



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

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques  
Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Construction Mécanique

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**BOUDIAF Ayache & Mohamed Ayoub LAANANI**

Le : lundi 24 juin 2024

## **Surveillance et diagnostic des machines tournantes par analyse vibratoire: détection des défauts mécaniques**

---

### **Jury :**

Dr. <b>Youcef DJEBLOUNE</b>	<b>MCA</b>	Université de Biskra	Président
Dr. <b>Hefaidh HADEF</b>	<b>MCA</b>	Université de Biskra	Rapporteur
Dr. <b>Salah GUERBAAI</b>	<b>MCA</b>	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2023- 2024

*Dédicace*

*Nous dédions ce travail à : Nos chers parents et  
Nos frères pour leur soutien  
Et à tous nos amis d'étude et nos proches avec  
qui nous avons partagé tant de belles  
choses.....*

*Boudiaf AYACHE*

*Dédicace*

*Nous dédions ce travail à : Nos chers parents et*

*Nos frères pour leur soutien*

*Et à tous nos amis d'étude et nos proches avec*

*qui nous avons partagé tant de belles*

*choses.....*

*Mohamed Ayoub LAANANI*

### *Remerciement*

Au terme de ce travail, nous remercions Dieu Tout-Puissant qui nous a donné la volonté et le courage de le mener à bien.

Tout d'abord, nous tenons à remercier notre encadrant **Dr. Hefaidh HADEF** pour sa patience, sa volonté et surtout sa sagesse, ainsi que pour ses conseils qui ont alimenté notre réflexion. Nos remerciements vont également aux membres du jury, **Dr. Youcef DJEBLOUNE** et **Dr. Salah Guerbaai** avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nos remerciements vont à tous les enseignants de la faculté des Sciences et Technologie de **l'Université de Biskra** et en particulier, aux enseignants du département de **génie mécanique**.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à atteindre cet objectif.

<b>Dédicace</b>	<b>II</b>
<b>Remerciements</b>	<b>III</b>
<b>Table des matières</b>	<b>IV</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>V</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>VI</b>
<b>Résumé</b>	<b>IX</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>2</b>
<b>2 CHAPITRE II : A PROPOS DE LA SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC INDUSTRIEL, DEFAUTS MECANQUES DES MACHINES TOURNANTE ET DES TECHNIQUES DE L'ANALYSE VIBRATOIRE</b>	
<b>1.1 Introduction</b>	<b>11</b>
<b>1.2 Surveillance et diagnostic industriel</b>	<b>11</b>
1.2.1 Fonctions de la surveillance	11
1.2.1.1 Détection de défauts	12
1.2.1.2 Diagnostic	12
1.2.1.3 Supervision	13
1.2.1.4 Correction	13
1.2.2 Classification des méthodes de diagnostic	13
1.2.2.1 Approches analytiques	15
1.2.3 Approches à base de connaissances [18]	16
1.2.3.1 Approches à base de traitement de données (Data-Driven Approach)	17
<b>1.3 Défauts mécaniques des machines tournante</b>	<b>19</b>
1.3.1 Définitions et classification des machines tournantes	19
1.3.1.1 Définitions des machines tournantes [20], [21]	19
1.3.1.2 Rotor	20
1.3.1.3 Structure	21
1.3.1.4 Liaisons	21
1.3.2 Défaillances d'origine mécanique des machines tournante	22
1.3.2.1 Défaut de balourd	23
1.3.2.2 Désalignement	25
1.3.2.3 Jeu mécanique	27
1.3.2.4 Défauts d'un mauvais serrage mécanique	28
1.3.2.5 Défauts d'engrenages	28
1.3.2.6 Défauts de roulement	32
<b>1.4 Techniques de l'analyse vibratoire</b>	<b>36</b>
1.4.1 Méthodes d'analyse des vibrations	36
1.4.1.1 Méthodes temporelles	36
1.4.1.2 Méthodes fréquentielles	37

# *Table des matières*

---

<b>1.5 Conclusion</b>	<b>40</b>
<b>2 CHAPITRE II : ETUDE DE CAS</b>	<b>42</b>
<b>2.1 Introduction</b>	<b>42</b>
<b>2.2 Présentation du banc d'essais</b>	<b>42</b>
2.2.1 Paramètres des mesures	43
<b>2.3 Résultats et discussions</b>	<b>43</b>
2.3.1 Analyse temporelle	44
2.3.1.1 Comparaison entre RMS en fonction de type des défauts	44
2.3.1.2 Comparaison entre Kurtosis en fonction de type des défauts	46
2.3.1.3 Comparaison entre RMS et Kurtosis en fonction de dimension des défauts	47
2.3.2 Analyse fréquentielle	51
2.3.2.1 Analyse spectrale	51
2.3.2.2 Analyse d'enveloppe	54
<b>2.4 Conclusion</b>	<b>59</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>55</b>
<b>Références bibliographique</b>	<b>58</b>

