de défaut qu'il a.

Les types de défauts qui peuvent apparaître dans un roulement sont associés à chacun des éléments qui composent le roulement et qui peuvent échouer.

Les éléments qui composent la grande majorité des roulements sont : bague intérieure, bague extérieure, cage et éléments roulants.

Lorsque nous avons un roulement avec défaillance dans l'un de ses éléments mobiles, à chaque tour, il y a un impact des éléments roulants sur l'élément défectueux qui excite des fréquences périodiques appelées fréquences de défaillance fondamentales. Différentes études

CHAPITRE IV: APPLICATION DE LA METHODE D'ENVELOPPE POUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE ROULEMENTS

montrent qu'en fonction du type de défaut que l'on retrouve dans les roulements, différentes fréquences de défaillance caractéristiques se produisent et qui dépendent des dimensions du roulement et de sa vitesse de rotation :

Dans notre étude de cas, les fréquences théoriques nous ont déjà été données calculées pour le relèvement à partir duquel les données ont été collectées en fonction de sa vitesse de rotation exprimée en Hz **Tableau (IV.3)**.

Le tableau suivant présente les fréquences théoriques internes et externes des défauts de chemin de roulement, cage et bille pour le roulement JEM SKF 6205-2RS.

Fréquence de défaut	Vitesse de rotation			
	1797 rpm	1772rpm	1750 rpm	1730 rpm
Piste Interne	162,18 Hz	159,91 Hz	157,69 Hz	156,12 Hz
Piste Externe	107,36 Hz	105,86 Hz	104,39 Hz	103,35 Hz
Cage	11,93 Hz	11,76 Hz	11,59 Hz	11,48 Hz
Bille	141,17 Hz	139,19 Hz	137,26 Hz	135,89 Hz

Tableau IV.3. Fréquence caractéristique de défaillance en fonction du type de défaut et de la vitesse de rotation.

Pour l'analyse fréquentielle des signaux, nous allons utiliser deux méthodes: la transformée de Fourier et l'analyse de l'enveloppe du signal à l'aide de la transformée de Hilbert

Remarque:

Aujourd'hui, la plupart des fabricants des roulements fournissent des tables de référence qui permettent de s'affranchir de ces calculs.

IV.4.1 Caractérisation des signatures spectrales de roulement à l'état sain :

Le spectre de courant statoriques d'une machine asynchrone en absence et en présence d'un défaut, alimentée en tension et entraînant une charge en régime permanentes très riche en harmoniques.

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.

Remarque : on a prend la charge 03 pour chaque signal présenté.

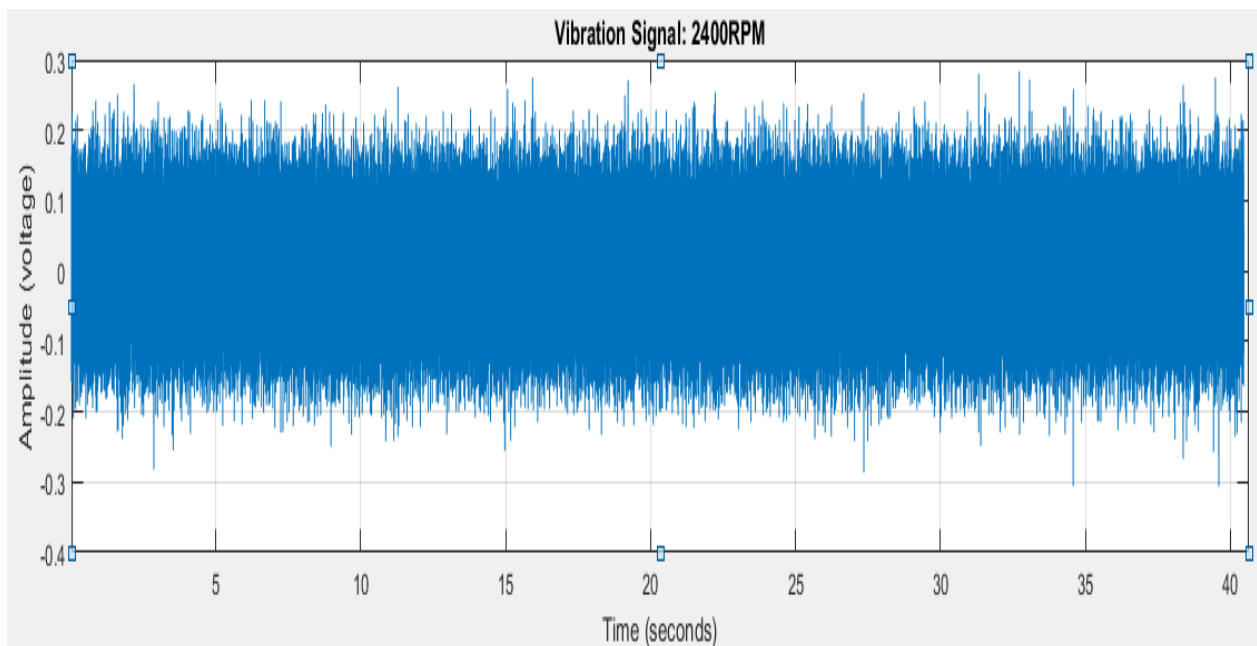


Figure IV.3: signal temporel de roulement à l'état sain.

