

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira-Bejaïa

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique



# Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électromécanique  
Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

**Détection des défauts mécaniques d'une machine  
tournante à une vitesse variable**

Présenté par :

Mr. MEDJEKDOUD Ferhat

Mr. LACENE Yahia

Composition du Jury :

- |                   |           |
|-------------------|-----------|
| ❖ Mr Berboucha A. | Président |
| ❖ Mr AmriA.       | Examineur |
| ❖ Mr Imaouchen Y. | Encadreur |

Année universitaire 2019/2020

*Dédicace*

## *Je dédie ce modeste travail :*

*À mes chers parents, ma mère qui m'a encouragé, soutenu, et prié durant toute sa vie pour que je puisse réussir et attend ce moment heureux durant ces années d'études, même si elle n'est pas à mes côtés maintenant, mais je sais qu'elle vit avec moi tous ces beaux sentiments. Également à mon père qui a toujours été à mon service tout au long de ma vie scolaire.*

*À ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail, mes camarades, mes professeurs en particulier notre promoteur Mr Y. IMAOUCHEN qui nous a orienté, conseillé et qui était disponible à tout moment de besoin d'orientation, malgré les circonstances difficiles causées par la crise sanitaire. Toutes nos reconnaissances pour vous.*

*À toute ma famille, mes frères, mes proches, et mes amis (Ghanou surtout) qui m'ont encouragé et m'ont souhaité plus de succès.*

*À tous ceux que j'aime et m'aime.*

*Ferhat.*

## *Dédicace*

### *Je dédie ce travail :*

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

À mes chères sœurs, spécialement Fahima, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

À mes neveux et nièces.

À mes chers amis, pour leur appui et leur fidélité sans failles.

À toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

*Yahia.*

## SOMMAIRE

<b>DEDICACES</b> .....	I
<b>SOMMAIRE</b> .....	III
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	VI
<b>Introduction générale</b> .....	1

### Chapitre I : Identification des éléments critiques de l'équipement

1. Introduction .....	3
2. Moteur électrique .....	3
2.1. Moteur à courant continu (CC) .....	3
2.2. Moteur à courant alternatif (CA).....	4
3. Moteur asynchrone .....	4
3.1 Elémentsd'un moteur asynchrone .....	5
3.1.1 Stator .....	5
3.1.2 Rotor.....	5
3.1.3 Organes mécaniques.....	5
4. Maintenance .....	5
4.1 Définition de la Maintenance .....	5
4.2 Types de Maintenance .....	6
4.2.1 Maintenance Préventive .....	6
4.2.2 Maintenance Corrective .....	6
5. Défaillances qui sont liées aux machines tournantes .....	6
5.1 Défaillances .....	7
5.2 Classification de la défaillance.....	7
5.2.1 Classification de la défaillance par cause .....	7
5.2.1.1 Défaillances aléatoires .....	7
5.2.1.2 Défaillances systématiques .....	7
5.2.2 Classification des défaillances par impact sur les performances du système .....	8
5.3 Les défaillances de la machine asynchrone .....	8
6. Conclusion.....	9

## Chapitre II : Techniques de diagnostic des défaillances

1. Introduction .....	10
2. Sélection de l'instrumentation.....	10
2.1 Analyse de température (la thermographie infrarouge) .....	11
2.1.1 Définitions .....	11
2.1.2 Principe .....	11
2.1.3 Généralités sur l'infrarouge .....	11
2.1.3.1 Différents instruments de mesure .....	12
2.2 Analyse des huiles .....	12
2.2.1 Principe de l'analyse .....	13
2.3 L'analyse du bruit (analyse acoustique) .....	13
2.4 L'analyse vibratoire .....	13
2.4.1. Objectifs .....	14
2.4.2. Surveillance .....	14
2.4.3. Détection .....	14
2.4.4. Diagnostic .....	14
2.4.5. Outils d'analyse vibratoire .....	15
2.4.5.1. Capteurs de vibrations .....	15
3. Chaîne et matériel d'acquisition .....	16
4. Conclusion .....	16

## Chapitre III : Méthodes et techniques de traitement du signal

1. Introduction .....	18
2. Représentation des signaux .....	18
2.1. Définition d'un signal .....	18
2.2. Classification des signaux .....	19
2.2.1 Signaux déterministes .....	19
2.2.2. Signaux aléatoires .....	19
3. Techniques de traitement du signal .....	20
3.1. Analyse temporelle .....	20
3.1.1. Indicateurs classiques .....	20
3.1.2. Indicateurs scalaires .....	21
3.1.3. Indicateurs scalaires les plus fréquents .....	21

3.2. Analyse dans le domaine fréquentiel .....	22
3.2.1. Analyse fréquentielle .....	22
3.2.2. Analyse d'enveloppe .....	23
3.3. Analyse temps - fréquence .....	23
3.3.1. Transformée de Fourier à court terme .....	23
3.4. Analyse temps – échelle .....	24
3.4.1 Transformation en ondelettes continues.....	24
3.5. Analyse des ridges.....	25
4. Conclusion .....	25

## **Chapitre IV : Détection des défauts des roulements d'une machine tournante lors de charge ou de vitesse variables**

1. Introduction .....	26
2. Détermination des fréquences caractéristiques du défaut .....	26
3. Diagnostic des défauts de roulement lors de charge variable .....	27
3.1. Description de banc d'essai .....	27
3.2. Traitement des signaux vibratoires mesurés .....	28
3.2.1. Cas de roulement sans défaut .....	28
3.1.2. Cas de défaut bague externe des roulements à différentes charges .....	29
3.1.3. Cas de défaut bague interne des roulements à différentes charges .....	31
4. Diagnostic des défauts des roulements lors de vitesse variable .....	33
4.1. Description de banc d'essai .....	33
4.2. Marche de la machine en absence de défaut .....	34
4.2.1. Avec une vitesse constante .....	34
4.3. Démarrage en présence de défaut .....	35
4.4. Arrêt en présence de défaut .....	36
5. Conclusion.....	37
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>39</b>
<b>Références bibliographique .....</b>	<b>41</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1</b> : Moteur asynchrone .....	4
<b>Figure 1.2</b> : Classification de la défaillance en fonction de sa cause .....	8
<b>Figure 2.1</b> : Défaut mauvais serrage .....	12
<b>Figure 2.2</b> : Défaut de roulement .....	12
<b>Figure 2.3</b> : Accéléromètre piézoélectrique .....	15
<b>Figure 2.4</b> : Réponse en fréquence d'un capteur Piézoélectrique .....	16
<b>Figure 2.5</b> : Chaîne d'acquisition .....	16
<b>Figure 3.1</b> : Signal physique .....	19
<b>Figure 3.2</b> : Exemple d'un signal aléatoire .....	20
<b>Figure 4.1</b> : Diamètres des roulements (a) roulement à bille (b) roulement à rouleaux.....	26
<b>Figure 4.2</b> : Les bagues des roulements défectueuses : (a) externe et (b) interne .....	27
<b>Figure 4.3</b> : Analyse de signal vibratoire mesuré avec roulement sain : (a) signal, (b) son spectre et (c) son spectre d'enveloppe.....	29
<b>Figure 4.4</b> : Spectres d'enveloppe du signaux mesurés pour chaque charge (0 à 7) en présence et absence de défaut de bague externe.....	30
<b>Figure 4.5</b> : Courbe de la sévérité des vibrations créées par la défaillance (bague externe) en fonction de la charge .....	31
<b>Figure 4.6</b> : Spectres d'enveloppe du signaux mesurés pour chaque charge (0 à 7) en présence et absence de défaut de bague interne .....	32
<b>Figure 4.7</b> : Courbe de la sévérité des vibrations créées par la défaillance (bague interne) en fonction de la charge .....	33
<b>Figure 4.8</b> : Banc d'essai de l'ÉTS de Montréal .....	33
<b>Figure 4.9</b> : Analyse du signal vibratoire mesuré en absence de défaut, .....	34
<b>Figure 4.10</b> : Analyse du signal vibratoire mesuré au démarrage de la machine en présence de défaut, .....	35
<b>Figure 4.11</b> : Analyse du signal vibratoire mesuré à l'arrêt de la machine en présence de défaut, .....	37

## Introduction générale

L'activité de maintenance des installations industrielles fait appel depuis une vingtaine d'années à des techniques de diagnostic de plus en plus sophistiquées. Parmi celles-ci on peut citer la thermographie infrarouge, pour la détection de défauts d'origine électrique ou mécanique, l'analyse des huiles pour le suivi de dégradation et la contamination des fluides hydrauliques ainsi que l'évaluation du stade d'usure des pièces mécanique, la détection ultrasonore et l'analyse des vibrations mécaniques.

En maintenance conditionnelle, l'analyse vibratoire est couramment utilisée pour le diagnostic des machines tournantes et fait appel à des outils de traitement du signal qui ont vu leur champ d'application s'élargir d'année en année. Il existe plusieurs techniques pour mettre en œuvre les outils classiques de traitement du signal vibratoire, tels que la transformée de Fourier (pour le tracé et l'analyse du spectre), la transformation de Hilbert, (utilisée pour la recherche démodulations d'amplitude et/ou de fréquence), ainsi que le calcul d'indicateurs scalaires tels que la valeur efficace, le facteur crête et kurtosis.

L'un des problèmes les plus importants parmi ceux que pose la maintenance par analyse vibratoire est celui du diagnostic des roulements (les pièces les plus sensibles dans une machine tournante). On retrouve ces composants mécaniques dans de nombreuses machines tournantes compte tenu de leur simplicité et leur capacité à éviter les frottements mécaniques. La détection de pannes de ces roulements se fait en analysant les vibrations enregistrées avec des accéléromètres mis en place pour le diagnostic.

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

Le 1<sup>er</sup> chapitre expose les parties composant une machine électrique tournante, ensuite donne un aperçu sur les défaillances qui sont liées. Dans le 2<sup>ème</sup> chapitre, nous présentons l'état de l'art sur le diagnostic industriel et les différentes méthodes utilisées pour la détection des défauts qui existent couramment dans l'industrie. Dans le 3<sup>ième</sup> chapitre, nous étalons les



différentes méthodes de traitement de signal les plus utilisées pour le diagnostic et la détection des défauts. Dans le 4<sup>ème</sup> chapitre, nous appliquons certaines méthodes de traitement de signal, l'analyse spectrale et l'analyse temps-fréquence. Dans cette partie, nous analysons quelques signaux mesurés sur des machines avec des roulements à l'état défaillant et on les compare avec ceux mesurés dans l'état sain afin de détecter et identifier ces défauts et suivre l'évolution de ces derniers.

# Chapitre 1 : Identification des éléments critiques de l'équipement

## 1 Introduction

Les machines tournantes occupent actuellement une place prépondérante dans les applications faisant intervenir des systèmes de transmission de puissance. La mesure des vibrations sur ces machines revêt une importance toute particulière puisqu'elle joue un rôle capital dans les programmes de maintenance. Lorsque ces vibrations sont trop élevées, elles causent souvent un sentiment d'inquiétude, puisqu'elles annoncent probablement un arrêt ou un bris imprévu et par conséquent une perte non négligeable de productivité ou une atteinte à la sécurité du personnel. Les vibrations des machines tournantes sont dues à plusieurs forces dynamiques, y compris celles dues aux conditions anormales de fonctionnement ou à divers défauts [1]. Afin de cerner les forces dynamiques agissant sur la machine étudiée dans ce projet, nous présentons d'abord les constituantes de cette machine ainsi que les défaillances susceptibles d'apparaître en fonctionnement.

## 2. Moteur Electrique

C'est une machine électrique, un dispositif électromécanique fondé sur l'électromagnétisme permettant la conversion d'énergie électrique par exemple en travail ou énergie mécanique.

Il existe deux types de moteurs électriques :

### 2.1 Moteur à courant continu (CC)

Les moteurs à courant continu représentent le premier type de moteur largement utilisé, et les coûts initiaux des systèmes (moteur et variateur) ont tendance à être moins élevés que les systèmes à courant alternatif pour des appareils de faible consommation, mais avec des appareils de plus grande consommation, les frais d'entretien généraux augmentent et devraient être pris en compte[2].

Il se compose de :

- Moteur à excitation série
- Moteur à excitation sépare

- Moteur a excitation shunt.

## 2.2 Moteur à courant alternatif (CA)

Les moteurs à courant alternatif font preuve d'une grande souplesse en termes de fonctionnalités, comme notamment le contrôle de vitesse et sont largement employés dans l'industrie [2].

Il est devisé en deux types :

- Moteur synchrone
- Moteur asynchrone (moteurs à induction)

Nous nous concentrerons sur le moteur asynchrone. En effet, cette machine électrique représente une part importante (près de 80 % des moteurs sont des machines à induction) des chaînes de production dans les parcs industriels [3].

## 3.Moteur asynchrone

La machine asynchrone est par excellence la machine la plus répandue dans l'industrie. Actuellement, elles sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet intérêt croissant est justifié par de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc [4].