# Liste des figures

<i>Chapitre I</i>	
<b>Figure I.1.</b> Fonctions de la surveillance.	5
<b>Figure I.2.</b> Etapes d'un projet de diagnostic.	8
<b>Figure I.3 :</b> Principe de base du diagnostic des défauts à base de données.	12
<b>Figure I.4 :</b> Organigramme de classification des machines tournantes	14
<b>Figure I.5:</b> Rotor d'un moteur asynchrone	14
<b>Figure I.6 :</b> La structure non rotative d'un moteur.	15
<b>Figure I.7 :</b> Élément de roulement -montage de roulement avec un élément amortisseur	16
<b>Figure I.8 :</b> Classification des défauts selon leurs origines	17
<b>Figure I.9 :</b> Exemples de défauts induisant un balourd	17
<b>Figure I.10 :</b> balourd statique.	18
<b>Figure I.11 :</b> balourd de couple.	18
<b>Figure I.12 :</b> Balourd dynamique	19
<b>Figure I.13 :</b> Vibratoire théorique d'un balourd dynamique.	19
<b>Figure I.14 :</b> Défauts d'alignement d'arbres	20
<b>Figure I.15 :</b> Désalignement angulaire	20
<b>Figure I.16 :</b> Vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire	20
<b>Figure I.17 :</b> Signal temporel d'un défaut d'alignement	21
<b>Figure I.18 :</b> Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial	21
<b>Figure I.19 :</b> Jeu Mécanique.	22
<b>Figure I.20 :</b> Mauvais serrage mécanique et leur image vibratoire	22
<b>Figure I.21 :</b> Défaut d'usure	23
<b>Figure I.22 :</b> Défaut de piqures	23
<b>Figure I.23 :</b> Défaut de fissuration	24
<b>Figure I.24 :</b> Défauts d'écaillage	24
<b>Figure I.25 :</b> Défauts de fracture	24
<b>Figure I.26 :</b> Représentation fréquentielle d'une denture correcte	25
<b>Figure I.27 :</b> Représentation fréquentielle d'une seule dent détériorée sur un pignon	25
<b>Figure I.28 :</b> Représentation fréquentielle d'un Ensemble des dentures détériorées	26

## *Liste des figures*

<b>Figure I.29</b> : Eléments constitutifs d'un roulement à billes	<b>26</b>
<b>Figure I.30</b> : Bille saine et une autre défailante	<b>27</b>
<b>Figure I.31</b> : Fissure (cassure) et piquetage dans la bague extérieure	<b>28</b>
<b>Figure I.32</b> : Grippage d'un roulement	<b>28</b>
<b>Figure I.33</b> : jeu de roulement	<b>29</b>
<b>Figure I.34</b> : Corrosion d'un roulement	<b>29</b>
<b>Figure I.35</b> :Lubrification d'un roulement	<b>30</b>
<b><i>Chapitre II</i></b>	
<b>Figure II.1</b> : Banc d'essai de roulement de « Bearing Data Center »	<b>36</b>
<b>Figure II.2</b> : RMS (0.007) en fonction de vitesse de rotation pour capteur DE	<b>38</b>
<b>Figure II.3</b> : RMS (0.0014) en fonction de vitesse de rotation pour capteur DE	<b>39</b>
<b>Figure II.4</b> : RMS (0.0021) en fonction de vitesse de rotation pour capteur DE	<b>39</b>
<b>Figure II.5</b> :kurtosis (0.007) en fonction de vitesse de rotation pour capteur DE	<b>40</b>
<b>Figure II.6</b> : kurtosis (0.014) en fonction de vitesse de rotation pour capteur DE	<b>40</b>
<b>Figure II.7</b> : kurtosis (0.021) en fonction de vitesse de rotation pour capteur DE	<b>41</b>
<b>Figure II.8</b> : RMS en fonction de dimensions des défauts (Bague intérieur)	<b>42</b>
<b>Figure II.9</b> : Kurtosis en fonction de dimensions des défauts (Bague intérieur)	<b>42</b>
<b>Figure II.10</b> : RMS en fonction de dimensions des défauts (Bille)	<b>43</b>
<b>Figure II.11</b> : Kurtosis en fonction de dimensions des défauts (bille)	<b>43</b>
<b>Figure II.12</b> : RMS en fonction de variation de vitesse pour le défaut de (bague extérieur)	<b>44</b>
<b>Figure II.13</b> : Kurtosis en fonction de dimensions des défauts (bague extérieure)	<b>45</b>
<b>Figure II.14</b> : Signatures spectrales de roulement à l'état sain (état de référence)	<b>46</b>
<b>Figure II.15</b> : Signatures spectrales de défaut de la bague externe (0.014)	<b>46</b>
<b>Figure II.16</b> :Signatures spectrales de défaut de la bague interne (0.014)	<b>47</b>
<b>Figure II.17</b> : Signatures spectrales de défaut de la bille (0.014)	<b>47</b>
<b>Figure II.18</b> : Signatures d'enveloppe de roulement à l'état sain	<b>48</b>
<b>Figure II.19</b> : Signatures d'enveloppe de pour le défaut de la bague externe	<b>49</b>
<b>Figure II.20</b> : Signatures d'enveloppe de roulement pour le défaut de la bague interne	<b>49</b>
<b>Figure II.21</b> : Signatures d'enveloppe de roulement pour le défaut de billes	<b>50</b>
<b>Figure II.22</b> : évolution de l'amplitude selon la fréquence des défauts	<b>51</b>