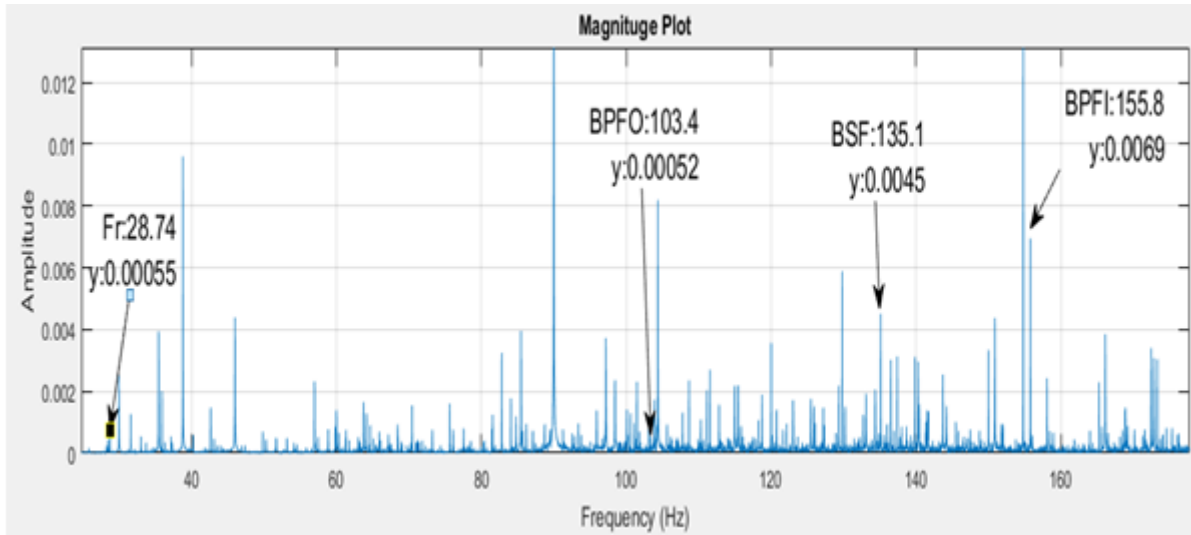


Figure IV.4: spectre de roulement à l'état sain avec les fréquences caractéristiques des défauts de roulement.

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.

➤ **Signatures spectrales de défaut de la bague intérieur :**

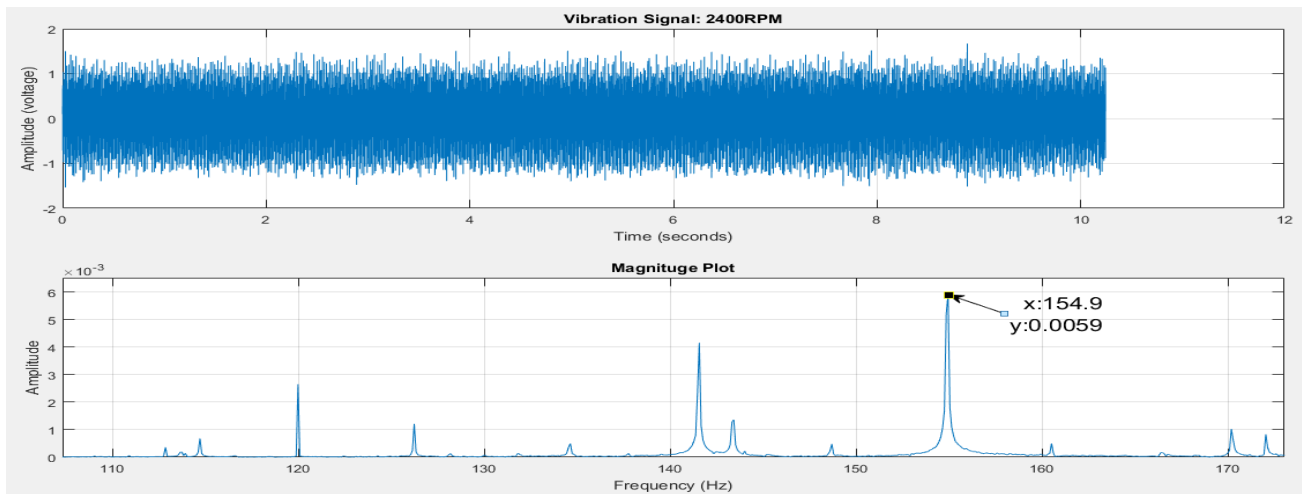


Figure IV.5: spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.007 (mm).

CHAPITRE IV: APPLICATION DE LA METHODE D'ENVELOPPE POUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE ROULEMENTS

Cette figure présente le spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égale à 0.007 (mm). La comparaison entre ce spectre avec celui de la référence montre une variation d'amplitude de raie de fréquence BPFi =155.8 Hz de 0.0069 dans l'état sain à 0.0059 dans l'état Défaillant, ce qui nous montre l'existence d'un défaut de la bague interne de diamètre 0.007 (mm).