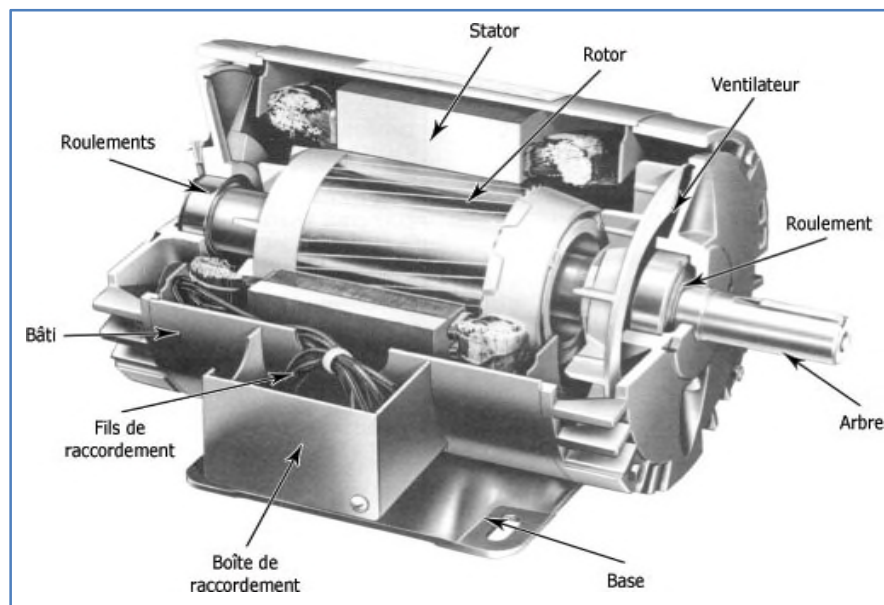


Figure 1.1 Moteur asynchrone [4]

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction[3], comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit 2 types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil[4].

### **3.1 Éléments d'un moteur asynchrone**

#### **A. Stator**

Le stator d'une machine asynchrone, également appelé l'inducteur, est constitué généralement de trois phases (composées elles-mêmes de bobines) alimentées par un système de tension triphasée de fréquence. Celui-ci possède un cylindre ferromagnétique entaillé d'encoches dans lesquelles viennent se loger les enroulements [3]. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine.

Le bobinage statorique peut se décomposer en 2 parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [5].

#### **B. Rotor**

Le rotor, également appelé l'induit, peut se présenter de deux manières différentes. En effet, il y a les rotors à cage d'écureuil et les rotors bobinés [3]. Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service [6].

#### **C. Organes mécaniques :**

La carcasse sert de support. Elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement[6].

## **4.Maintenance**

#### **4.1 Définition de la Maintenance**

La maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifique ou en mesure d'assurer un service déterminé [7].

Dans une entreprise maintenir c'est donc effectuer des opérations (dépannage réparation, graissage, contrôle, ...etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la production avec efficacité et qualité [5].

#### **4.2 Types de Maintenance**

La maintenance se divise en deux catégories principales [8] :

- ✓ La maintenance préventive ;
- ✓ La maintenance corrective ;

##### **4.2.1 Maintenance Préventive**

Elle a pour objet de réduire la probabilité de défaillances c'est-à-dire la décision d'intervenir précède l'apparition du dysfonctionnement [8].

Il existe deux groupes de maintenance préventive :

- La maintenance systématique ;
- La maintenance conditionnelle ;

##### **4.2.2 Maintenance Corrective :**

A son tour, est l'ensemble des activités réalisées après la panne du système. Elle a pour but de remettre la machine ou le système en état de marche [8].

Cette maintenance corrective peut être :

- Palliative ;
- Curative ;

### **5. Défaillances qui sont liées aux machines tournantes**

Dans le milieu industriel, les systèmes de production sont de plus en plus complexes et ne peuvent être exempts de perturbations et de défaillances, influant sur la qualité du produit, pouvant provoquer l'arrêt immédiat d'une machine et porter atteinte au bon fonctionnement d'un système de production entier [1].

## 5.1 Défaillances

En dit défaillance quand un défaut apparaît, c'est un écart entre ce qui devrait être et ce qui est. Pour mettre en place une politique de maintenance efficace, il importe de comprendre les phénomènes de dégradation et de défaillance de matériels.

## 5.2 Classification de la défaillance

Ces classifications portent sur les causes des défaillances, leurs impacts sur les performances du système.

### 5.2.1 Classification de la défaillance par cause

Cette classification distingue les défaillances dites aléatoires et des défaillances dites systématiques.

#### A. Défaillances aléatoires :

Les défaillances aléatoires sont des défaillances physiques pour lesquelles les performances du système diminuent à cause d'une dégradation physique. Dans les défaillances aléatoires, on distingue :

- Les défaillances liées à la dégradation du système.
- Les défaillances liées au environnement extérieur

#### B. Défaillances systématiques :

Les défaillances systématiques ne sont pas physiques. Les performances du système diminuent alors que ce dernier n'est physiquement pas dégradé. Ces défaillances peuvent être éliminées uniquement par une modification de sa conception ou du processus de fabrication, des procédures d'opération ou la documentation [8]. On distingue :

- Les défaillances liées à la conception ;
- Les défaillances liées aux interactions.

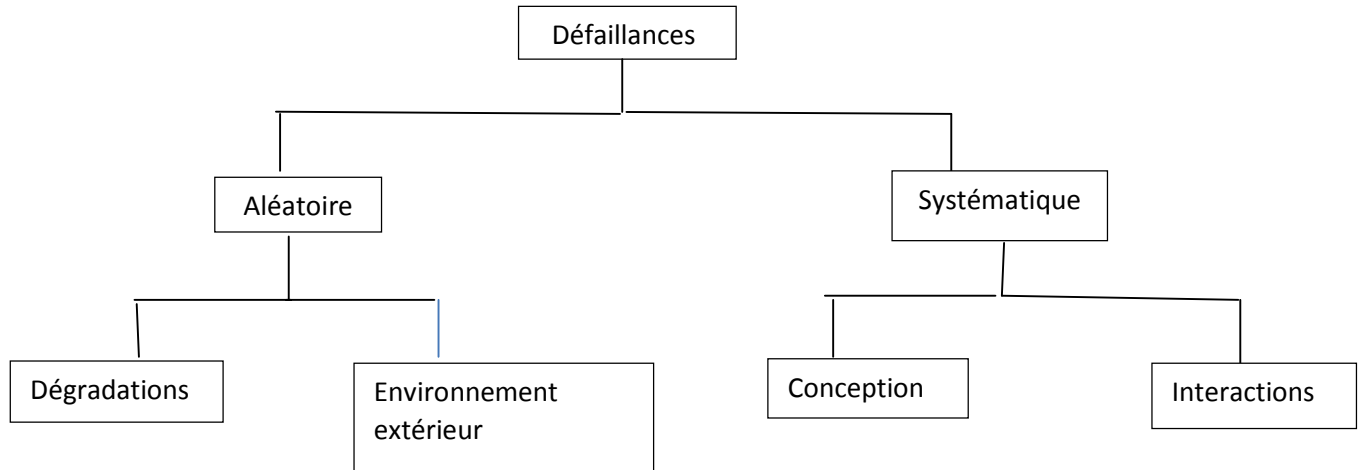


Figure 1.2 Classification de la défaillance en fonction de sa cause [8]

### 5.2.2 Classification des défaillances par impact sur les performances du système

On peut également classer les défaillances en fonction de leurs impacts sur les performances du système.

**A. Défaillances intermittentes** :elles résultent d'une perte de certaines des fonctions pour une très courte durée dans le temps. Le bloc fonctionnel retrouve ses performances d'opération tout de suite après la défaillance c'est-à-dire le système retrouve son aptitude à sa fonction requise sans avoir été soumis à une action corrective extérieure.

**B. Défaillances étendues** :elles résultent d'une perte de certaines des fonctions qui perdure dans le temps jusqu'à ce que le bloc fonctionnel soit remplacé ou réparé. On trouve pour les défaillances étendues les défaillances complètes et défaillances partielles.

Ces deux défaillances (défaillances complètes et défaillances partielles) peuvent elles-mêmes être divisées en deux types : défaillances soudaines et défaillances graduelles. [4]

### 5.3 Défaillances de la machine asynchrone

Les défaillances peuvent être d'origines diverses : électriques, mécaniques, thermiques ou bien encore magnétiques.

Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en 3 groupes :

- ✓ **Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts** : Surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- ✓ **Les amplificateurs de défauts** : Surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.
- ✓ **Les vices ou défauts de fabrication et les erreurs humaines** : Défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, ...etc [4].

## 6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter de manière générique le domaine des machines tournantes, ainsi que les éléments critiques des équipements et apprécier leur importance et la criticité de leurs applications. Nous avons aussi vu de près un nombre important et non exhaustif de défaillances pouvant altérer leurs fonctionnements. Pour l'exploitation optimale de ces machines, une surveillance accrue de leurs conditions de fonctionnement est souvent nécessaire. Pour cela, plusieurs techniques existent, dont un bon nombre est décrit au prochain chapitre, avec une attention particulière donnée aux techniques à base de surveillance et diagnostic par analyse vibratoire.



## Chapitre 2 : Techniques de diagnostic des défaillances

### 1 Introduction

Les machines tournantes, telles que les moteurs et les générateurs, sont des composants essentiels des applications industrielles et de production d'énergie. La disponibilité et la fiabilité des machines sont cruciales pour garantir une alimentation électrique fiable. Une défaillance prématurée peut entraîner des pertes économiques substantielles, en raison de coupures non planifiées et d'éventuels dommages sur l'installation elle-même.

Comme les autres équipements haute tension, les systèmes d'isolation dans les générateurs et les moteurs sont soumis à des processus de vieillissement. Un vieillissement excessif peut provoquer une défaillance. C'est pourquoi il est important de connaître l'état de l'isolation de ces machines électriques pendant toute leur durée de vie.

Plusieurs méthodes de diagnostic en ligne et hors ligne utilisées lors des tests de réception en usine, lors des tests de mise en service ainsi que lors des opérations de maintenance effectuées durant le fonctionnement des machines tournantes permettent une évaluation fiable de l'état de l'isolation.

Nous vous proposons la solution de test et de surveillance adaptée à toutes ces méthodes de diagnostic. Cette solution permet d'évaluer rapidement et avec précision l'état de l'isolation d'un grand nombre de machines électriques, afin d'identifier au plus vite les problèmes et les risques potentiels [9].

### 2. Sélection de l'instrumentation

Une fois les équipements critiques devant subir un entretien prédictif auront été sélectionnés, il faudra choisir le type d'instrumentation le plus apte à décrire l'évolution du défaut, parmi les techniques de surveillance envisageables [10], il y a :

- ❖ L'analyse de température (Le suivi de l'échauffement de la machine).
- ❖ L'analyse des huiles lubrifiants (le suivi des particules d'usure dans l'huile).
- ❖ L'utilisation des ultrasons.
- ❖ L'analyse du bruit.

- ❖ L'analyse vibratoire (le suivi et les analyses vibrations).

## **2.1 Analyse de température (la thermographie infrarouge)**

### **2.1.1 Définitions**

La thermographie infrarouge est une technique rapide et sans contact, elle permet de mesurer la luminance et d'établir une cartographie de la température et de suivre son évolution dans le temps [10]. Elle part du principe que tout corps dont la température est supérieure à 0°C émet une énergie sous forme de rayonnement électromécanique. Un défaut sur un équipement se traduit toujours par une élévation de température. Cette élévation, si elle ne se voit pas dans le visible, apparaît instantanément dans l'infrarouge, ainsi, la thermographie infrarouge est une technologie efficace de maintenance prédictive pour localiser les problèmes rapidement, en toute sécurité. Avec la thermographie infrarouge on peut visualiser les défauts avant qu'une panne sur les installations ne se produise et qu'elle ait des conséquences fâcheuses, perturbation ou arrêt de la production jusqu'à un début d'un incendie dans le pire des cas [5].

### **2.1.2 Principe**

Jusqu'alors réservée au contrôle d'installations électriques, la thermographie infrarouge suscite un intérêt encore récent dans le domaine de la maintenance. Elle est depuis peu utilisée dans la surveillance des machines pour détecter les défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement. La thermographie permet de réaliser des mesures à distance et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée [11].

### **2.1.3 Généralités sur l'infrarouge**

On parle d'ultraviolet, fréquence au-delà du violet, alors que la longueur d'onde du violet est plus courte. On parle aussi d'infrarouge, fréquence en delà du rouge, alors que la longueur d'onde du rouge est plus longue. C'est à dire que l'infrarouge est moins puissant, moins énergétique que l'ultraviolet. En parlant en longueur d'onde, l'infrarouge se situe donc au-delà de 0,8  $\mu\text{m}$ , et il regroupe les longueurs d'onde des rayonnements de la matière plus froide que celle chaude comme la lampe à incandescence, est vue directement avec nos yeux. Nous ne voyons donc pas le rayonnement infrarouge avec nos yeux. La lampe dite "infrarouge" est moins alimentée que la lampe à incandescence normale : elle consomme moins d'énergie et est donc plus froide. Elle est conçue pour émettre principalement dans l'infrarouge, pour chauffer moins qu'une lampe normale. Ainsi, la thermographie est rapide, tout autant que sa

mise en œuvre, elle procure une vision immédiate, globale et discriminative. C'est une méthode puissante de vision du froid, du plus chaud ou du plus froid. [12]

### 2.1.3.1 Différents instruments de mesure

#### ❖ Le thermomètre infrarouge

Les thermomètres infrarouges sont particulièrement recommandés dans des domaines où la mesure de température par contact est impossible.