# *Liste des tableaux*

Chapitre I

**Tableau I.1:** Les indicateurs de méthode temporelles .....30

Chapitre II

**Tableau. II.1:** Les fréquences des éléments du roulement .....37

## Résumé

La surveillance des vibrations des machines en mouvement a pour objectif principal de fournir une connaissance précoce de l'état de fonctionnement réel de la machine sans interrompre la production, afin d'améliorer la disponibilité et la sécurité, ainsi que d'éviter les pertes de production et d'améliorer. Ce mémoire vise à mettre en œuvre diverses méthodes de traitement vibratoire (temporelle et fréquentielle) et à identifier la technique la plus efficace pour détecter et identifier les défauts d'un roulement, en utilisant un roulement comme exemple d'illustration des machines tournantes. Selon notre étude, ces méthodes sont plus efficaces pour détecter les défauts, mais il reste à discuter de l'identification et de la classification de ces défauts grâce à d'autres techniques plus avancées telles que l'intelligence artificielle.

**Mots clés:** Vibrations, analyse spectrale, maintenance, diagnostic, surveillance, machines tournantes, défauts, roulement. analyse d'enveloppe.

## Abstract

The main purpose of vibration monitoring of moving machines is to provide early knowledge of the actual operating status of the machine without interrupting production, in order to improve availability and safety, as well as to avoid losses of production and improve. This dissertation aims to implement various vibration processing methods (temporal and frequency) and to identify the most effective technique for detecting and identifying defects in a bearing, using a bearing as an illustrative example of rotating machines. . According to our study, these methods are more effective in detecting defects, but it remains to be discussed the identification and classification of these defects using other more advanced techniques such as artificial intelligence.

**Keywords:** Vibrations, spectral analysis, maintenance, diagnosis, monitoring, rotating machines, faults, bearing. Envelope analysis.

### ملخص:

الغرض الرئيسي من مراقبة اهتزاز الآلات المتحركة هو توفير المعرفة المبكرة بحالة التشغيل الفعلية للآلة دون انقطاع الإنتاج، وذلك لتحسين التوافر والسلامة، وكذلك لتجنب خسائر الإنتاج وتحسينه. تهدف هذه الأطروحة إلى تنفيذ طرق معالجة الاهتزازات المختلفة ( المؤقتة والترددية) وتحديد التقنية الأكثر فعالية لكشف وتحديد العيوب في المحامل، وذلك باستخدام المحامل كمث التوضيحي للآلات الدوارة. وبحسب دراستنا فإن هذه الطرق أكثر فعالية في اكتشاف العيوب، لكنني بقي أن ناقش تحديد وتصنيف هذه العيوب باستخدام تقنيات آخر وأكثر تقدماً مثل الذكاء الاصطناعي.

**الكلمات المفتاحية:** الاهتزازات، التحليل الطيفي، الصيانة، التشخيص، المراقبة، الآلات الدوارة، الأعطال، المحامل. تحليل المغلف

# *Introduction générale*

# *Introduction générale*

Dans le domaine industriel, il est essentiel de garantir la sécurité des individus et des équipements, car aucune machine n'est exempte de problèmes. Malgré leur coût initial plus élevé, les outils de surveillance et les capteurs repèrent les pannes potentielles, ce qui en fait une solution rentable à long terme. Les signaux mesurables tels que les courants, les tensions, les vitesses, les vibrations et les températures sont essentiels pour repérer les imperfections. Grâce à ces informations, il est possible de créer des systèmes de surveillance et d'évaluer les performances des machines sans interrompre la production, ce qui permet d'améliorer l'efficacité aux opérations.