➤ **Le signale défaut de la bague intérieur avec un défaut de 0.014mm:**

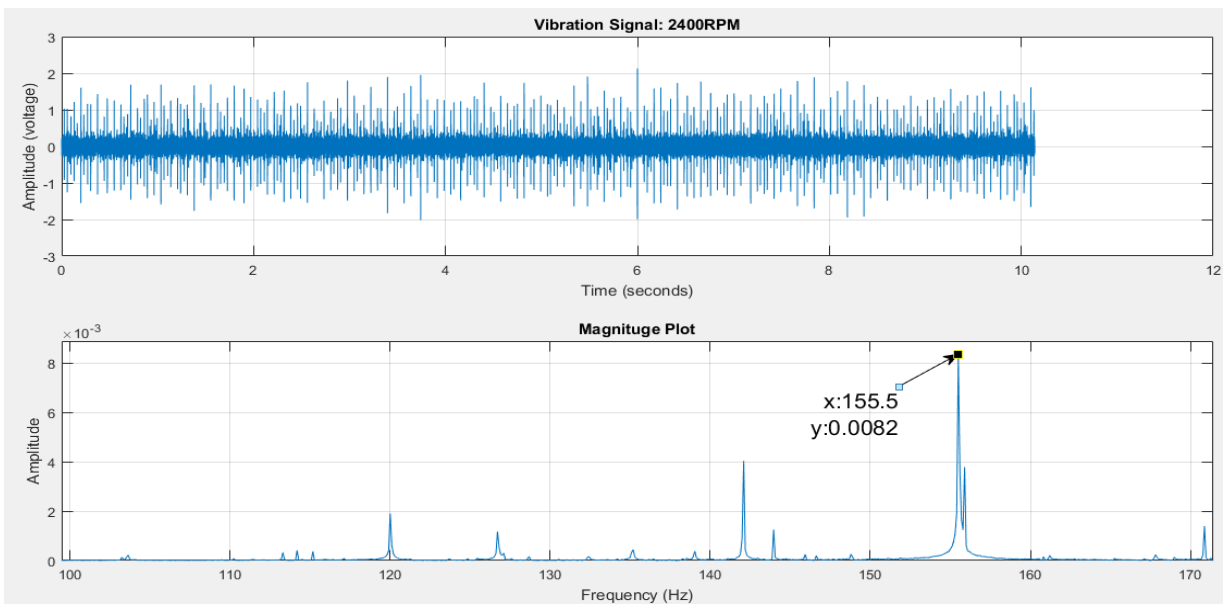


Figure IV.6: spectre de défaut de roulement affectant la bague interne pour un diamètre de défaut égal à 0.014(mm).

Diamètre de défaut (mm)	0 (état sain)	0.007	0.014
Amplitude	0.0069	0.0059	0.0082

Tableau IV.4 :l'évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bague interne.

➤ **Le signal défaut de la bague extérieur avec un défaut de 0.007mm:**

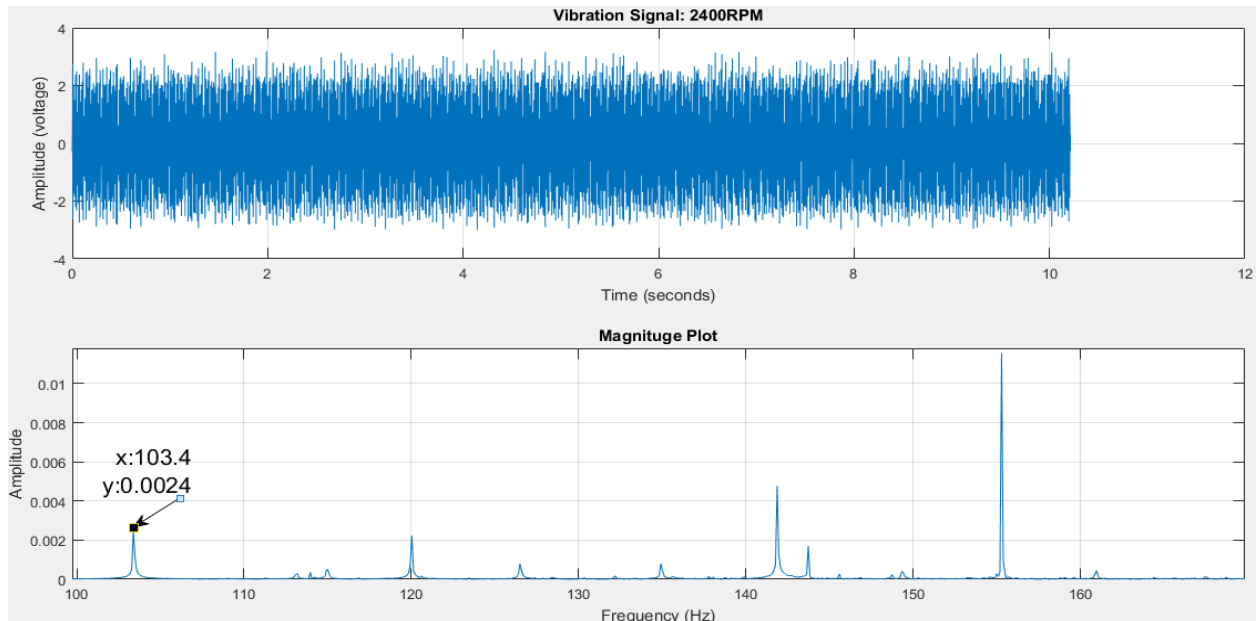


Figure IV.7 : spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.007 (mm).

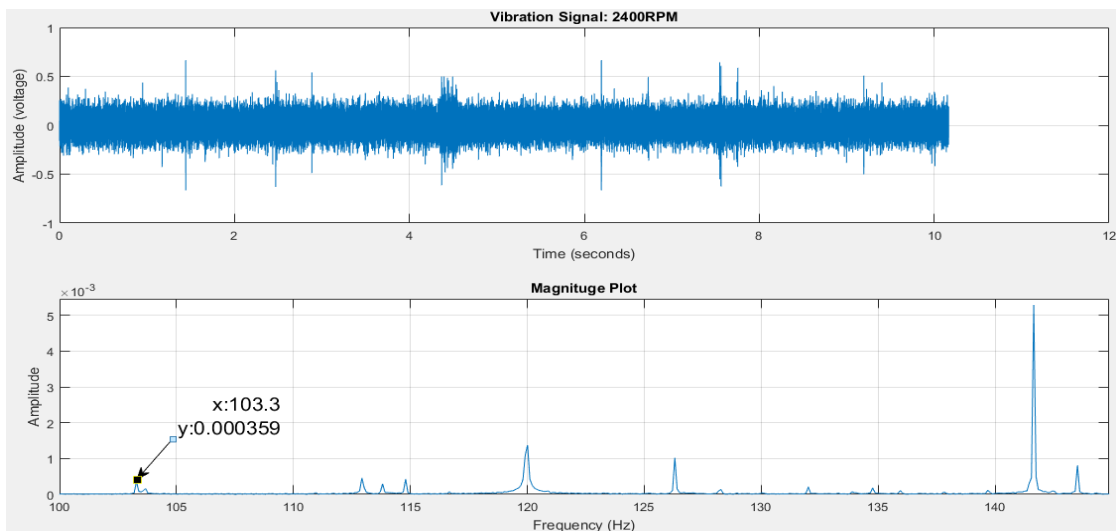


Figure IV.8: spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.014 (mm).