Nous avons quelques exemples de défauts détectés par caméra infrarouge :

#### ✓ Installation électrique

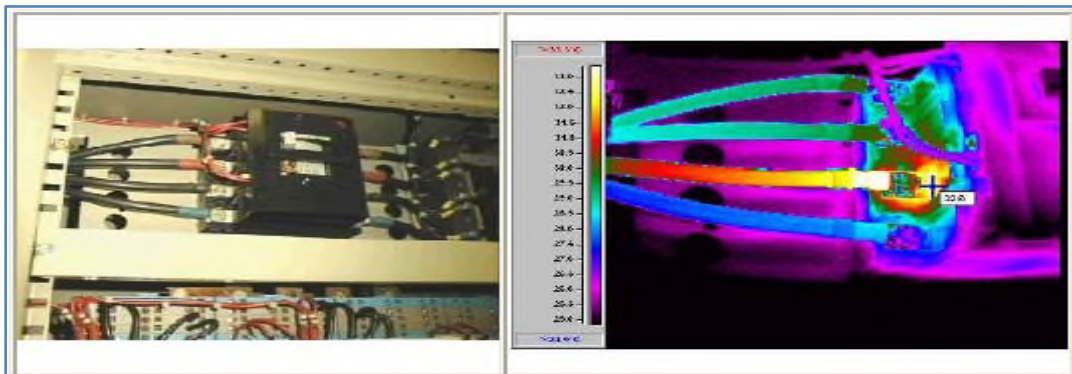


Figure 2.1 défaut mauvais serrage [9]

#### ✓ Installation mécanique

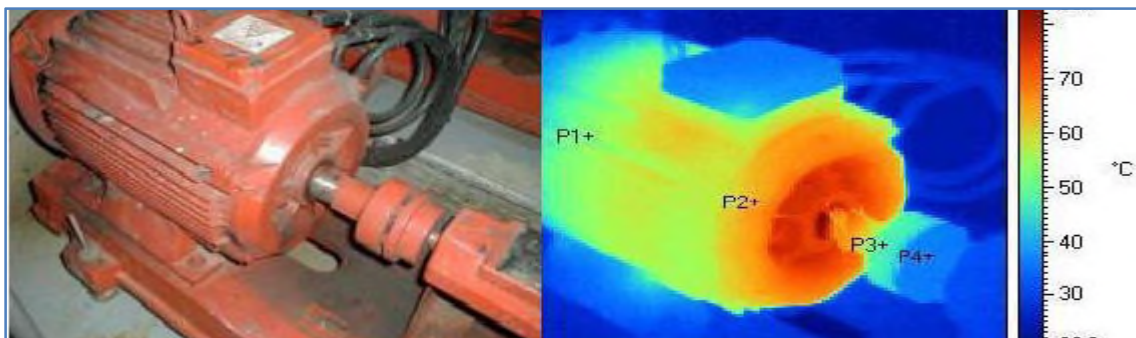


Figure 2.2 Défaut de roulement [12]

## 2.2 Analyse des huiles

L'huile permet de remplacer le contact métal-métal des surfaces en mouvement par un contact métal-liquide [10], Le rôle principal du lubrifiant est d'assurer un contact fluide entre les différents composants d'une machine et ainsi diminuer le risque d'usure. Il peut aussi assurer d'autres tâches telles que le refroidissement, la protection contre la rouille et la corrosion, mais aussi le contrôle non destructif de l'état de fonctionnement de la machine [1].

### **2.2.1 Principe de l'analyse**

Le principe de la surveillance des lubrifiants repose sur le prélèvement représentatif de leur charge dans un système en fonctionnement afin de réaliser une éventuelle analyse pour une détermination de niveaux de dégradation et de contamination. Une comparaison des résultats obtenus avec ceux des prélèvements antérieurs permet de suivre l'évolution de ces lubrifiants afin d'en déduire l'état de santé d'un équipement de production consiste à détecter les particules d'usure drainées par le lubrifiant afin d'en déduire l'état de l'équipement [1, 5]. L'analyse d'un échantillon de quelques dizaines de millilitres d'huile peut alors suffire à révéler l'usure anormale de l'un des composants, le mauvais état d'un filtre ou encore la dégradation du lubrifiant suite à une oxydation, à une pollution, à une température d'utilisation trop élevée [11].

### **2.3 Analyse du bruit (analyse acoustique)**

Le changement de bruit est souvent un phénomène crée par une défaillance et la mesure du bruit des machines par mesure de vibration [10].L'analyse acoustique, permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés (le plus souvent) à distance de l'équipement, ou le contrôle ultrasonore, qui permet de détecter des défauts. De faible amplitude à haute fréquence. Cette méthode permet également au contrôleur de déterminer les conditions de fonctionnement des équipements telles que :

- ✓ Les conditions de lubrification (trop, pas assez, graisse sale,).
- ✓ Les degrés d'usure
- ✓ Les vibrations

Ces informations sont interprétées par le contrôleur qui dispose d'un casque d'écoute et d'une indication numérique et sont transformées, par la base de données, en consignes de maintenance (degré d'urgence). A titre d'information, de nombreuses enquêtes ont été réalisées en 1999 auprès d'utilisateurs industriels dans de multiples domaines. Avec leur aimable permission de reproduire les résultats de leurs enquêtes [12].

### **2.4 Analyse vibratoire**

Est la plus connue et là plus largement employée. Il faut dire qu'elle permet à elle seule de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement, un roulement usé ou endommagé...Les variations efforts générés par la rotation des éléments sont souvent la cause des vibrations qui peuvent

endommager les composants des machines. La mesure de ces vibrations va permettre d'identifier ces efforts dès qu'ils apparaissent, avant qu'ils aient causé de dommage irréversible. Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée [11].

#### **2.4.1 Objectifs**

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- ❖ La détection des défauts
- ❖ L'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés, soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel ou bien dans les deux à la fois [7].

#### **2.4.2 Surveillance**

La comparaison des mesures vibratoires effectuées à intervalles de temps déterminés dans des conditions de fonctionnement identiques permet de suivre l'évolution d'un défaut en exploitant le signal vibratoire. A partir de ces mesures, il est possible d'obtenir un historique de l'évolution du défaut par rapport à un niveau de référence caractérisé par la signature vibratoire de la machine en bon état. La norme [ISO10816] fixe des critères d'évaluation des niveaux vibratoires permettant d'estimer la sévérité des défauts et donc de l'état de fonctionnement de la machine. La sévérité vibratoire représente la valeur efficace de la vitesse de vibration mesurée dans la bande fréquentielle [10-1000 Hz] sachant que les critères d'évaluation dépendent de la classe dans laquelle la machine se situe. Mais ces méthodes dites « mesures des niveaux globaux » restent imprécises et ne permettent pas la détermination de la cause de l'augmentation du niveau vibratoire [13].

#### **2.4.3 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 [11].

#### **2.4.4 Diagnostic**

Pour établir un diagnostic vibratoire, il est souvent nécessaire de faire appel à des outils mathématiques relativement élaborés [7]. Il permet de désigner l'élément défectueux de la machine suite à une évolution anormale des vibrations constatées lors de la surveillance. Le diagnostic n'est réalisé que lorsque la surveillance a permis la détection d'une anomalie ou

d'une évolution dangereuse du signal vibratoire, le diagnostic dans la majorité des cas est établi en interprétant les signaux vibratoires émis par la machine en fonctionnement. [11]

## 2.4.5 Outils d'analyse vibratoire

### 2.4.5.1 Capteurs de vibrations

Le capteur le plus utilisé est l'accéléromètre piézo-électrique. Il est constitué d'une masselotte placée sur un cristal piézo-électrique dont les deux faces opposées ont été rendues conductrices par dépôt métallique (figure 2.3). Il possède une très bonne linéarité et une large bande passante. Un capteur monodirectionnel collé sur la paroi d'un bâti mesurera les accélérations normales à celle-ci. Sa masse, bien que légère (environ 20 g), influence malgré tout toutes les mesures, car sur des parois de grandes dimensions et relativement peu épaisses, une masselotte ajoutée peut faire diminuer les fréquences propres de quelques pour cent.

La fixation du capteur sur la structure peut avoir une réelle influence sur la qualité du signal recueilli. Il peut être fixé de diverses façons sur la machine : vissé à même la structure, vissé sur une embase collée, magnétique pour les structures ferriques, ou accolé avec une pointe touche. Cette fixation joue un rôle important sur le résultat des mesures, et la largeur de bande peut s'en trouver affectée. [14]

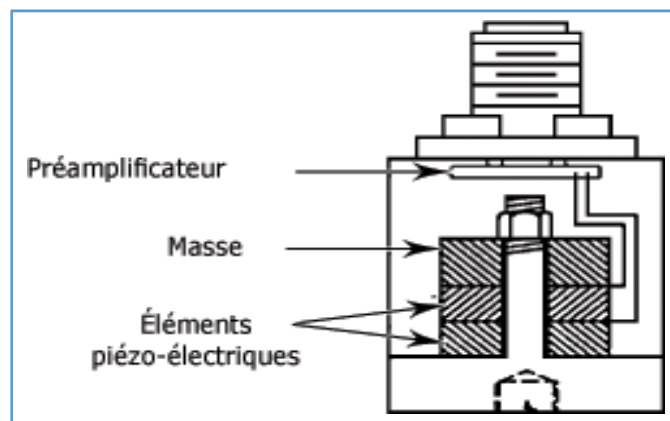


Figure 2.3 Accéléromètre piézoélectrique [9]

Afin que la reproductibilité et la fiabilité des mesures soient bonnes, même en basses fréquences de 0 à 2 kHz et de 0 à 7 kHz (figure 2.4), il reste préférable d'utiliser des embases collées (cyanoacrylate de méthyle). L'accéléromètre doit être placé en des endroits (pas toujours accessibles) de la structure où la mobilité est maximale pour la bande de fréquences étudiée. La tendance actuelle est toujours de placer le capteur au plus près du composant à suivre, ainsi en limitant les distances et les contacts, le signal s'en trouve moins perturbé.

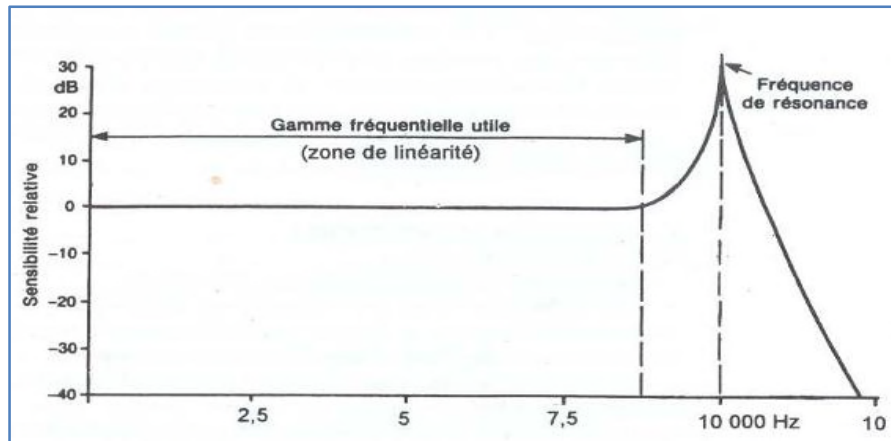


Figure 2.4 Réponse en fréquence d'un capteur Piézoélectrique [5]

### 3 Chaîne et matériel d'acquisition

Une surveillance fiable ne peut être obtenue que si d'une part le matériel de mesure est en adéquation avec les caractéristiques vibratoires fournies par les machines et si d'autre part les données le sont avec les outils de post-traitement qui doivent en faciliter le diagnostic. Il est indispensable de posséder un matériel d'analyse des vibrations qui peut être constituée des éléments suivants : en plus de la structure à étudier, des capteurs (Les capteurs doivent être placés sur un certain nombre de points choisis judicieusement, c'est à dire le plus proche possible des sources de vibrations et dans une direction donnée, si ces sources sont connues et si la structure le permet), conditionneur, pot vibrant ou marteau d'impact, analyseur et programme d'analyse modale, sont nécessaires, comme le montre la figure 2.5 ci-dessous [7] :

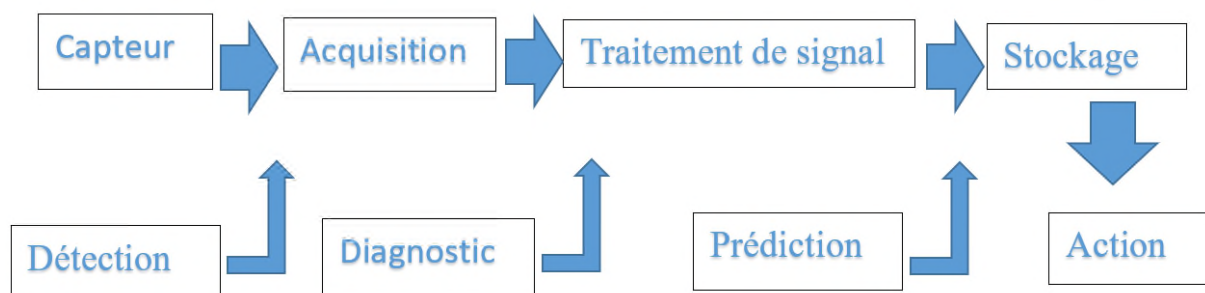


Figure 2.5 Chaîne d'acquisition

### 4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, des généralités sur les différentes méthodes et modèles de diagnostic utilisés en maintenance pour identifier ou localiser l'origine des défauts ou des

défaillances détectées sur le procédé. Nous avons donné quelques notions et définitions de base utilisés dans le domaine de diagnostic.