Les machines tournantes sont largement utilisées dans les industries d'aujourd'hui. Certains d'entre eux sont très complexes et critiques pour le fonctionnement. La panne de la machine peut entraîner des temps d'arrêt coûteux et des pertes humaines, des biens et de l'environnement. Un système de diagnostic efficace est nécessaire pour prédire de la machine. Par conséquent, une surveillance de l'état efficace et efficiente et système de diagnostic de panne est hautement souhaitable. L'analyse des vibrations est largement utilisée pour la détection de défauts dans machine tournante et pour conserver l'efficacité et performances d'une machine à son niveau optimal. La problématique abordée par cette mémoire c'est l'efficacité des techniques d'analyse vibratoire pour la détection et l'identification des défauts et les facteurs qui influencent ces traitements.

Le but de cette étude est de traiter les données vibratoires provenant d'un banc d'essais expérimentaux pour évaluer l'efficacité des méthodes temporelles et fréquentielles pour détecter et identifier les défauts des machines tournantes. Dans cette étude, nous avons utilisé le roulement comme exemple d'illustration de notre approche, qui s'inscrit dans une démarche de maintenance conditionnelle.

Ce mémoire a été structuré de la manière suivante:

- Chapitre I : ce chapitre focalise sur les concepts fondamentaux de la surveillance et du diagnostic industriels, en mettant l'accent sur l'étude des défauts mécanique des machines

## **Introduction générale**

tournantes. Un aspect crucial de cette étude concerne la technique d'analyse vibratoire, ses principes, objectifs, ainsi que les techniques utilisés pour traiter les données.

La structure de ce mémoire a été la suivante:

- Le premier chapitre se concentre sur les principes essentiels de la surveillance et du diagnostic industriels, en mettant l'accent sur l'analyse des manques mécaniques des machines en mouvement. Une composante essentielle de cette recherche concerne la méthode d'analyse vibratoire, ses principes, ses objectifs, ainsi que les méthodes employées pour traiter les données.
- Dans le deuxième chapitre, on aborde la partie de l'étude de cas. Les données ont été examinées à l'aide de diverses méthodes temporelles et fréquentielles pour trouver la technique la plus appropriée.

La conclusion de ce mémoire sera une synthèse globale qui résume le travail effectué et présente les perspectives envisagées.

**Chapitre I :**  
**A propos de la surveillance et**  
**diagnostic industriel, défauts**  
**mécaniques des machines tournante**  
**et des techniques de l'analyse**  
**vibratoire**

### 1.2 Introduction

Le diagnostic et la surveillance des systèmes sont des domaines cruciaux dans de nombreux secteurs industriels. La fiabilité et l'efficacité des systèmes mécaniques et électroniques dépendent fortement de notre capacité à détecter, diagnostiquer et corriger les défauts de manière proactive. Le traitement de signal joue un rôle central dans ces processus, en permettant de manipuler et d'analyser les signaux issus des systèmes surveillés.

Ce chapitre présente une vue d'ensemble des principales fonctions et techniques de surveillance et de diagnostic, en mettant en évidence les objectifs, les méthodes. Nous explorons les fonctions clés de la surveillance, telles que la détection des défauts, le diagnostic, la supervision, la correction et la maintenance. Ensuite, nous classifions les méthodes de diagnostic en approches analytiques, à base de connaissances et basées sur le traitement de données.

### 1.3 Surveillance et diagnostic industriel

La surveillance et le diagnostic industriels jouent plusieurs rôles essentiels dans le domaine de la gestion et de la maintenance des équipements industriels. Voici une explication alternative sur la surveillance et le diagnostic industriels.

#### 1.3.1 Fonctions de la surveillance

Le rôle de la surveillance consiste à recueillir continuellement tous les signaux provenant du système et de son contrôle, à reconstruire l'état réel du système surveillé, et à effectuer toutes les inférences nécessaires pour générer des données utilisables pour établir des historiques de fonctionnement et mettre en place un processus de traitement des pannes si nécessaire.

La surveillance englobe plusieurs fonctions, comme illustré dans la figure suivante : la détection, le diagnostic (qui inclut la localisation et l'identification), et éventuellement la correction.



*Figure I.1. Fonctions de la surveillance.*

## Chapitre I : Partie théorique

### 1.3.1.1 *Détection de défauts*

La détection fait partie intégrante de la composante “voire” d’un système de surveillance. En utilisant les données collectées sur le système surveillé, cette fonction permet d'identifier la présence de dégradations (surveillance dynamique) ou de défaillances (surveillance classique) au sein du système, et ainsi de qualifier le comportement observé comme normal ou anormal. La fonction de détection génère des signaux symptomatiques à partir des observations, aussi appelés résidus ou discordances par certaines communautés [1] [2].