CHAPITRE IV: APPLICATION DE LA METHODE D'ENVELOPPE POUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE ROULEMENTS

Cette figure présente le spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égale à 0.007 (mm) , en comparant ce spectre avec celui de la référence on voit qu'il y a une variation d'amplitude de raie de fréquence BPFO=103.4 Hz de 0.00052 dans l'état sain à 0.0024 dans l'état défaillant, ce qui nous montre l'existence d'un défaut sur la bague externe de diamètre 0.007 (mm).

<i>Diameter de défaut (mm)</i>	<i>0 (état sain)</i>	<i>0.007</i>	<i>0.014</i>
<i>Amplitude</i>	<i>0.00052</i>	<i>0.0024</i>	<i>0.000359</i>

Tableau IV.5: évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bague externe.

➤ **Signatures spectrales de défaut de la bille :**

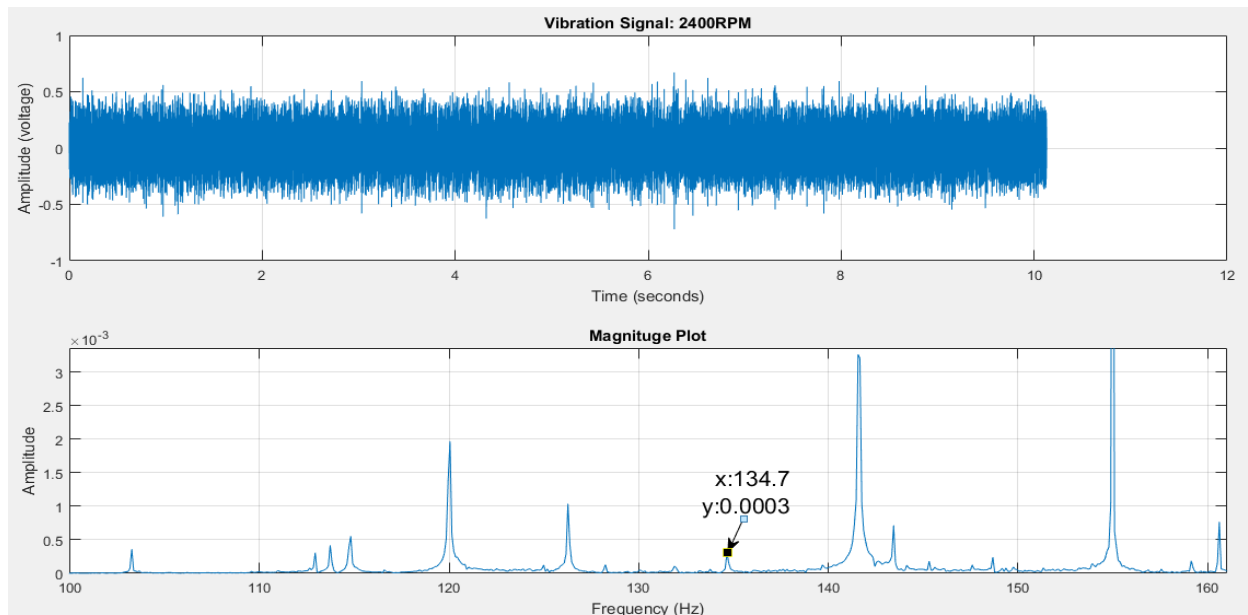


Figure IV.9: spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.007 (mm).

CHAPITRE IV: APPLICATION DE LA METHODE D'ENVELOPPE POUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE ROUEMENTS

Cette figure présente le spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égale à 0.007 (mm) , en comparant ce spectre avec celui de la référence on voit qu'il y a une variation d'amplitude de raie de fréquence BSF =135.10 Hz de 0.0045 dans l'état sain à 0.0003 dB dans l'état défaillant ,ce qui nous montre l'existence d'un défaut de bille de diamètre 0.007(mm).