Chaque technique est basée sur un aspect théorique différent et les résultats obtenus sont généralement distincts. Parmi ces techniques de diagnostic, l'analyse vibratoire a montré son efficacité et reste la méthode la plus couramment utilisée dans le domaine de surveillance et de diagnostic des défaillances. Le prochain chapitre énumère les différentes techniques de traitement du signal utilisées pour l'analyse des mesures vibratoires issues des machines tournantes.



## Chapitre 3 : Méthodes et techniques de traitement du signal

### 1 Introduction

Le choix des méthodes de traitement de signal a fait l'objet de plusieurs études ces dernières années. En analyse temporelle, l'étude est basée sur l'évolution des signaux vibratoires dans le temps. Dans ce type d'analyse, figurent en premier lieu les grandeurs statistiques telles que : la valeur moyenne, la valeur efficace ...etc. Les approches portant sur le domaine fréquentiel sont basées sur l'analyse par la transformation de Fourier (TF), d'où ont découlé différentes techniques telles que la Densité Spectrale de Puissance (DSP), le cepstre, et l'analyse d'enveloppe ou transformée de Hilbert. Les analyses dans le domaine temps-fréquence permettent de représenter dans ces deux espaces les signaux non stationnaires. Dans cette catégorie, à part la Transformation de Fourier à Courts-Terms (TFCT), opération à partir de laquelle est déterminé le spectrogramme, la distribution d'énergie de Wigner-Ville constitue une méthode d'analyse assez utilisée en traitement du signal. Enfin, la décomposition en ondelettes ou analyse en temps-échelle, figure dans la quatrième catégorie.

Ce chapitre décrit les principes et les techniques d'analyse dans le cadre de diagnostic vibratoire des machines tournantes (pompes, moteurs, arbres ...etc.).

### 2. Représentation des signaux

#### 2.1 Définition d'un signal

Un signal expérimental est une grandeur physique est la représentation physique de l'information, qu'il convoie de sa source à son destinataire. La description mathématique des signaux est l'objectif du traitement du signal. Elle offre les moyens d'analyser, de concevoir et de caractériser des systèmes de traitement de l'information. Et doit donc être physiquement réalisable. Les mesures macroscopiques analogiques, réalisées à partir d'appareils de mesures comme un oscilloscope, fournissent des courbes « tension en fonction du temps » du type de celle représentée sur la figure 3.1. Ces signaux physiques sont représentés par des fonctions  $s(t)$  à valeurs réelles d'une variable réelle  $t$  [15].

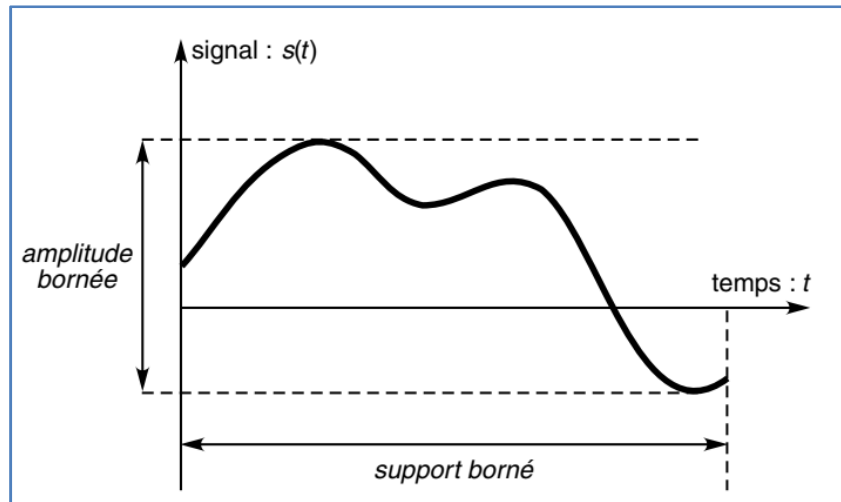


Figure 3.1 signal physique [15]

## 2.2 Classification des signaux

Les techniques utilisées pour traiter des signaux ou analyser la réponse d'un système à un signal dépendent énormément des attributs et des caractéristiques de ces signaux. Ainsi, tout traitement du signal doit nécessairement commencer par une classification de ces signaux [15]. Qui peuvent être envisagés par :

- Représentation temporelle des signaux ;
- Caractéristique énergétique ;
- Représentation spectrale ;
- Caractéristique morphologique (continu ou discret).

### 2.2.1 Signaux déterministes

Ils sont appelés aussi des signaux certains, car ils sont parfaitement déterminés par la connaissance ou la mesure d'un nombre fini de paramètres. Ces signaux dont l'évolution en fonction du temps peut être parfaitement décrite par un modèle mathématique. Ces signaux proviennent de phénomènes pour lesquels on connaît les lois physiques correspondantes et les conditions initiales, permettant ainsi de prévoir le résultat [15, 16].

### 2.2.2 Signaux aléatoires

Un signal est dit aléatoire si ses valeurs ou réalisations dépendent du hasard et s'il ne possède pas de représentation analytique. Par contre l'observation de ce signal peut être caractérisée par des grandeurs statistiques ou fréquentielles. Le signal aléatoire ou variable aléatoire évoluant en fonction du temps (donnée continue), nous nous plaçons dans le domaine des variables aléatoires continues (infinité de valeurs déterminée par le résultat de chaque expérience ou épreuve). La plupart des signaux naturels sont aléatoires, car ils ont un

caractère non-reproductible et imprévisible, exemple de tels signaux : signaux reçus par un radar, de la parole, de l'électrocardiogramme [16].

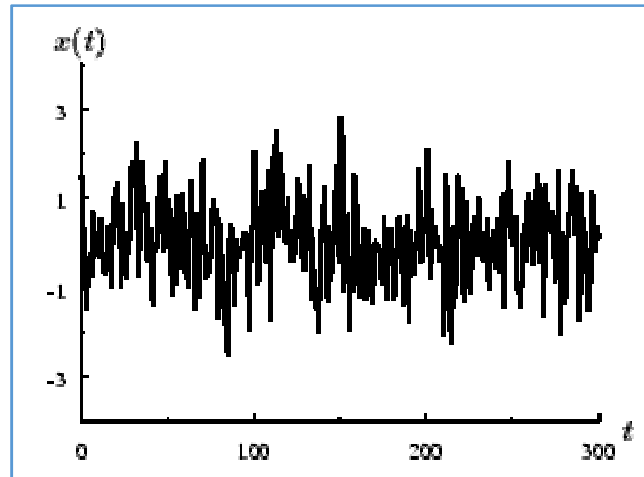


Figure 3.2. Exemple d'un signal aléatoire [16]

### 3 Techniques de traitement de signal

#### 3.1 Analyse temporelle

L'analyse temporelle permet d'extraire des paramètres indicateurs de défauts à partir des Données brutes du capteur. Elle consiste à étudier le comportement vibratoire de la machine à partir de ces indicateurs. Un indicateur temporel est une grandeur qui caractérise la puissance, l'amplitude ou la répartition des amplitudes du signal vibratoire. L'évolution de ces indicateurs est significative de l'apparition d'un défaut et donc de son aggravation. Ces indicateurs évaluent l'état de fonctionnement global des équipements mais ne localisent pas le défaut. De nombreux indicateurs existent dans la littérature et certains sont le résultat de la combinaison de plusieurs d'entre eux [17, 18].

##### 3.1.1 Indicateurs classiques

Dans le cadre d'une surveillance par indicateurs statistiques, il est possible d'utiliser les grandeurs de déplacement, de vitesse ou d'accélération de la vibration. Pour cela, des paramètres comme le RMS (RootMean Square ou Valeur Efficace), la valeur crête et l'énergie du signal vibratoire ont été largement utilisés, mais ils ne renseignent pas sur l'état de dégradation du système. De ce fait, d'autres indicateurs sont apparus à partir du RMS et de indicateurs scalaires [19].

### 3.1.2 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 [17].

### 3.1.3 Indicateurs scalaires les plus fréquents

#### a. Le facteur de crête

Le facteur de crête noté  $F_c$  est une mesure caractéristique d'un signal vibratoire. C'est le rapport entre l'amplitude du pic du signal et la valeur efficace du signal. Il est défini par [18, 19] :

$$F_c = Peak/RMS \quad (3.1)$$

Avec  $Peak$  (crête) :  $Peak = \sup_{1 < i < N} |x_i|$  (3.2)

Un système en bon état génère un signal vibratoire de faible amplitude, aussi bien en valeur crête qu'en valeur efficace. Le facteur de crête reste donc faible (entre 2 et 6). Un défaut localisé génère une vibration d'amplitude crête forte et d'amplitude efficace faible, donc un facteur de Crête important ( $> 6$ ).

#### b. Le Kurtosis

Le Kurtosis noté  $Ku$  représente le moment statique d'ordre 4. Il mesure le degré d'écrasement de la distribution du signal vibratoire enregistré et est défini comme étant le rapport entre le moment d'ordre quatre centré et le carré de la variance [18].

$$Ku = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (3.3)$$

Un système en bon état engendre un signal vibratoire avec un Kurtosis voisin de 3. Pour un système dégradé, l'amplitude du signal est modifiée et le Kurtosis devient supérieur ou égal à 4. Le défaut majeur de ce paramètre et du Kurtosis est qu'ils indiquent environ les mêmes valeurs à l'état neuf et en fin de vie du système [20].

### c. Le Skewness

Le coefficient de dissymétrie (skewness) correspond à une mesure de l'asymétrie de la distribution d'une variable aléatoire réelle [20]. Le Skewness noté  $Skew$  représente le moment statique d'ordre 3 centré sur le cube de l'écart-type. Il mesure la symétrie de la distribution, ou plus précisément le manque de symétrie. Une distribution est symétrique si elle présente la même allure de part et d'autre du signal. Il est défini comme suit [18] :

$$Skew = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.4)$$

## 3.2 Analyse dans le domaine fréquentiel

Toute anomalie affectant une machine tournante se traduit par des vibrations dont les fréquences correspondent aux fréquences d'apparition des forces les induisant et de leurs harmoniques. C'est pourquoi, pour le diagnostic, il est intéressant de décomposer le signal vibratoire mesuré en ses sinusoïdes élémentaires dont les amplitudes et les fréquences peuvent être lues [18].

### 3.2.1 Analyse fréquentielle

Faute de pouvoir représenter le signal vibratoire en fonction du temps sous une forme facilement exploitable, on a recherché à le représenter dans un diagramme amplitudes–fréquences appelé spectre [19]. L'analyse du spectre fréquentiel d'un signal est la technique la plus couramment utilisée pour identifier les défauts dans un système. Cette technique est basée sur le fait qu'un défaut localisé génère un signal périodique avec une fréquence caractéristique unique. À l'inverse de l'analyse temporelle, l'analyse fréquentielle permet d'identifier le défaut présent dans le système en identifiant sa fréquence caractéristique. Cette technique est généralement appliquée pendant le régime permanent du système. Une classique parmi les techniques utilisées dans le domaine fréquentiel est l'analyse spectrale par transformée de Fourier rapide FFT [20]. Définis par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2j\pi f t} dt \quad (3.5)$$

Son calcul pour un signal discret  $x(k)$  de longueur  $N$  est donné par :

$$X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{\frac{-2\pi m k}{N}} \quad (3.6)$$

Le contenu fréquentiel d'un signal à énergie finie peut être représenté par la densité spectrale d'énergie (DSE). Dans le cas de signaux discrets, la DSE et le spectre d'amplitude sont définis via la transformée de Fourier discrète respectivement par (3.7) et (3.8) [19].

$$Px(m)=|X(m)|^2 \quad (3.7)$$

$$Sx(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} |X(m)|^2 \quad (3.8)$$

### 3.2.2 Analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est une méthode qui permet de détecter des chocs périodiques à partir des résonances de structure (carter, paliers, bagues de roulement). En effet, les défauts de roulement de type choc excitent les hautes fréquences des structures, ainsi un phénomène de modulation se produit entre la fréquence de défaut (basse fréquence) et la résonance de structure (haute fréquence). Après avoir démodulé le signal, le spectre d'enveloppe fera donc mieux apparaître les raies d'impulsions dues au défaut. En pratique, pour obtenir le spectre du signal enveloppe, il faut suivre les étapes suivantes [17] :

- Déterminer les fréquences de résonance.
- Filtrer, avec un filtre passe bande, le signal temporel autour des fréquences de Résonance.
- Calculer le signal d'enveloppe à l'aide de la transformée d'Hilbert
- Calculer le spectre d'enveloppe à l'aide de la transformée de Fourier

### 3.3 Analyse temps - fréquence

L'analyse en temps-fréquence des signaux traite à la fois le domaine temporel et le domaine Fréquentiel. Les signaux non stationnaires sont mieux représentés par une distribution temps-fréquence, qui vise à montrer la répartition de l'énergie du signal sur l'espace à deux dimensions Temps-fréquence. Les techniques les plus utilisées pour l'analyse temps-fréquence Sont la transformée de Fourier à court terme (STFT) et la transformée en ondelettes [18].