Par exemple, une méthode courante pour générer des symptômes consiste à comparer certaines valeurs observées à des seuils définissant une situation anormale. Le dépassement d'un seuil indique une anomalie de fonctionnement et déclenche une alarme [3]. Les limites de ces tests de dépassement de seuils incluent la génération de fausses alarmes (seuil trop bas) et la non-détection de certains symptômes (seuil trop élevé). Certains équipements effectuent ce type de test en temps réel pour générer des alarmes et assister les opérateurs de maintenance lors de la phase de diagnostic [4].

Cependant, les alarmes générées par ces tests intégrés (BIT : Built-In Test) se limitent principalement à des symptômes sans fournir d'informations sur leurs causes. Par conséquent, le diagnostic effectué par un opérateur de maintenance basé sur ces événements peut parfois être erroné [5].

### 1.3.1.2 *Diagnostic*

Le diagnostic des défaillances consiste à localiser les éléments du système qui doivent être remplacés ou réparés. Cette fonction est essentielle à la fois pour la maintenance prédictive et corrective, permettant d'identifier les éléments défectueux et de déterminer les actions nécessaires [6]. Le diagnostic prédictif se concentre principalement sur l'analyse des défaillances progressives (dégradations) afin d'éviter les pannes et de planifier à l'avance les interventions de maintenance, telles que la commande de pièces de rechange et la gestion du personnel de maintenance.

Cependant, certaines défaillances soudaines (imprévisibles) ne peuvent pas être anticipées et nécessitent donc un diagnostic [7]. Contrairement aux signaux émis par la fonction de détection, la fonction de diagnostic peut fournir des informations détaillées à un opérateur de maintenance, en précisant les causes probables des dysfonctionnements détectés [3].



## Chapitre I : Partie théorique

Selon les besoins des utilisateurs du système de surveillance, le diagnostic peut permettre d'identifier un composant physique défectueux ou un mode de défaillance spécifique [8].

### **1.3.1.3 Supervision**

La supervision est une macro-fonction regroupant à la fois des tâches de commande et de surveillance. Son rôle consiste à piloter l'exécution de la séquence d'opérations et à garantir la gestion ainsi que la commande en temps réel des ressources nécessaires à cette exécution, quel que soit le mode de fonctionnement du système, qu'il soit normal ou qu'il présente des **défaillances** :

- En situation normale, la supervision surveille et contrôle le déroulement des opérations.
- En cas de défaillance, la supervision prend les décisions nécessaires pour rétablir le comportement normal [9].

Malgré l'automatisation croissante, l'opérateur reste souvent le maillon "intelligent" de la boucle de surveillance : il est chargé d'analyser la situation et de prendre les décisions appropriées. De plus, suite à une défaillance ou une dérive, les moyens de réaction sont souvent manuels ou semi-automatiques. L'analyse de l'opérateur est facilitée par la mise en place d'interfaces ergonomiques fournissant différentes perspectives du système sous forme de synoptiques. Ces interfaces reproduisent l'installation et affichent en temps réel les grandeurs mesurées. Parmi les exemples d'interfaces industrielles, on trouve des systèmes tels que Vivale, Areal, Ordinal Technologies, Meta, Actors Solutions, etc. [10].

### **1.3.1.4 Correction**

La reprise consiste à remédier à la panne. Dans sa forme la plus simple, cela implique le remplacement de l'élément défaillant.

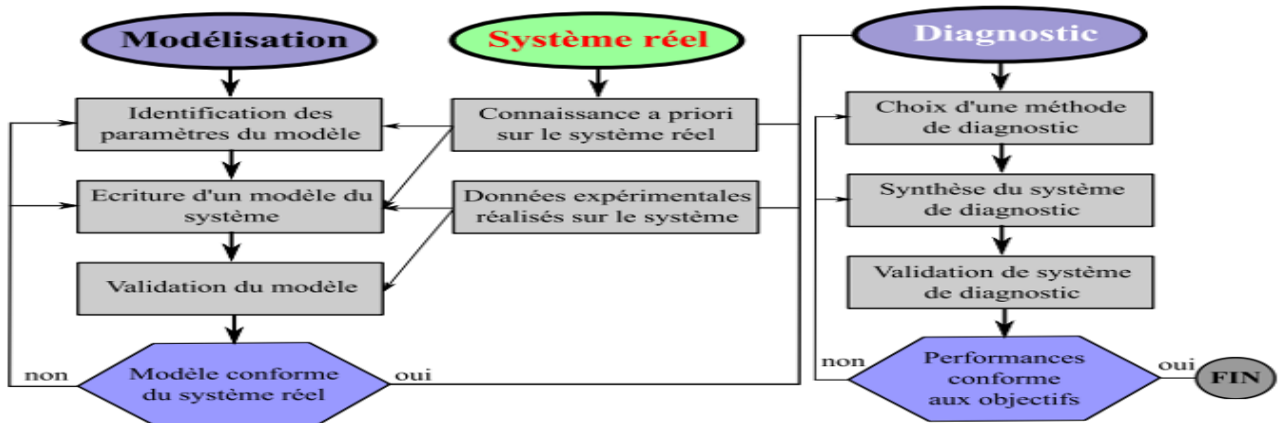
## **1.3.2 Classification des méthodes de diagnostic**