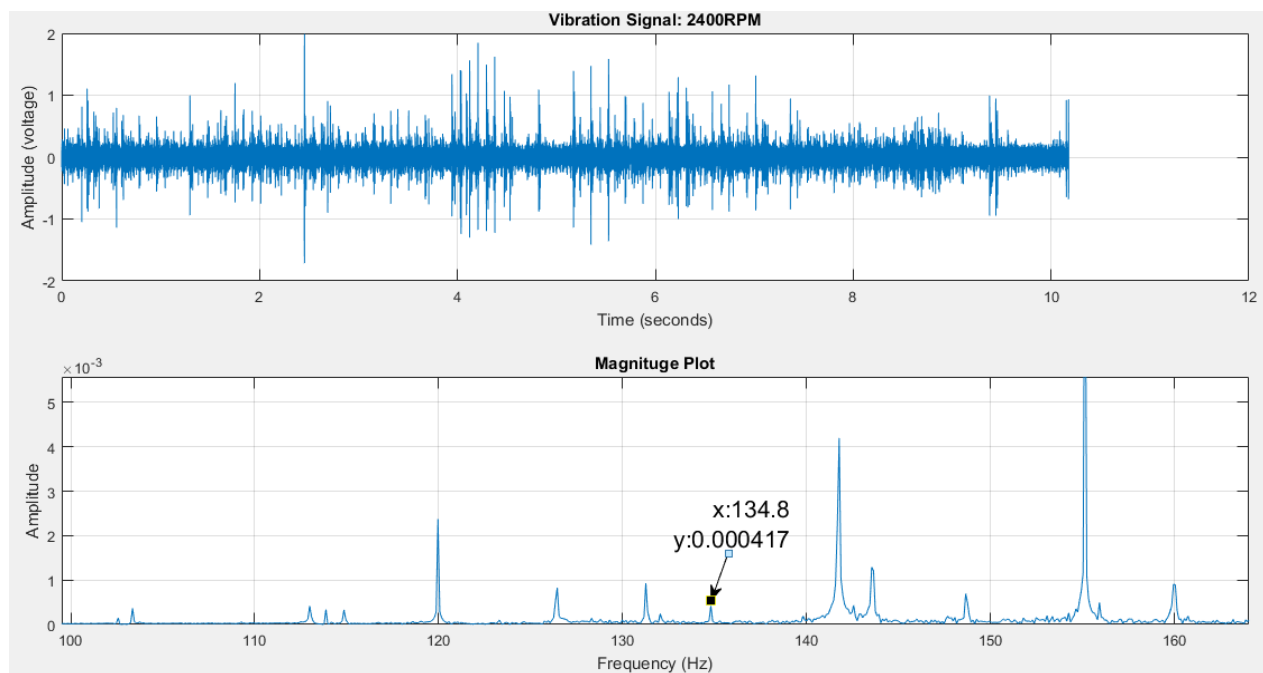


Figure IV.10: spectre de défaut de roulement affectant la bille pour un diamètre de défaut égal à 0.014 (mm).

<i>Diamètre de défaut (mm)</i>	<i>0 (état sain)</i>	<i>0.007</i>	<i>0.014</i>
<i>Amplitude</i>	<i>0.0045</i>	<i>0.0003</i>	<i>0.000417</i>

Tableau IV.6 : l'évolution des amplitudes en fonction de diamètre de défaut de la bille.

IV.4.2 Analyse d'enveloppe :

En pratique, la méthode de l'enveloppe demande une série de traitements du signal temporel brut avant d'obtenir le résultat

L'analyse d'enveloppe est particulièrement bien adaptée au diagnostic des défauts générant des chocs périodiques ou des modulations en amplitude tels que les engrenages et les roulements. La première étape est la filtration du signal brut afin d'éliminer les composantes indésirables : ceci favorise la robustesse de la méthode vis-à-vis du bruit. Ensuite, l'enveloppe est calculée : il s'agit en quelque sorte d'un redressement du signal ; à ce moment, nous disposons d'une information temporelle. Enfin, en ayant recourt à la transformée de Fourier, on obtient le spectre de l'enveloppe qui est un graphe d'amplitude de vibration en fonction de la fréquence. C'est à partir de ce spectre que les conclusions vont être tirées. Pour un signal donné $s(t)$, le HT dans le domaine temporel est défini comme :

$$\tilde{s}(t) = \frac{1}{\pi} \int \left(\frac{s(\tau)}{t-\tau} \right) dt \quad (\text{IV. 1})$$

Le signal analytique $\hat{s}(t)$ du signal $s(t)$ peut être constitué à travers $s(t)$ et son HT $\tilde{s}(t)$:

$$\hat{s}(t) = s(t) + j\tilde{s}(t) \quad (\text{IV.2})$$

Le processus peut être suivi en prenant la valeur absolue du signal analytique pour générer l'enveloppe :

$$|\hat{s}(t)| = \sqrt{s(t)^2 + \tilde{s}^2} \quad (\text{IV.3})$$

Généralement, Les défauts générant des chocs provoquent une modulation du signal. En utilisant l'analyse de l'enveloppe, le pic présent dans le spectre correspond à la fréquence caractéristique du défaut. Afin d'identifier les anomalies à l'aide de cette technique, nous utilisons les mêmes signaux de vibration utilisés précédemment.

Les figures (**Figure IV.11**), (**Figure IV.12**), (**Figure IV.13**) et (**Figure IV.14**) ci-dessous représentent respectivement les enveloppes et leurs spectres. Le filtre utilisé est sélectionné passe-bande, après avoir filtré les signaux. Les spectres représentent de nombreuses composantes fréquentielles, à la fréquence de rotation (30 Hz), également aux fréquences caractéristiques

CHAPITRE IV: APPLICATION DE LA METHODE D'ENVELOPPE POUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE ROULEMENTS

(BPFI=156.12et BPFO=10335Hz) et leurs harmoniques. Ces fréquences indiquent clairement des défauts des bagues intérieure et extérieure.

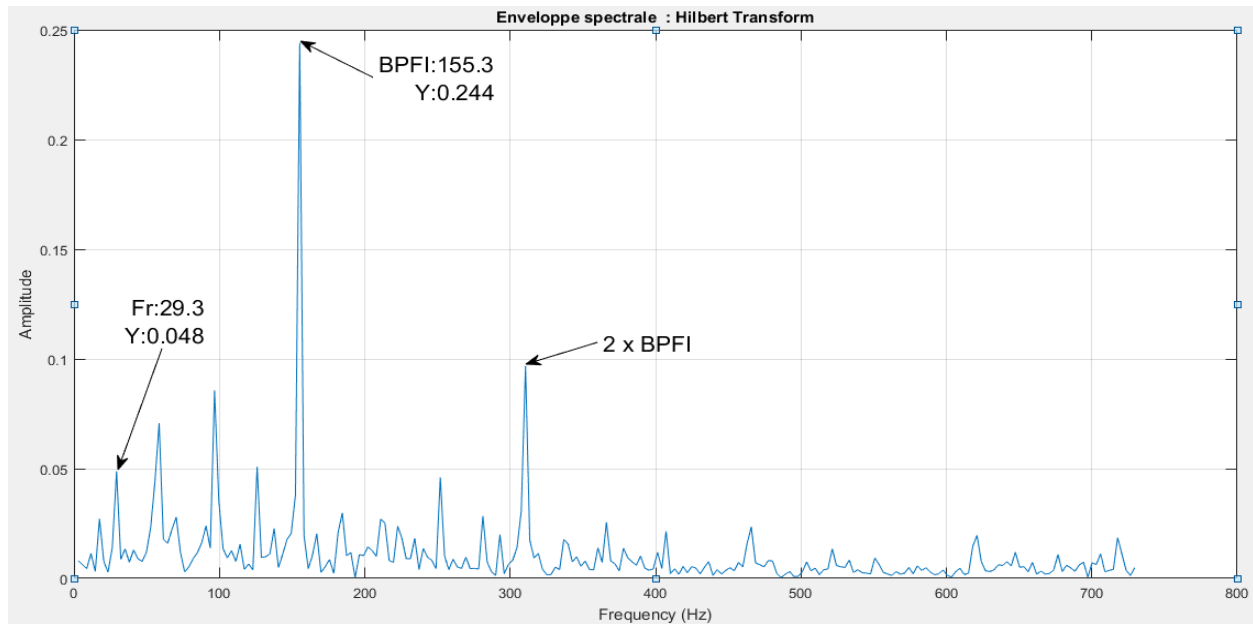


Figure IV.11: enveloppe du défaut de bague intérieure avec défaut 0.007 mm.