#### 3.3.1 Transformée de Fourier à court terme

L'analyse temps-fréquence s'appuie sur une idée très naturelle et très simple. Puisque la TF n'est pas localisée en temps du fait de l'intégration sur  $R$ , il suffit d'y introduire une fonction bien localisée en temps, une fenêtre d'analyse [18]. Pour une fenêtre notée  $\omega(t)$  ci-dessous, on définit la transformée de Fourier à court terme, dite aussi transformée de Fourier fenêtrée par :

$$v[x](t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot \omega(\tau - t) e^{-j2\pi v\tau} dt \quad (3.9)$$

La représentation du module au carré  $|S\omega[x](s, v)|^2$  dans le plan temps-fréquence est appelée le « spectrogramme ». En effet, on peut construire par translation temporelle et modulation fréquentielle, une combinaison linéaire tel que :

$$\omega t, f(\tau) = \omega(\tau - t)e^{-j2\pi v\tau} \quad (3.10)$$

La Transformée de Fourier à court terme est connue et utilisée dans le domaine de diagnostic de défaut. Malgré ses limites, elle continue à donner de bons résultats. En pratique une fois le support temporel de la fenêtre  $\omega(\tau)$  est choisi, la résolution temps-fréquence de la TFCT est fixée. En fait, ce choix a un certain nombre d'inconvénients. En conséquence, la TFCT est recommandée pour l'analyse des signaux quasi-stationnaires qui sont lissés par la fenêtre choisie mais elle n'est pas appropriée pour analyser les évolutions de grande échelle. De ce fait, la notion fréquence est alors remplacée par la notion d'échelle et on arrive au cadre de la transformée en ondelettes [19].

### 3.4 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. L'analyse en ondelettes est, sans doute, l'un des outils mathématiques le 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 [17].

#### 3.4.1 Transformation en ondelettes continues

Par analogie avec la transformée de Fourier, la transformée en ondelette continue (TOC) est une transformation linéaire qui décompose un signal  $x(t)$  en fonctions élémentaires  $\psi_{a,b}(t)$  qui sont obtenus par translation et dilatation de l'ondelette mère. Usuellement la transformée en ondelette continue est définie par [17] :

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3.11)$$

Où 'b' est un paramètre de translation et 'a' est un paramètre d'échelle qui mesure la dilatation ou la contraction de l'ondelette,  $\psi(t)$  est l'ondelette mère, l'étoile indique le conjugué de la fonction. La représentation de la transformée d'ondelette d'un signal dans le plan temps-fréquence est appelée le « scalogramme ».

### 3.5 Analyse des ridges

En étudiant les représentations temps-fréquence des signaux multi-composantes, on s'aperçoit qu'elles dessinent des lignes de crête ou *ridges* le long des fréquences instantanées. Sous des conditions de séparation fréquentielle, il est ainsi possible de détecter et de reconstruire les modes [21]. L'ensemble de ces méthodes est appelé analyse de ridges. En général, cette analyse est effectuée sur les représentations temps-fréquences des signaux, obtenues en leur appliquant la décomposition par la TFCT ou la TOC, qui fait apparaître des lignes de fréquences instantanées, appelées *ridges*.

## 4 Conclusion

Dans le domaine de maintenance le traitement du signal est une discipline indispensable de nos jours. Son but est donc de réussir à extraire un maximum d'information utile sur un signal perturbé par un bruit engendré par un mauvais comportement d'un ou de plusieurs éléments des machines tournantes (roulements, arbres...etc.).

Nous avons présenté dans ce chapitre de manière générique les techniques de traitement du signal en vue de diagnostic de défauts dans les machines tournantes. Le choix d'une méthode d'analyse s'effectue suivant des critères ; par exemple la nature des signaux acquis de la machine, l'environnement industriel etc....

Grâce à sa simplicité et sa rapidité d'extraire les résultats, la méthode par approche signal est parmi les méthodes les plus utilisées pour la détection et le diagnostic des défauts. Dans le chapitre qui suit, on s'intéressera à la détection de quelques défauts de roulements les systèmes tournants en appliquant la méthode de l'analyse spectrale et d'enveloppe sur des signaux réels stationnaire et non-stationnaire dans les cas de variations de la charge ou de la vitesse de rotation.



## Chapitre 4 : Détection de défaut des roulements d'une machine tournante lors de charge ou de vitesse variables

### 1. Introduction

Les roulements sont parmi les composants les plus sollicités des machines et représentent une source de panne fréquente. Les pistes des roulements et les billes sont chargées cycliquement, ce qui engendre à la surface une dégradation par fatigue qui se présente sous la forme de fissures qui conduisent à l'écaillage puis à la ruine du roulement [7]. Ces fissures peuvent être d'origine superficielle ou provenir de la dégradation de la sous couche du matériau. Cette ruine peut être détectée sur un spectre à partir de l'identification des fréquences caractéristiques du roulement. En effet, ces défauts se traduisent par une perte de métal et provoquent des chocs répétés des billes. Ceci correspond aux fréquences des impacts lorsqu'un élément roulant rencontre un défaut [22]. Par ailleurs, les vibrations engendrées constituent une information très utile pour le suivi et le diagnostic de ces défauts. Dans ce chapitre, nous allons proposer des outils de traitement du signal vibratoire permettant une détection facile et précoce de ces défauts, et ce, dans le cas de différentes charges et de vitesse variable.

### 2. Détermination des fréquences caractéristiques du défaut

Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues. Pour chaque type de roulement et en fonction de ses cotes de fabrication (voir la figure 4.1), on peut considérer les fréquences caractéristiques données par les formules ci-dessous [23].

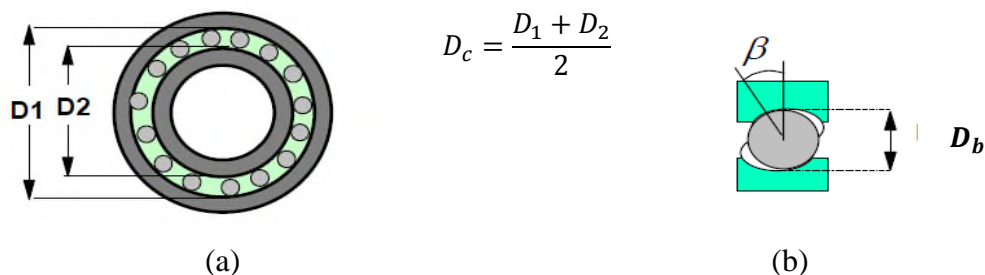


Figure 4.1 diamètres des roulements (a) roulement à bille (b) roulement à rouleaux

$$F_{bext}(Hz) = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{Db}{Dc} \cos \beta\right) \quad (4.1)$$

$$F_{bint}(Hz) = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{Db}{Dc} \cos \beta\right) \quad (4.2)$$

$$F_{bille}(Hz) = \frac{Dc}{2Db} f_r \left[1 - \left(\frac{Db}{Dc} \cos \beta\right)^2\right] \quad (4.3)$$

$$F_{cage} = f_{outer}(Hz) = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{Db}{Dc} \cos \beta\right) \quad (4.4)$$

Avec :

- ✓  $f_r$ : la fréquence de rotation mécanique ;
- ✓  $N_b$  : le nombre de billes ;
- ✓  $Db$ : le diamètre de bille ;
- ✓  $Dc$ : le diamètre moyen du roulement ;
- ✓  $\beta$  : l'angle de contact ;

### 3. Diagnostic des défauts de roulement lors de charge variable

#### 3.1. Description de banc d'essai

Un ensemble de données sur les anomalies de roulement est fourni pour faciliter la recherche sur le diagnostic des roulements [24]. Une base de données comprend des mesures de vibrations provenant d'un banc d'essai de roulements (roulement sans défauts, défaut de bague externe à différentes charges, et un défaut de bague interne à différentes charges), et trois défauts réels.



(a) Défaut sur la bague externe

(b) Défaut sur la bague interne

Figure 4.2 Les bagues des roulements défectueuses : (a) externe et (b) interne [24]

Le banc d'essai était équipé d'un roulement avec les paramètres suivants :

- Diamètre de bille :  $Db = 0.235$  cm
- Diamètre moyen :  $Dm = 1.245$  cm

- Nombre d'éléments :  $N_e = 8$
- Angle de contact :  $\beta = 0$

L'ensemble de données comprend les éléments suivants :

- 3 tests de base avec roulement sain : 270 lb de charge ;
- 7 tests avec défaut de bague externe : 25, 50, 100, 150, 200, 250 et 300 lb de charge ;
- 7 tests avec défaut de bague interne : 0, 50, 100, 150, 200, 250 et 300 lb de charge.

La charge est exprimée en lb (livre britannique) équivalent à 0,45359237 kg [24]. Avec une fréquence de rotation = 25 Hz. Et d'après les équations 4.1, 4.2 et 4.3, les fréquences caractéristiques de chaque défaut sont les suivantes :

- Fréquence de la bague intérieure :  $F_{bint} = 118,8 \text{ Hz}$
- Fréquence de la bague extérieure  $F_{bext} = 81,1 \text{ Hz}$
- Fréquence de la bille :  $F_{bille} = 63,8 \text{ Hz}$

## 3.2. Traitement des signaux vibratoires mesurés

### 3.2.1. Cas de roulement sans défaut

Dans ce test, le signal (x) simulé (figure 4.3 (a)) d'un roulement sain (sans défaut) et traité par les 2 méthodes. En premier lieu l'analyse spectrale ensuite l'analyse d'enveloppe, les résultats ont donné les spectres des (figures 4.3 (b) et (c)).

En effet, aucun des harmoniques de la fréquence caractéristique du défaut ( $F_{bext}, F_{bint}$ ) n'est détecté.

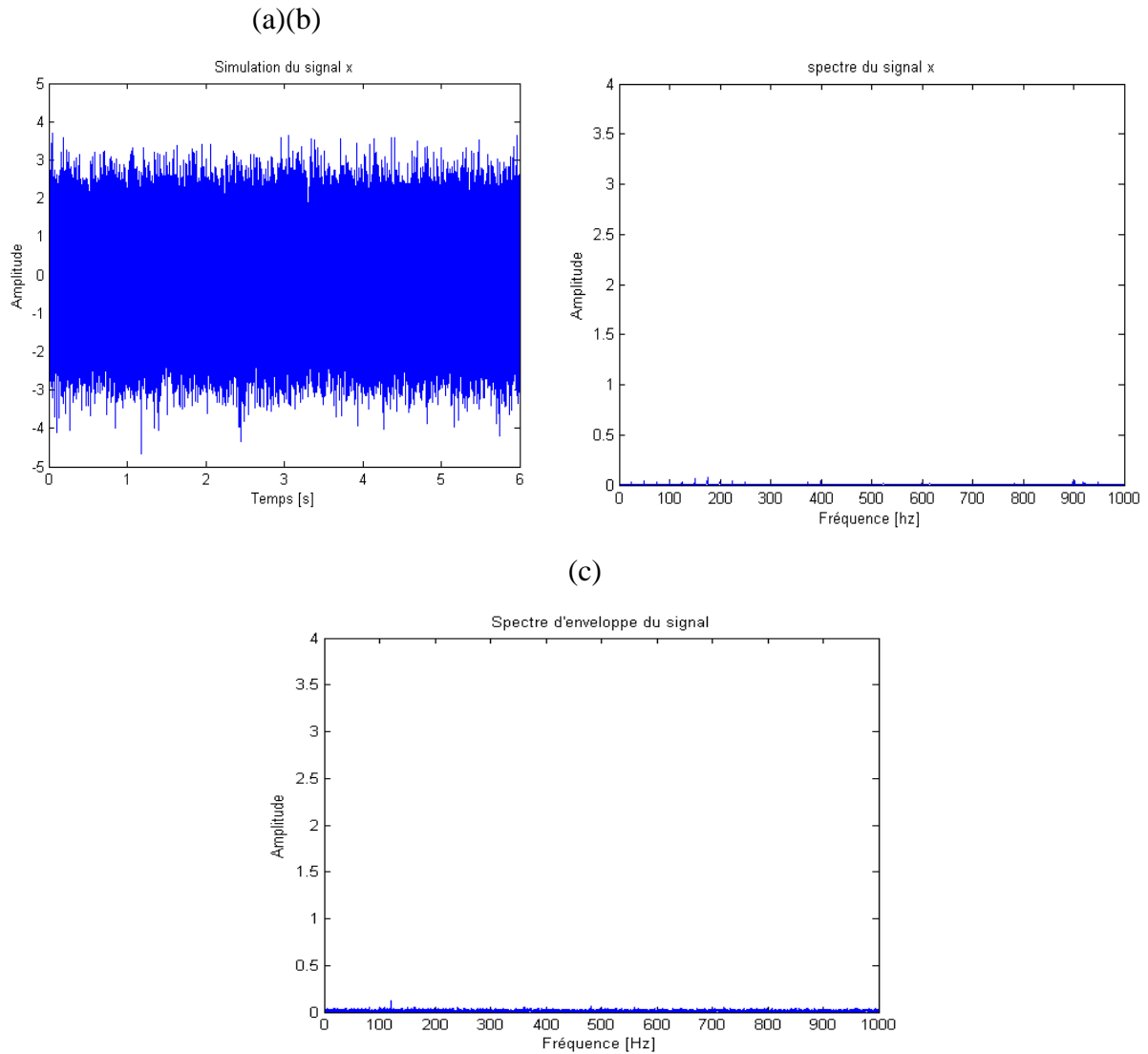


Figure 4.3 Analyse de signal vibratoire mesuré avec roulement sain : (a) signal, (b) son spectre et (c) son spectre d'enveloppe

### 3.1.2. Cas de défaut bague externe du roulement à différentes charges

En présence de défaut de bague externe du roulement, l'analyse d'enveloppe des signaux mesurés pour chaque charge traitée par l'analyse d'enveloppe, nous offre les spectres d'enveloppe présentés sur la (Figure 4.4). Les spectres d'enveloppe obtenu montrent plusieurs harmoniques de la fréquence du défaut  $F_{bext} = 81$  Hz avec des amplitudes plus ou moins importantes.