Le contrôle des processus joue un rôle très important dans le domaine de la gestion des unités de production. Malgré l'immense progrès dans le domaine de l'automatisation des processus ces trois dernières décennies, le contrôle ou la supervision restent largement une activité manuelle, effectuée par des opérateurs humains. Cette dépendance aux opérateurs humains pour faire face en urgence à des événements anormaux est devenue de plus en plus difficile en raison de plusieurs facteurs. Le contrôle est compliqué en raison de la taille et la complexité des installations industrielles modernes. Il est difficile en raison de la vaste portée de

## Chapitre I : Partie théorique

l'activité de supervision qui englobe une variété de tâches à résoudre. Il s'agit de détecter en temps opportun un événement anormal, diagnostiquer ses origines, puis prendre des décisions de contrôle et de surveillance, appropriés.

A l'heure actuelle, il existe plusieurs communautés de recherche, telles que la communauté de l'automatique, de la productique, de l'intelligence artificielle qui s'intéressent au domaine de la supervision, et plus particulièrement au diagnostic, dans le but principal d'assister les opérateurs dans la gestion des événements anormaux. En raison du grand intérêt donné aux problèmes rencontrés dans le domaine du diagnostic, différentes approches ont été développées au cours de ces dernières années. Les différentes techniques de diagnostic ont pour objectif la comparaison du fonctionnement du système réel à une référence illustrant son fonctionnement normal ou ses fonctionnements anormaux. Elles exploitent donc toutes, une certaine forme de redondance de l'information. Cette redondance peut être développée à partir d'une compréhension profonde de la physique du système **Figure I.2**.



*Figure I.2. Etapes d'un projet de diagnostic.*

Dans certains cas, à cause de la complexité du système ou d'un manque de données, établir un modèle analytique devient très difficile. Par contraste, lorsque les seules informations disponibles sur le système proviennent des expériences passées sur le système, le traitement de ces informations conduit à la construction d'un modèle de type boîte noire. C'est l'approche dite à base de données. D'un point de vue philosophique, toutes les activités, ou techniques de diagnostic de défaut dépendent de modèles sous une forme ou une autre. Les modèles sont tout simplement des représentations compactées de la connaissance, qui peuvent être obtenues d'une manière soit explicite ou implicite [11]. Les connaissances explicites existent sous la forme

## Chapitre I : Partie théorique

d'équations, des faits, des règles, des heuristiques, etc. En revanche, la connaissance implicite (tacitknowledge) est plus difficile à définir. Elle consiste à des opérations que les humains savent faire, sans nécessairement pouvoir expliquer comment les faire [12].

Dans cette section, nous présentons les principales méthodes de diagnostic recensées dans la littérature [13] [14]. Le choix d'une méthode par rapport à une autre dépend fortement de la connaissance à priori du système, ainsi que du type d'information retenue sur le système. Une classification de ces méthodes est adoptée par [Varanon Uraikul 2007](#), les approches à base d'un historique de données (data-driven approach), les approches analytiques (analytical approach), les approches à base de connaissances (knowledge-based approach).

### **1.3.2.1 Approches analytiques**

Les modèles analytiques sont des représentations mathématiques des lois gouvernant l'évolution des variables d'un système. En d'autres termes, le système est décrit par un ensemble d'équations dérivées des lois de la physique, de la chimie, ou d'autres disciplines, en fonction de la nature du système étudié. Les approches analytiques impliquent la construction d'un modèle représentant le bon fonctionnement du système, servant de référence pour être comparé aux comportements observés du système réel. Les différences entre les variations prévues par le modèle et celles observées dans le système réel sont interprétées comme des indicateurs de défaillance. Parmi les approches analytiques, on peut citer les méthodes d'estimation de paramètres, d'estimation d'état, et d'espace de parité.

#### **- Méthode d'estimation paramétrique**

Partant de l'idée qu'un défaut se manifeste par des variations dans les paramètres physiques du système, cette méthode repose sur l'existence d'un modèle paramétrique décrivant le comportement du système, avec des valeurs de ces paramètres connus en conditions normales de fonctionnement. Le principe de base consiste à estimer en continu ces paramètres en utilisant les mesures des entrées et des sorties du système. La différence entre cette estimation et la valeur de référence est alors considérée comme un résidu.