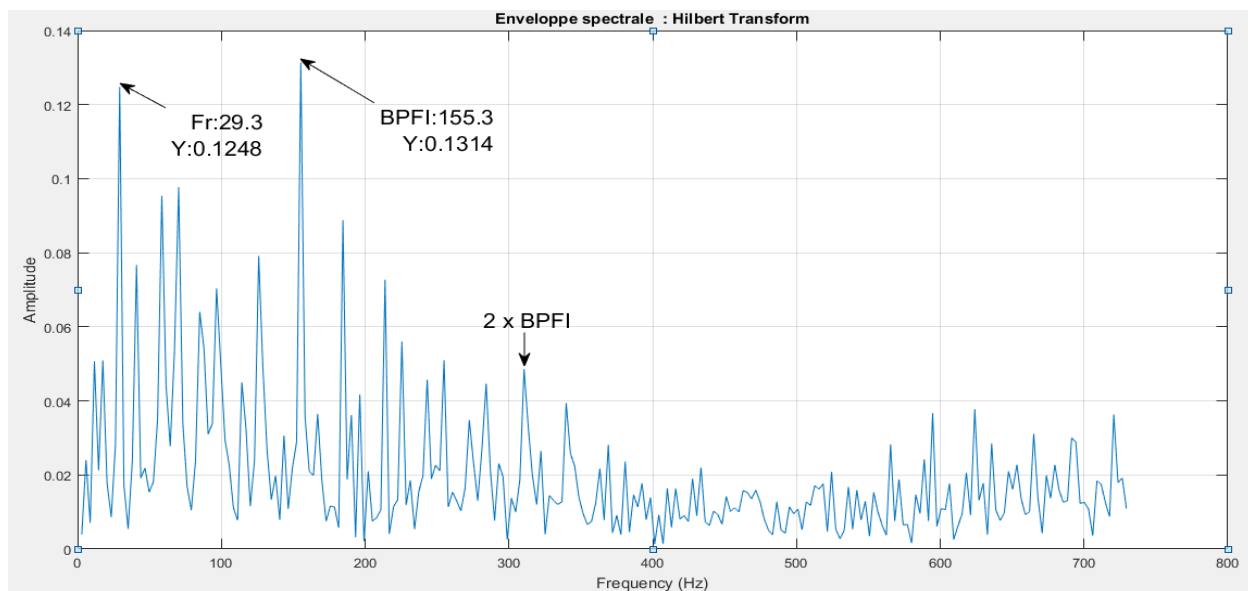


Figure IV.12: enveloppe du défaut de bague intérieure avec défaut 0.014 mm.

CHAPITRE IV: APPLICATION DE LA METHODE D'ENVELOPPE POUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE ROULEMENTS

Sur ce spectre, il apparait clairement une série de pics, celle-ci correspond à la présence de défaut dans les roulements. Ces harmoniques se répètent à des intervalles égaux. Avec ces seules informations, la présence du défaut de bague intérieure est détectée.

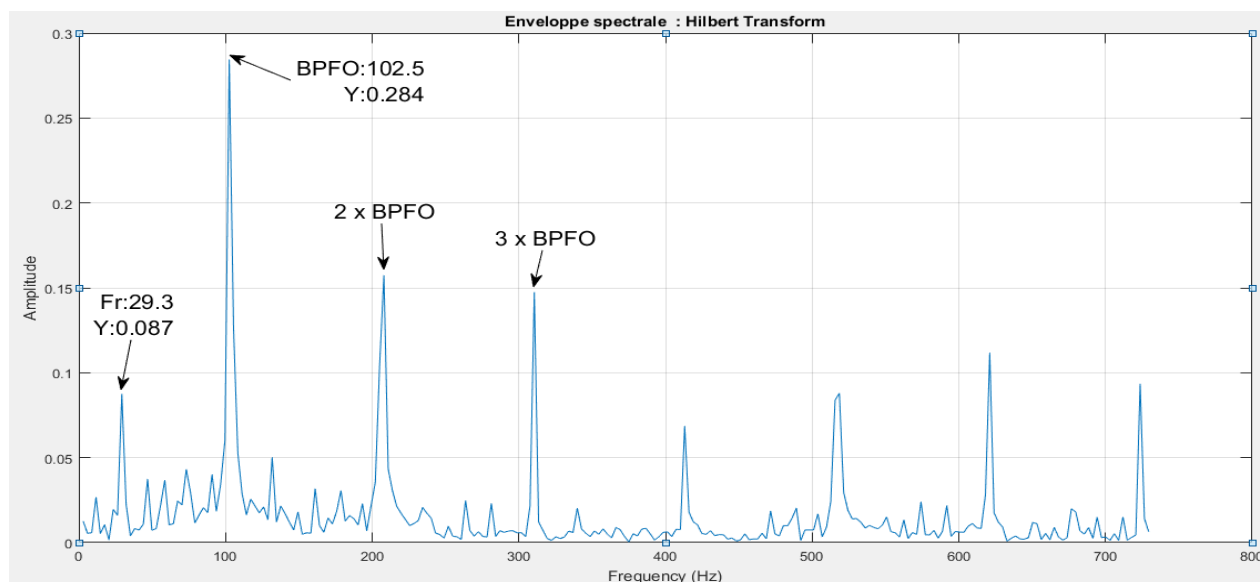


Figure IV.13: enveloppe du défaut de bague extérieure avec défaut 0.007 mm.