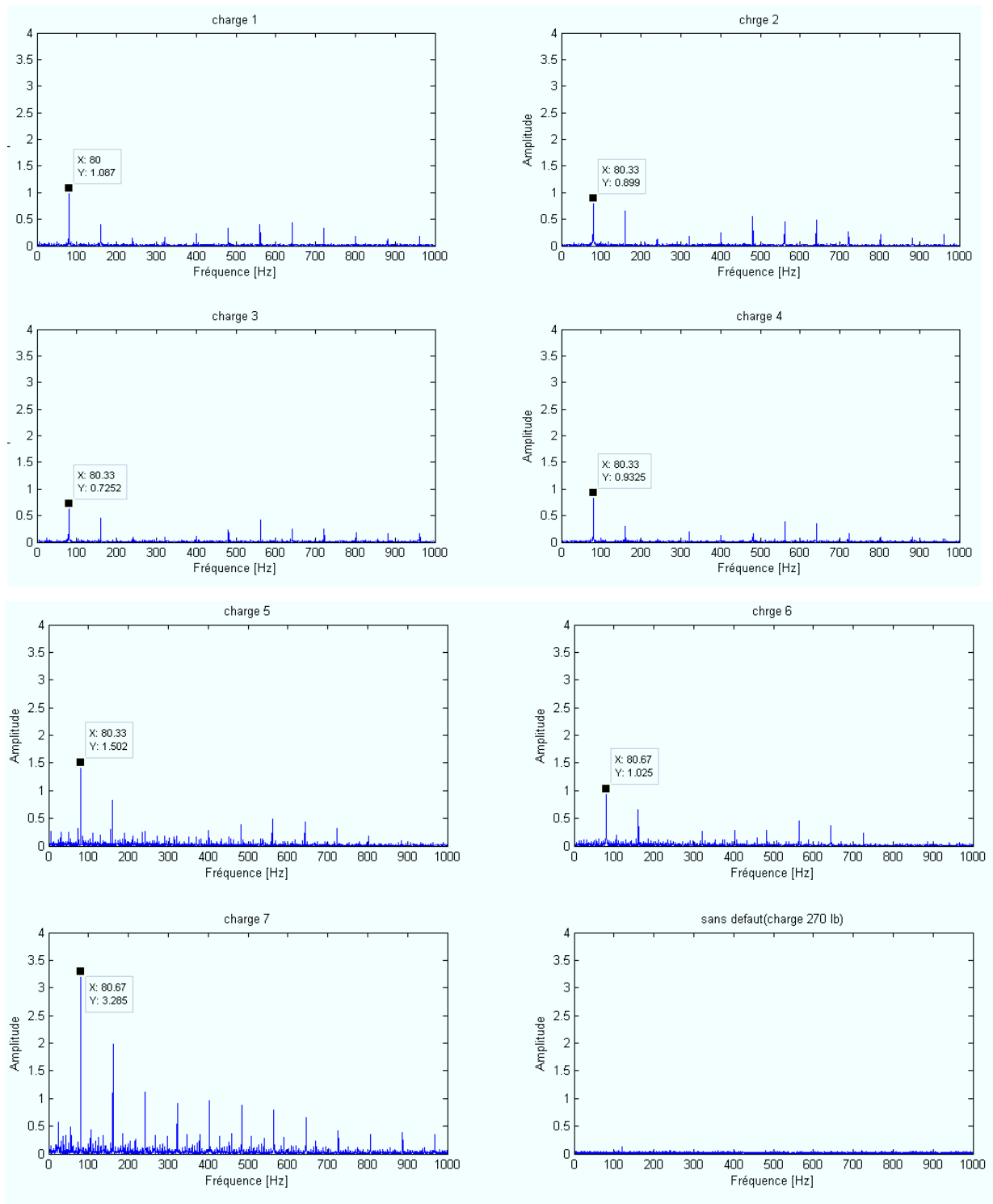


Figure 4.4 Spectres à enveloppe des signaux mesurés pour chaque charge (1 à 7) en présence et absence de défaut de bague externe, et charge (8) sans défaut

La figure ci-dessous donne l'évolution de l'amplitude de raie de fréquence fondamentale du défaut  $F_{bext}=81\text{Hz}$  en fonction de la charge. Il est important de noter que la première valeur de cette amplitude correspond à l'amplitude du premier harmonique du signal enregistré sans défaut de roulement. Toutefois, cette courbe montre que l'amplitude du premier harmonique

de la fréquence caractéristique varie proportionnellement suivant une fonction non linéaire, et cela par rapport à la charge.

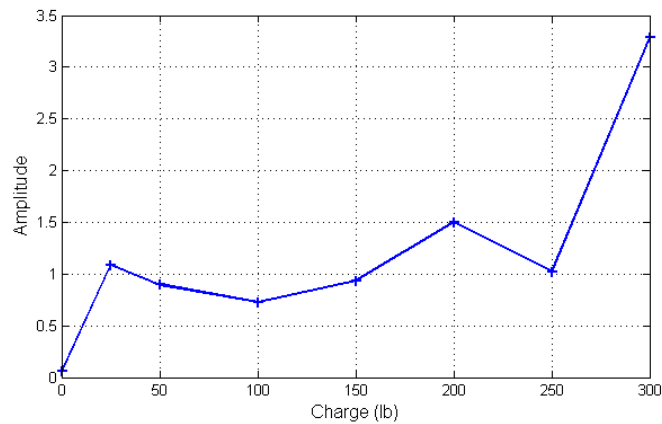


Figure 4.5 Courbe de la sévérité des vibrations créées par la défaillance (bague externe) en fonction de la charge

### 3.1.3. Cas de défaut bague interne de roulement à différentes charges

En examinant les signaux mesurés lors du défaut de bague externe par l'analyse d'enveloppe. Les spectres obtenus après application de la méthode de l'enveloppe sur les signaux de base, sont présentés à (la figure 4.6), ses spectres montrent un pic à 118 Hz égal à la fréquence  $F_{bint}$  ainsi plusieurs harmoniques sont elles aussi présentes avec des amplitudes élevées.

Par ailleurs, il est important de signaler la présence dans les spectres des raies spectrales liées à la fréquence de rotation, les valeurs des amplitudes correspondantes sont proportionnelles à l'augmentation de la charge. Ceci est expliqué par le fait que la bague interne est liée à l'arbre de rotation, ce qui a permis de créer des bandes latérales (modulations) de fréquence de rotation autour de la fréquence défaut de bague interne.

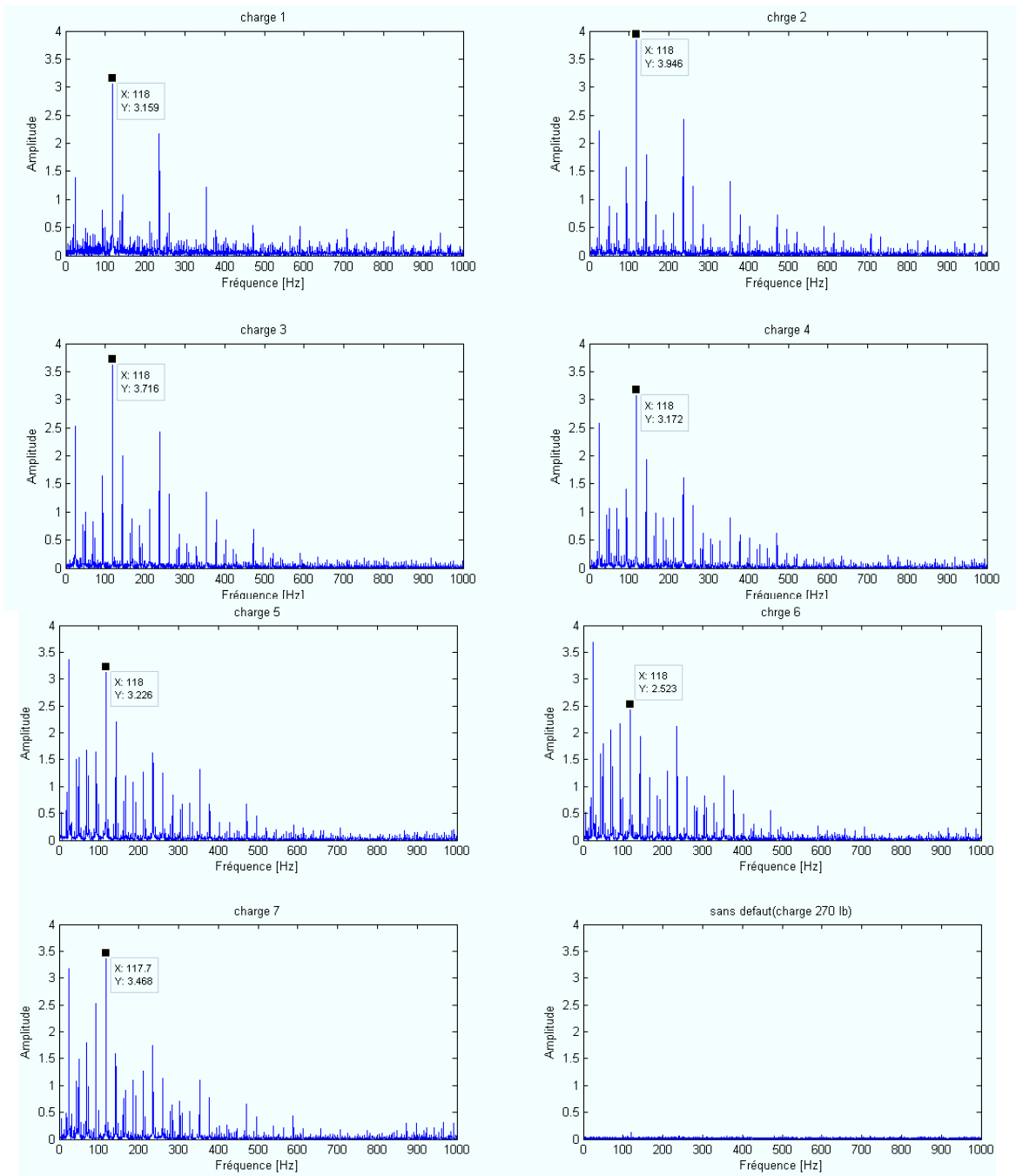


Figure 4.6. Spectres d’enveloppe du signaux mesurés pour chaque charge (0à 7) en présence et absence de défaut de bague interne et charge (8) sans défaut

La figure 4.7 donne l’évolution de l’amplitude de raie de fréquence  $F_{bint} = 118$  Hz en fonction de la charge. D’après les spectres précédents, l’amplitude de la raie de fréquence caractéristique de défaut de la bague externe varie aléatoirement suivant une fonction non linéaire, et cela par rapport à la charge. Ceci est surtout causé par les modulations de la fréquence de rotation. Nous suggérons ici, qu’il est préférable de suivre l’évolution des modulations autour de la fréquence défaut quand il s’agit de défaut de bague intérieur.

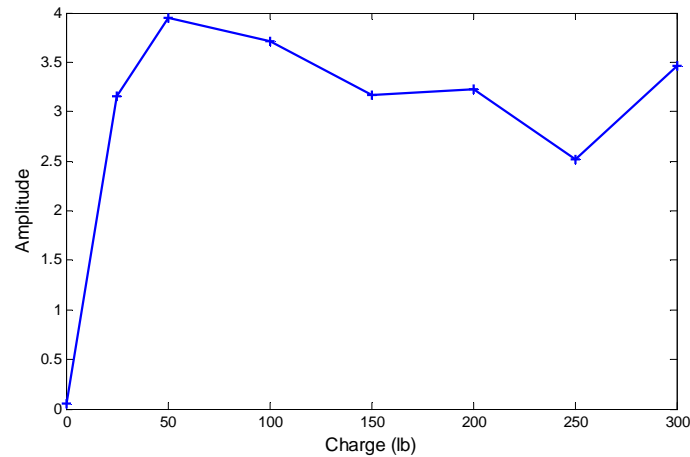


Figure 4.7 Courbe de la sévérité des vibrations créées par la défaillance (bague interne) en fonction de la charge

## 4. Diagnostic des défauts de roulement lors de vitesse variable

### 4.1. Description de banc d'essai

Les signaux vibratoires utilisés dans cette partie sont enregistrés sur le banc d'essai de l'ÉTS de Montréal, représenté sur la figure 4.8 Il est constitué d'un arbre porté sur deux paliers à roulement et accouplé à un moteur électrique. Un disque comprenant un balourd est placé à l'autre extrémité de l'arbre comme charge radiale avec un ressort comme charge axiale. Les roulements utilisés sont à double rangée de billes (SKF, 1210 EKTN9).