#### **- Méthode d'espace de parité**

La méthode de l'espace de parité est l'une des premières techniques utilisées dans le domaine du diagnostic de défauts [15] [16]. Le principe de cette approche repose sur la vérification de la cohérence (ou parité) entre les relations mathématiques du système et les mesures provenant des

## Chapitre I : Partie théorique

capteurs et des entrées. L'idée centrale est de pouvoir exprimer une mesure (variable du système) en fonction des autres variables à travers une relation mathématique connue. On distingue deux types de relations analytiques [17]:

1. Redondance statique : un ensemble de relations algébriques entre les mesures fournies par les différents capteurs.
2. Redondance dynamique : un ensemble d'équations différentielles ou récurrentes entre les sorties et les entrées du système.

### - **Méthode à base d'observateurs [18]**

L'observateur d'état est l'une des techniques les plus couramment utilisées en automatique, tant pour l'élaboration de lois de commande que pour la mise en œuvre de stratégies de diagnostic. La redondance analytique est obtenue grâce aux états estimés à partir d'un modèle adéquat et d'un ensemble de mesures appropriées. Le principe fondamental du diagnostic par observateur consiste à estimer la sortie du système à partir des grandeurs mesurables (entrées et sorties).

Un observateur d'état, également appelé reconstruteur d'état ou estimateur, est un système dynamique dont les entrées sont les entrées et sorties du processus réel, et dont la sortie est une estimation de l'état du système. Le vecteur résidu est alors construit comme la différence entre la sortie estimée par l'observateur et la sortie mesurée sur le processus physique. Ce résidu sert d'indicateur fiable de la présence de défauts.

### **1.3.3 Approches à base de connaissances [18]**

Dans de nombreux cas pratiques, il devient extrêmement difficile d'acquérir une compréhension complète d'un processus réel afin de créer un modèle analytique, en raison de sa complexité structurelle ou de son comportement. Par conséquent, il est largement reconnu que l'opérateur humain peut fournir une supervision plus efficace en utilisant ses propres connaissances et son expérience pour garantir le bon fonctionnement du système. Pour traiter les connaissances incomplètes des systèmes, une autre approche consiste à effectuer des abstractions en fonction du raisonnement et des connaissances de l'expert sur la structure et le comportement du processus.

Les technologies de l'intelligence artificielle, telles que les systèmes experts, la logique floue et les réseaux de neurones, peuvent être adoptées dans cette situation. L'objectif de l'intelligence artificielle est de simuler les processus cognitifs humains. En effet, le diagnostic implique la résolution d'un problème inverse de type "cause → effet". Il s'agit de remonter des

## Chapitre I : Partie théorique

effets constatés, que nous appelons les symptômes observables, au défaut, c'est-à-dire à l'élément défaillant.

### - **Systemes experts**

Les experts humains sont capables d'effectuer un niveau élevé de raisonnement en raison de leur vaste expérience et de leurs connaissances dans leur domaine d'expertise. Un système expert est un outil qui utilise les connaissances correspondant à un domaine spécifique pour reproduire les mécanismes cognitifs d'un expert humain. Plus précisément, un système expert est un logiciel capable de répondre à des questions en effectuant un raisonnement à partir de faits et de règles connus. Il peut servir notamment comme un outil d'aide à la décision basé sur un moteur d'inférence et sur une base de connaissances. En somme, un système expert représente la transcription logicielle de la réflexion d'un expert dans un domaine donné.

### - **Réseaux de neurones**

Les réseaux de neurones artificiels reproduisent des caractéristiques biologiques clés, comme l'apprentissage et la généralisation. Ils utilisent deux types d'algorithmes d'apprentissage : supervisé et non supervisé. Dans l'apprentissage supervisé, un superviseur fournit une sortie cible pour chaque entrée, et le réseau ajuste ses paramètres pour minimiser l'erreur entre la sortie réelle et la sortie cible. Dans l'apprentissage non supervisé, il n'y a pas de sortie cible, et les paramètres sont ajustés selon un critère de convergence prédéfini.

La généralisation permet au réseau d'appliquer les connaissances acquises à de nouvelles données. Cette technique établit une relation entre les variables d'entrée et de sortie, permettant d'évaluer l'état de fonctionnement du système.