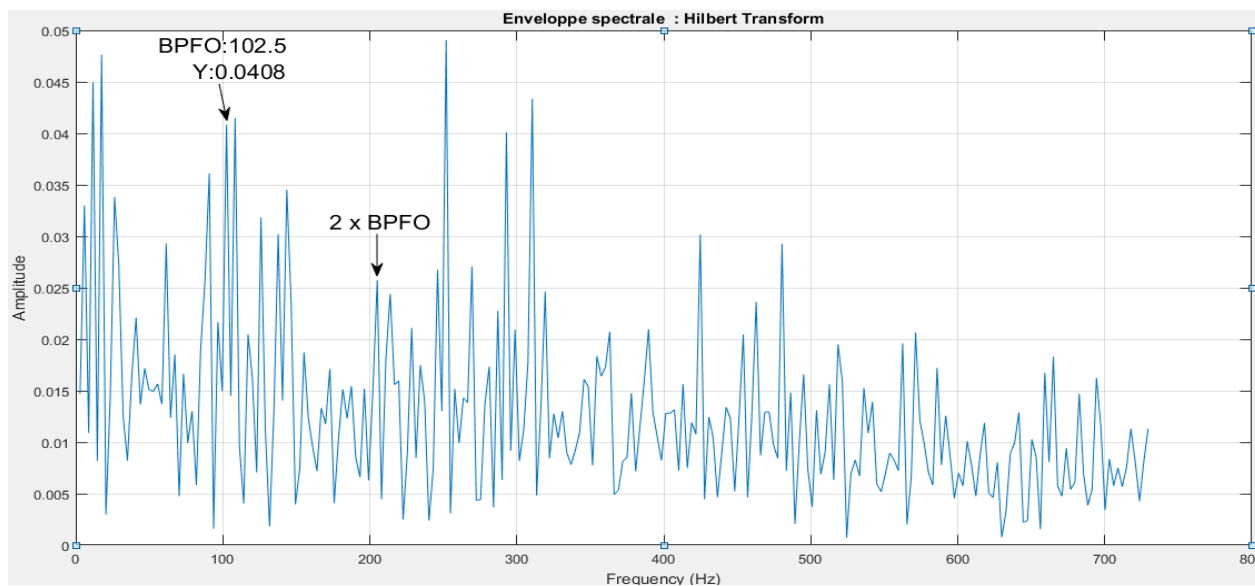


Figure IV.14 : enveloppe du défaut de bague extérieure avec défaut 0.014mm.

IV.5 Conclusion :

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).

A la fin de ce chapitre on peut dire que ce travail a permis :

- d'analyser les stratégies de maintenance
- permettant d'identifier les défauts des roulements utilisés dans les machines tournantes, dans le but de présenter une méthodologie pour la détection et l'analyse des défaillances dans des roulements.
- prévoyant l'amélioration de la maintenance prédictive pour le secteur industriel.
- Plusieurs techniques d'analyse des vibrations sont utilisées pour évaluer les conditions de la surveillance des machines. Dans cette étude, les signaux de vibration dans le domaine temporel, le domaine fréquentiel et les caractéristiques de fréquence des défauts des éléments constitutifs des roulements sur les bagues interne, externe et billes, obtenant quelques résultats intéressants.

En revanche, avec l'analyse d'enveloppe les résultats sont certainement meilleurs, car la fréquence de rotation du moteur et les fréquences caractéristiques ainsi que leurs harmoniques sont claires sur le spectre.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Selon notre recherche bibliographique 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.

La première partie de le premier chapitre a été consacrée à l'étude théorique de notion fondamentale sur la maintenance et aussi étude consiste à faire en revue bibliographique liée au domaine du diagnostic des machines tournantes.

La deuxième partie rappelle 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 deuxième partie de notre travail a permet de donner une idée sur la conception et les différents types des défauts caractéristique du roulement.

Le troisième chapitre on a cité les différents outils de surveillance par l'analyse vibratoire (RMS, facteur crête, kurtosis.....)Et les méthodes de diagnostic (analyse fréquentiel, enveloppe.....)

Les travaux de cette étude ont été élaborés à partir d'expérimentations réalisées sur un banc d'essai, on a traités les signaux mesuré par Matlab et différentes méthodes d'analyse vibratoire tel que : analyse spectrale et l'enveloppe. Dans le domaine fréquentiel, on peut constater sur les différents zooms des spectres réalisés dans les basses fréquences, correspondant au cas sans défaut, tous les autres l'existence de plusieurs pics correspond aux fréquences des défauts de roulement et ses harmoniques. L'analyse d'enveloppe montre les harmoniques de la fréquence de rotation et l'harmonique des fréquences des défauts de roulement.

Le bon choix de la méthode de surveillance vibratoire joue un rôle très important pour réaliser un diagnostic et par conséquent la détection de n'importe quel défaut de roulement.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographies