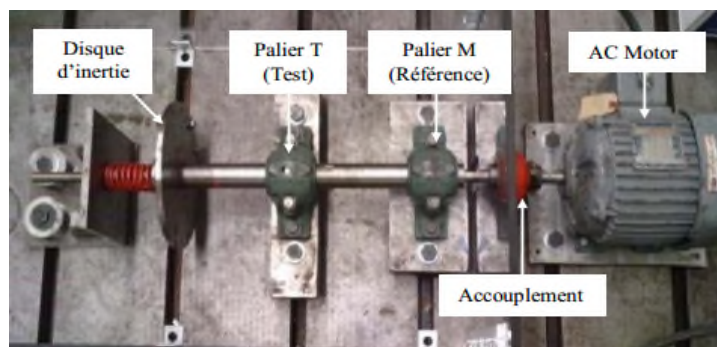


Figure 4.8 Banc d'essai de l'ÉTS de Montréal

Les mesures ont été effectuées avec différents cas de roulement du palier T (test), normal ou avec un défaut de bague extérieure. Tous les tests ont été effectués avec un système de collecte de données composé d'un accéléromètre de référence (352C34), qui est relié à l'analyseur PRO-THOR (DT9837-13310) avec une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz [19]. Les données de vibration ont été recueillies après par le collecteur BetaVIB. La



fréquence caractéristique dudéfaut de bague externeD’après les fonctions des fréquences caractéristiques des défauts des roulements est donnée par l’expression :

$$F_{bext}= 7.2 \times fr, \text{ où } fr \text{ est la fréquence de rotation.}$$

## 4.2 Marche de la machine en absence de défaut

### 4.2.1 Avec une vitesse constante

Dans un premier temps, les vibrations sont mesurées sur le palier test lors de la marche de la machine avec une vitesse de rotation constante  $fr = 15 \text{ Hz}$ , avec l’absence de défaut (roulement sain). Le signal est présenté sur la figure (4.9 (A)), ensuite le signal est traité par 2 méthodes : l’analyse d’enveloppe et la transformé de fourrier à courte terme (TFCT). Les résultats sont indiqués sur la figure 4.9 (B) et (D).

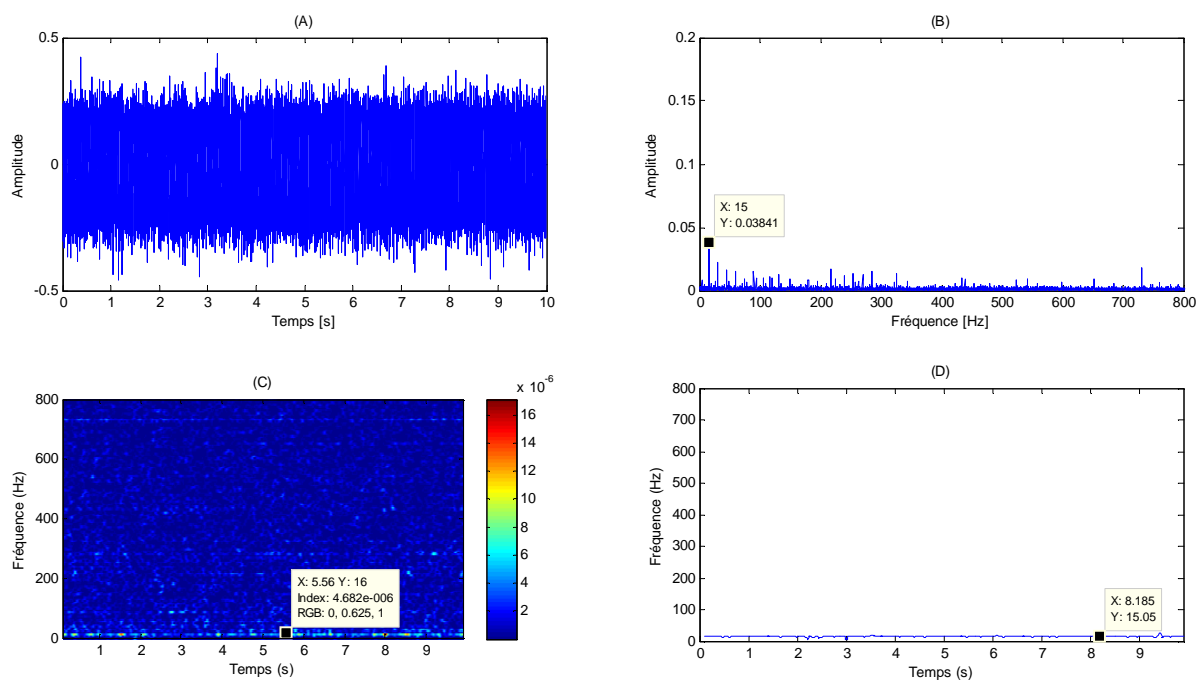


Figure 4.9 Analyse du signal vibratoire mesuré en absence de défaut, (A) représentation temporelle, (B) spectre d’enveloppe du signal, (C) représentation temps-fréquence du signal obtenue avec la TFCT, (D) crête le long du premier harmonique de la fréquence de rotation extraite par l’analyse des ridges

Sur le spectre d’enveloppe du signal illustré dans la figure (4.9(A)et (B)), on ne détecte aucun des harmoniques des fréquences caractéristiques des défauts du roulement ( $F_{bext}$ ), ce qui indique l’absence du défaut. Par contre, le mouvement de rotation de la machine est représenté par une amplitude à la fréquence de rotation  $fr = 15 \text{ Hz}$ . D’ailleurs, sur la figure

4.9(C) montrant la représentation temps-fréquence (RTF) du signal, obtenue par la méthode (TFCT), il n'est pas aisé de distinguer la ligne de fréquence instantanée de rotation. L'analyse des ridges de la RTF nous permet l'extraction des lignes de fréquences instantanées, la figure (4.9(D)) montre une crête le long du premier harmonique de la fréquence de rotation  $f_r = 15\text{Hz}$ . Cela montre clairement une ligne stable à 15 Hz pendant les 10s de marche qui représente la vitesse de rotation et indique l'absence d'autres fréquences caractéristiques de défaut.

### 4.3. Démarrage en présence de défaut

Dans cette partie, le signal vibratoire était mesuré sur le palier test lors du démarrage du moteur pour une durée de 10 s. Cela veut dire que la fréquence de rotation augmente jusqu'à atteindre la fréquence de 20 Hz à  $t = 7,8$  s. Par conséquent, la fréquence de défaut variera aussi selon la fréquence de rotation ( $F_{bext} = 7.2 \times Fr$ ). Quand la fréquence de rotation sera égale à 20 Hz, nous aurons une fréquence  $F_{bext} = 144$  Hz.

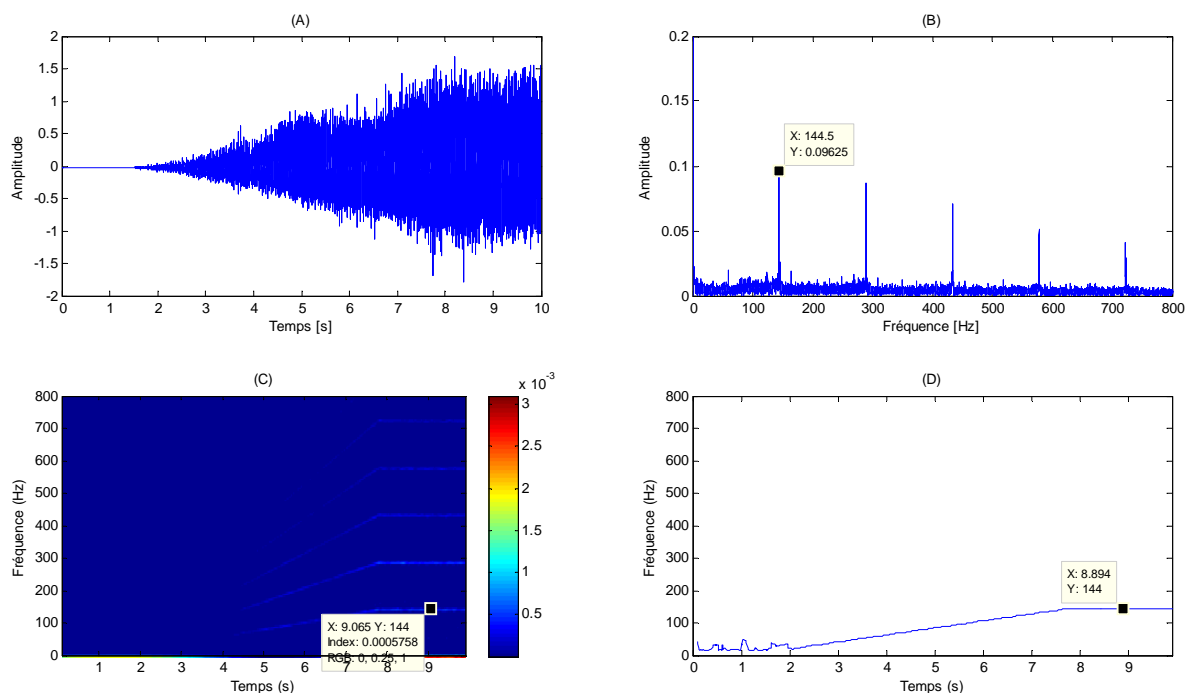


Figure 4.10 Analyse du signal vibratoire mesuré au démarrage de la machine en présence de défaut, (A) représentation temporelle, (B) spectre d'enveloppe du signal, (C) représentation temps-fréquence du signal obtenue avec la TFCT, (D) crête le long du premier harmonique de la fréquence  $F_{bext}$  extraite par l'analyse des ridges

Sur la figure 4.10(A) est représenté le signal dans le domaine temporel où nous remarquons des chocs espacés par des périodes de temps avec des amplitudes correspondant au défaut qui

augmentent, et ce avec la vitesse de rotation qui varie. Les figures 4.10(B) représente le spectre d'enveloppe respectivement où sont montrés les harmoniques de la fréquence du défaut  $F_{bext}$ . Cependant, il est clair que dans ce cas, ce n'est plus facile de distinguer la variation de la fréquence caractéristique de défaut. Par contre, la RTF calculée par la TFCT représentée sur la figure 4.10(C) met en évidence la variation de chacun de ces harmoniques dès l'alimentation de la machine jusqu'à la stabilisation de la vitesse de rotation à 20 Hz, ce qui correspond à une fréquence  $F_{bext} = 144$  Hz, ainsi que quatre de ses multiples.

L'analyse des ridges appliquée sur la représentation temps-fréquence dans la figure (4.10 (C)), nous permet l'extraction des lignes de fréquence instantanées. La figure (4.10 (D)) montre une crête le long du premier harmonique de la fréquence  $F_{bext}$ . On voit clairement que la fréquence caractéristique de défaut de roulement varie, et augmente à partir de  $t=2$ s jusqu'à l'instant  $t=7,8$ s où elle atteint une 144 Hz qui reste stable puisque la vitesse de rotation ne varie plus.

#### 4.4 Arrêt en présence de défaut

Dans cette partie, le signal vibratoire était mesuré sur le palier test lors d'arrêt de la machine à partir d'une vitesse de rotation  $f_r = 30$  Hz, et ce pour une durée de 10 s. Cela veut dire que la fréquence de rotation reste stable à 30 Hz, ensuite diminue jusqu'à l'arrêt de la machine. Par conséquent, la fréquence de défaut variera aussi selon la fréquence de rotation ( $F_{bext} = 7.2 \times f_r$ ). Toutefois, pendant que la vitesse de rotation restait stable, la fréquence  $F_{bext}$  était presque égale à 217 Hz.

Sur la figure 4.11(A) est représenté le signal dans le domaine temporel où nous remarquons des chocs espacés par des périodes de temps avec des amplitudes correspondant au défaut qui diminuent, et ce avec la vitesse de rotation qui varie. La figure 4.11(B) représente le spectre d'enveloppe respectivement, où sont montrés les harmoniques de la fréquence du défaut  $F_{bext}$ . De même, il est clair que dans ce cas aussi, ce n'est plus facile de distinguer la variation de la fréquence caractéristique de défaut. Par conséquent, nous avons appliqué aussi la TFCT et calculer la TFR qui est représenté sur la figure (4.11 (C)), où sont mis en évidence les multiples de la fréquence  $F_{bext}$  et leur variation dans le temps.

L'analyse des ridges appliquée sur la RTF de la figure (4.11 (C)), nous permet l'extraction des lignes de fréquence instantanées. La figure (4.11(D)) montre la crête le long du premier harmonique de la fréquence  $F_{bext}$ . On voit clairement que la fréquence caractéristique de

défaut de roulement varie et diminue au cours de temps, et ce à partir de la fréquence  $F_{bext}=217.5$  Hz.

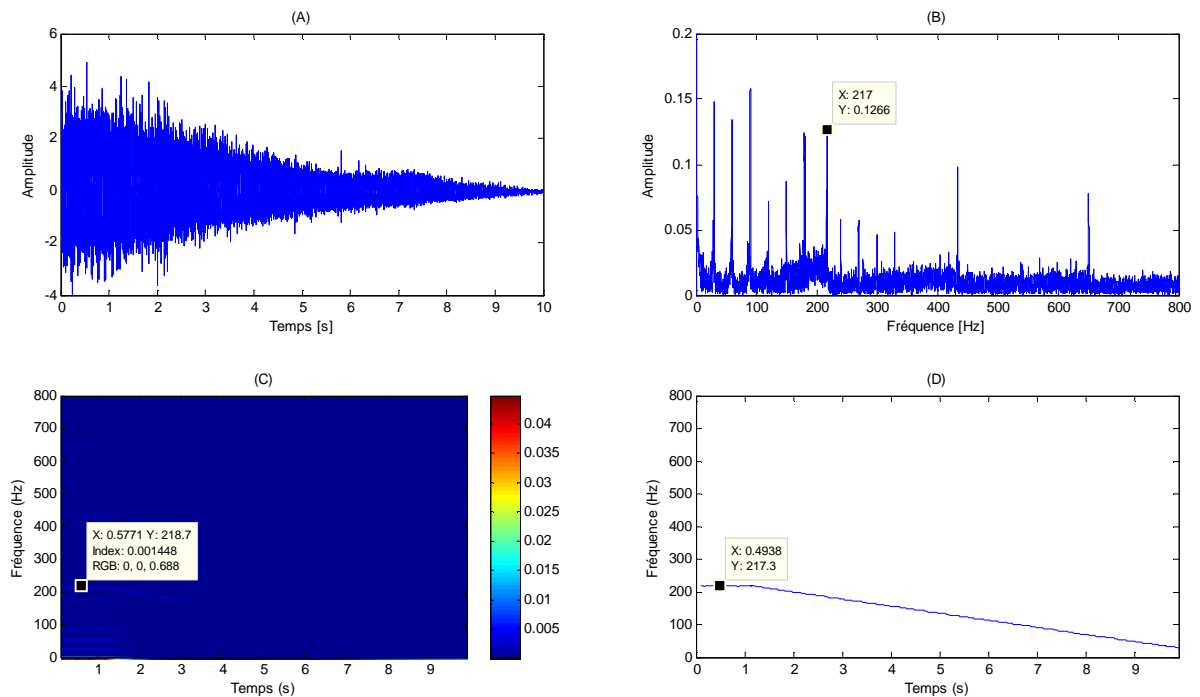


Figure 4.11 Analyse du signal vibratoire mesuré à l’arrêt de la machine en présence de défaut, (A) représentation temporelle, (B) spectre d’enveloppe du signal, (C) représentation temps-fréquence du signal obtenue avec la TFCT, (D) crête le long du premier harmonique de la fréquence  $F_{bext}$  extraite par l’analyse des ridges

### 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre trois méthodes de traitement du signal utilisables pour la surveillance et le diagnostic de systèmes à l’aide de mesures vibratoires, pour la détection des défauts des roulements. Ces méthodes sont l’analyse spectrale, l’analyse d’enveloppe et l’analyse temps-fréquence.

Dans la première partie, nous avons analysé quelques signaux vibratoires des roulements à l’état sain et défaillant (défaut bague externe et interne) d’une machine à différentes charges dans le but de détecter et caractériser les défauts. Ces signaux ont été traités avec l’analyse d’enveloppe afin de montrer l’influence de la charge sur la sévérité d’un défaut mécanique sur une machine.

Dans la deuxième partie, nous avons vu le comportement de la fréquence instantanée observée sur des signaux mesurés dans le cas d’une vitesse de rotation constante et dans le cas

où elle est variable. Les signaux mesurés ont été traités par la transformée de fourrier à courte terme afin de suivre la variation de la fréquence caractéristique du défaut en fonction du temps.

En effet, ces méthodes sont très efficaces dans le diagnostic et la maintenance, car non seulement elles permettent de détecter qu'il existe un défaut, mais elles sont très adaptées à la détection des défauts qui génèrent un choc périodique.

## Conclusion générale

Parmi les outils de la maintenance conditionnelle, l'analyse des vibrations est celui qui connaît aujourd'hui un des développements les plus importants du fait de l'évolution des techniques dans les domaines de l'informatique et du traitement du signal. La finalité de ce type de surveillance est destinée à assurer la sécurité de l'installation en évitant des dégradations importantes par le déclenchement d'alarmes, lorsque le niveau des vibrations atteint des valeurs jugées excessives pour le bon fonctionnement ou l'intégrité de cette dernière. Cette méthode de diagnostic nous permet d'avoir des informations sur l'apparition d'un défaut et sur sa provenance le plus rapidement possible.

Notre travail a pour but d'appliquer le traitement de signal dans la maintenance industrielle, en faisant un diagnostic pour la détection et la caractérisation des défauts qui peuvent affecter les différents éléments de roulements d'une machine tournante.

Dans un 1<sup>er</sup> chapitre, ce manuscrit donne une idée générale sur la constitution et la conception des machines tournantes, ainsi que les éléments critiques des équipements, ensuite il cite les différentes défaillances qui sont liées aux machines tournantes qui peuvent les affecter. Le 2<sup>ème</sup> chapitre est consacré à un état de l'art sur le diagnostic dans l'industrie, les étapes essentielles à suivre pour faire un diagnostic, ainsi que les différentes techniques de diagnostic. En se basant sur la technique d'analyse des vibrations, l'analyse la plus couramment utilisée dans le domaine industriel, le 3<sup>ème</sup> chapitre rappelle les différentes techniques utilisées pour l'analyse des mesures vibratoires. En particulier, les méthodes adoptées dans la partie pratique de notre travail.

La partie pratique, essentiellement exposée en chapitre 4, est consacrée pour la recherche et la détection des défauts liés aux roulements d'une machine tournante lors de charge variable et vitesse de rotation variable. Dans cette partie, les signaux vibratoires mesurés sur deux machines tournantes sont traités par trois méthodes de traitement de signal. En premier lieu, l'analyse spectrale et l'analyse d'enveloppe, nous a permis d'identifier les différentes fréquences caractéristiques de défauts roulements de la 1<sup>re</sup> machine et d'examiner l'influence de la charge sur la sévérité des vibrations générés par ces défauts. Dans la seconde étape, nous avons appliqué la technique de la transformée de Fourier à courts-termes afin d'obtenir la

représentation temps-fréquence et d'extraire les lignes de fréquences liées au défaut recherché à l'aide de l'analyse des ridges. Cette procédure nous a permis de suivre la fréquence instantanée du défaut qui varie dans le temps avec la variation de la vitesse de rotation de la 2<sup>ème</sup> machine.

Enfin, les méthodes utilisées dans ce travail sont très efficaces pour le diagnostic des pannes surtout lorsqu'il s'agit des défauts liés aux éléments de machines tournantes produisant des chocs périodiques comme les roulements, les engrenages...

## Références Bibliographique

- [1] Lyes KHELFI, Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificielle. Thèse de doctorat, Université Badj-Mokhtar de Annaba, 2014.
- [2] Article technique, site consulté le 10 mai 2020 :  
<https://www.rs-online.com/designspark/different-types-of-motors-and-their-use-fr>
- [3] Maître Julien, Reconnaissance des défauts de la machine asynchrone : Application des modèles d'intelligence artificielle, Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Canada, 2017
- [4] AbdelghaniChahmi, Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic, thèse de doctorat, université d'Oran, 2017
- [5] Jean HENG, Pratique de la maintenance, 4<sup>ème</sup> édition Dunod, 2017
- [6] A. Bouguerne, Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones, mémoire de magister, université de Constantine, 2009.
- [7] Omar DJEBLI, Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement. Thèse de doctorat, Université de Boumerdes, 26 Sept. 2013.
- [8] Doris MANSIANTIMA et al., Etude de la maintenance des pompes centrifuges soumises à un environnement stressant, International Journal of Innovation and Scientific Research, Vol. 40 (1), Déc. 2018, pp. 65-76
- [9] Article technique, OMICRON, Diagnostic et surveillance des machines tournantes, site consulté le 30 mai 2020 :  
<https://www.omicronenergy.com/fr/applications/diagnostics-et-surveillance-des-machines-tournantes/>
- [10] Marc THOMAS, Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines, Presse de l'université du Québec, Canada, ISBN 978-2-7605-3357-8, 2012.



- 
- [11] Abdallah KABOUCHE et Ali HADDOUCHE, Techniques de Maintenance Prédicative pour l'Amélioration de la disponibilité des Installations, Rapport de PFE de l'Université de Annaba, 2019
- [12] Tarek KEBABSA et Nouredine OUELAA, Eude des aspects de défaillances et techniques de maintenance, Rapport de PFE de l'Université de Annaba 2016
- [13] D, Augeix, Analyse vibratoire des machines tournante, Techniques de l'ingénieur, BM5 -145 : 2001
- [14] Olivier Cousinard, Contribution à l'étude et au développement d'un système intégré de suivi de l'endommagement des composants mécaniques sur machines tournantes, thèse de doctorat, Université de Reims, France, 2002
- [15] Francis Cottet, Traitement des signaux et acquisition de données, 3e édition Dunod, Paris, 2009
- [16] Fadia MEZIANI,Analyse du degré de sévérité pathologique des signaux phono cardiogrammes (PCGs) par application des transformées d'ondelettes. Thèse de doctorat, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMEN, juin 2013
- [17] Ziani RIDHA, Contribution à l'analyse et à la classification automatique des défauts mécaniques. Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Setif 1, 2015
- [18] Soualhi, Abdenour.Du diagnostic au pronostic de pannes des entraînements électriques. Lyon, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon I, France, 2013
- [19] Yacine IMAOUCHEN, Mesure et analyse des vibrations des machines électriques tournantes, Thèse de doctorat, Université deBejaia, 24 novembre 2015.
- [20] Sanaa KERROUMI,Extraction des paramètres et classification dynamique dans le cadre de la détection et du suivi de défaut de roulements. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2016
- [21] Thomas Oberlin, Contributions à la Décomposition Modale Empirique, aux Représentationstemp-s-fréquence et au Synchrosqueezing, Thèse de doctorat, université de Grenoble, France ,4 Novembre 2013
- [22] T.A., Harris "Rolling Bearing Analysis", 3ème edition, Lavoisier, 1991.

- [23] Baptiste TRAJIN « Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones » Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de TOULOUSE. 2009.
- [24] Eric Bechhoefer, Condition Based Maintenance Fault Database for Testing of Diagnostic and Prognostics Algorithms, MFPT conference, 2012.

## Résumé

Ce travail s'inscrit dans la thématique de la surveillance et diagnostic des défauts mécaniques des machines tournantes et plus particulièrement les défauts de roulements. L'objectif de ce travail est d'étudier plusieurs signaux vibratoires qui décrivent les états de défaillance des roulements en tant qu'organes mécaniques des machines tournantes. En effet, l'étude est consacrée à l'analyse des signaux vibratoires mesurés sur deux machines tournantes pour examiner l'influence des conditions variables sur les composantes fréquentielles de ces vibrations à savoir la charge et la vitesse de rotation. L'analyse se base sur l'application de trois techniques de traitement de signal vibratoire qui sont avérée adéquate pour le diagnostic des défauts des roulements. Ces trois méthodes sont l'analyse spectrale, l'analyse d'enveloppe, et ensuite l'analyse temps-fréquence (transformée de Fourier à courtes-termes).

## Abstract

This work falls within the theme of monitoring and diagnosing mechanical faults in rotating machines and particularly bearing faults. The objective of this work is to study several vibratory signals that describe the failure states of bearings as mechanical parts of rotating machines. Indeed, the study is devoted to the analysis of vibratory signals measured on two rotating machines to examine the influence of varying conditions on the frequency components of these vibrations, namely the load and the shaft speed. The analysis is based on the application of three vibration signal processing techniques which have been shown to be adequate for the diagnosis of bearing faults. These three methods are spectral analysis, envelope analysis, and time-frequency analysis (short-term Fourier transform).

## ملخص

يندرج هذا العمل ضمن موضوع مراقبة وتشخيص الأعطال الميكانيكية في الآلات الدوارة وخاصة أعطال المحامل. الهدف من هذا المشروع هو دراسة عدة إشارات اهتزازية تصف حالات فشل المحامل كأجزاء ميكانيكية للآلات الدوارة. في الواقع، تم تخصيص الدراسة لتحليل الإشارات الاهتزازية المقاسة على جهازين دوارين لفحص تأثير الظروف المتغيرة على مكونات التردد لهذه الاهتزازات، وهي الشحنة والسرعة الدوارة. يعتمد التحليل على تطبيق ثلاث تقنيات لمعالجة إشارات الاهتزاز والتي ثبت أنها مناسبة لتشخيص أعطال المحامل. هذه الطرق الثلاث هي التحليل الطيفي، وتحليل الغلاف، وتحليل التردد الزمني (تحويل فورييه قصير المدى).