- [1] Starr, A. (1997). A Structured Approach to the Selection of Condition Based Maintenance. 5th International Conference on FACTORY 2000 – The Technology Exploitation Process, Cambridge, UK.
- [2] Dekhane, A., Djellal, A., Boutebbakh, F., & Lakel, R. (2020, March). Cooling Fan Combined Fault Vibration Analysis Using Convolutional Neural Network Classifier. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Networking, Information Systems & Security* (pp. 1-6).
- [3] Høyland, A. & Rausand, M. (1994). System Reliability Theory – Models and Statistical Methods. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Bergman, B. & Klefsjö, B. (1996). Tillförlitlighet (In Swedish). Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.
- [5] Markeset, T. & Kumar, U. (2001). R&M and Risk-Analysis Tools In Product Design, to Reduce Life-Cycle Cost and Improve Attractiveness. Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, Philadelphia, P.A., USA.
- [6] MOBLEY, R. K. (2002). An Introduction to Predictive Maintenance, Butterworth-Heinemann. NMSU (New Mexico State University). Atomic Absorption Spectroscopy [Online]. Available: <http://www.chemistry.nmsu.edu/Instrumentation/AAS1.html>. [Accessed Nov. 15th2012].
- [7] GIRDHAR, P. & SCHEFFER, C. (2004). Oil and Particle Analysis. In: MACKAY, S. (ed.) Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance.
- [8] MOBLEY, R. K. (1999). Introduction to Vibration Analysis. Vibration Fundamentals. Butterworth-Heinemann.
- [9] Boulenger, A. Boulenger, C. Pachaud. (1998) Surveillance des machines par analyse des vibrations, du dépistage au diagnostic », AFNOR, Paris, 2ème tirage, 1998.
- [10] ANALYSE VIBRATOIRE DES MACHINES TOURNANTES
www.silanus.fr/sin/formationSTI2D/ET22A-/ET22A/Ressources/hubertfaigner.pdf
- [11] BENMOHAMED, H. (2010). Etude de l'usure des engrenages par analyse vibratoire. ANNABA: Université badjimokhtar.

- [12] Formation du Bruel & kjaer « vibration générale ».
- [13] Document vibration généralité. Brüel & Kjaervibro - Document 2001.
- [14] KALLOUCH, k. (2018). Surveillance vibratoire et interventions pratiques sur le Compresseur « SPIROS ». Annaba : Université Badji Mokhtar.
- [15] BERKOUS, H. (2017). detection des défauts d'engrenage par analyse vibratoire. Annaba : Université Badji Mokhtar
- [16] Boulenger, A., &Pachaud, C. (2003). Analyse vibratoire en maintenance, surveillance et diagnostic des machines, Edition Dunod. L'USINE NOUVELLE.
- [17] Saliou Diouf « contribution au diagnostic industriel de défauts de roulement et balourd par techniques neuronales » l'université Paris XII Val de Marne-Créteil-2007.
- [18] TOUAFEK Ishak « Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L'EMD et des ondelettes(WT) » mémoire magister. Université Ferhat Abbas Sétif 2011.
- [19] Saïd, D. (2015). *Etude et optimisation de la transformée en ondelettes pour la détection des défauts dans les roulements* (Doctoral dissertation, University of Souk Ahras).
- [20] revue mesures 754 avril 2003 « les roulements, des composants à surveille de près ».
- [21] AFNOR. Norme AFNOR X 60 - 010. Paris Afnor(1990).
- [22] SKF : fournisseur de produits et de solutions sur les marchés des roulements, des systèmes de lubrification, de la mécatronique, de l'étanchéité et des services. <http://www.skf.com/>.
- [23] «Contribution au diagnostic de machines électromécaniques exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée». Thèse de Doctorat 10 Mars 2009. [Alain Boulenger, Christian Pachaud] «Analyse vibratoire en maintenance».
- [24] Mahgoun Hafida : « Analyse non stationnaire de signaux vibratoire dans la surveillance des machines et la prévention des défaillances » Thèse de l'université Ferhat Abbas Sétif. 2013.
- [25] BOUZAOUIT Azzedine « INFLUENCE DE LA VIBRATION SUR LA DUREE DE VIE DES ROULEMENTS »Thèse Doctorat Badji Mokhtar-Annaba- doctorat de 2008.
- [26] Chimentin Xavier thèse de doctorat en mécanique « Localisation et quantification des sources vibratoires dans le cadre d'une maintenance preventive conditionnelle en vue de fiabiliser le diagnostic et le suivi de l'endommagement des composants mécaniques tournants : application aux roulements à billes » octobre 2007.
- [27] Ziani, R. (2018). *Contribution à l'analyse et à la classification automatique des défauts mécaniques* (Doctoral dissertation).

- [28] Pachaud, C., Salvetat, R., & Fray, C. (1997). Crest factor and kurtosis contributions to identify defects inducing periodical impulsive forces. *Mechanical systems and signal processing*, 11(6), 903-916.
- [29] Boulenger, A. Boulenger, C. Pachaud. (1998) *Surveillance des machines par analyse des vibrations, du dépistage au diagnostic* », AFNOR, Paris, 2ème tirage, 1998.
- [30] Parey, A., El Badaoui, M., Guillet, F., & Tandon, N. (2006). Dynamic modelling of spur gear pair and application of empirical mode decomposition-based statistical analysis for early detection of localized tooth defect. *Journal of sound and vibration*, 294(3), 547-561.
- [31] Ilyes, K. (2014). *Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificielle*. (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, Université de Badji Mokhtar, Annaba, Algérie).
- [32] Vachtsevanos G., Lewis F., Roemer M., Hess A., Wu B. (2006). *Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems*. John Wiley & Sons, Inc. 2006.
- [33] Randall, R. B. (2011). *Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications*. John Wiley & Sons.
- [34] Boulenger, A., & Pachaud, C. (2003). *Analyse vibratoire en maintenance, surveillance et diagnostic des machines*, Edition Dunod. L'USINE NOUVELLE.
- [35] Fan, X., & Zuo, M. J. (2006). Gearbox fault detection using Hilbert and wavelet packet transform. *Mechanical systems and Signal processing*, 20(4), 966-982.
- [36] Trajin, B. (2009). *Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones. Application à la surveillance des roulements à billes* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT).
- [37] Belsak, A., & Flaska, J. (2007). Detecting cracks in the tooth root of gears. *Engineering Failure Analysis*, 14(8), 1466-1475.
- [38] Mallat, S. G. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, (7), 674-693.
- [39] D. Baillie and J. Mathew, "Diagnosing rolling element bearing faults with artificial neural networks", *Acoustics Australia*, vol. 22, pp. 79-84, 1994.

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