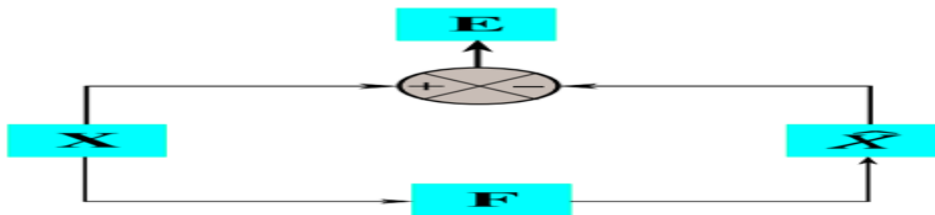
#### ***1.3.3.1 Approches à base de traitement de données (Data-Driven Approach)***

La détection et le diagnostic rapides d'événements anormaux dans un procédé industriel revêtent une importance cruciale pour minimiser les temps d'arrêt des installations, accroître la sécurité des opérateurs et garantir la disponibilité des unités de production. Cependant, dans de nombreux cas, des incertitudes persistent entre le comportement du système réel et l'évolution du modèle. Ces incertitudes découlent à la fois d'un manque de connaissances exhaustives sur le fonctionnement de l'équipement et du fait que le modèle ne prend en compte qu'une partie des paramètres influant sur la sortie. De plus, dans certains cas pratiques, l'obtention d'un tel modèle est presque impossible. Comme les processus industriels sont généralement complexes à

## Chapitre I : Partie théorique

modéliser, une approche théorique rigoureuse est souvent impraticable, ce qui limite considérablement l'applicabilité de ces techniques.

Les techniques de surveillance les plus efficaces dans la pratique sont celles qui reposent sur des modèles implicites, construits principalement à partir de l'historique des données de processus. Pour les méthodes basées sur les données, seule une grande quantité d'informations sur l'historique de fonctionnement des différents capteurs et actionneurs du système est nécessaire. En effet, plusieurs techniques se distinguent pour transformer cette base de données en une connaissance du système. Elles sont largement utilisées dans l'industrie pour surveiller et diagnostiquer les procédés industriels en raison de leur simplicité et de leur efficacité dans le traitement de grandes quantités d'informations. Le principe de base de la modélisation de ces approches est résumé dans la figure I.3. [11].



*Figure I.3.. Principe de base du diagnostic des défauts à base de données.*

On note que,  $\mathbf{X}$  est une matrice de données qui regroupe l'historique de l'ensemble de données à surveiller.  $\mathbf{F}$  est une matrice des caractéristiques extraites à partir de l'historique de données  $\mathbf{X}$ .  $F$  est une matrice d'information qui représente toute information pertinente sur le fonctionnement processus. La matrice  $F$  est un modèle implicitement établi à partir de données historiques d'entrées et de sorties du système.  $\hat{\mathbf{X}}$  est la matrice estimée.  $\mathbf{E}$  est la matrice résiduelle, considérée aussi comme une matrice d'évaluation des résidus, qui aide à la décision.

Parmi les approches nombreuses à base de données, on trouve l'Analyse en Composantes Principales (ACP). La méthode d'analyse en composantes principales (ACP) peut faciliter le contrôle de L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une technique de réduction de dimension qui caractérise l'état d'un processus en projetant les données dans un espace de dimension inférieure. Elle produit une représentation réduite de l'information tout en préservant la structure de corrélation entre les variables du processus. La méthode, proposée par Karl Pearson en 1901 et développée par Hotelling en 1947 [13], vise à définir un ensemble de

## Chapitre I : Partie théorique

composantes principales constituées d'une combinaison linéaire des variables originales. Ces composantes capturent la variance la plus pertinente des données, tandis que les dernières représentent la variance résiduelle. Elles sont orthogonales et conservent la corrélation entre les variables du processus. Les composantes principales sont calculées à l'aide de la décomposition en valeurs et vecteurs propres de la matrice de covariance des données, qui représente les conditions normales de fonctionnement du processus. Ces composantes représentent les valeurs des variables mesurées, transformées dans un nouvel espace de dimension réduite. L'objectif de l'ACP est de maximiser la capture de variabilité des données. Les vecteurs résultant de la projection des mesures sur les composantes principales sont considérés comme des caractéristiques extraites du fonctionnement du système. Cette méthode trouve de nombreuses applications, notamment dans la réduction de dimension, la suppression de bruit, la compression de données et la détection des défauts [19].

Le développement d'une stratégie de surveillance et de diagnostic repose sur le choix de la méthode en fonction de la nature et des connaissances du système étudié. La comparaison entre différentes méthodes est difficile ; il est plus utile de s'assurer que le système de diagnostic est performant en définissant certains critères de performance : erreurs de détection, temps de détection, et exigences de calcul.

### 1.4 Défauts mécaniques des machines tournante

#### 1.4.1 Définitions et classification des machines tournantes

##### 1.4.1.1 Définitions des machines tournantes [20], [21]

Une machine est un assemblage de pièces mécaniques, hydrauliques et électriques collaborant pour accomplir une ou plusieurs fonctions, notamment l'application d'une force pour surmonter une résistance ou assurer un mouvement. Les machines rotatives sont des systèmes qui comprennent un rotor, une structure et des liaisons. Elles peuvent varier de structures simples, composées d'un seul arbre en rotation, à des machines complexes avec plusieurs arbres tournants à différentes vitesses.

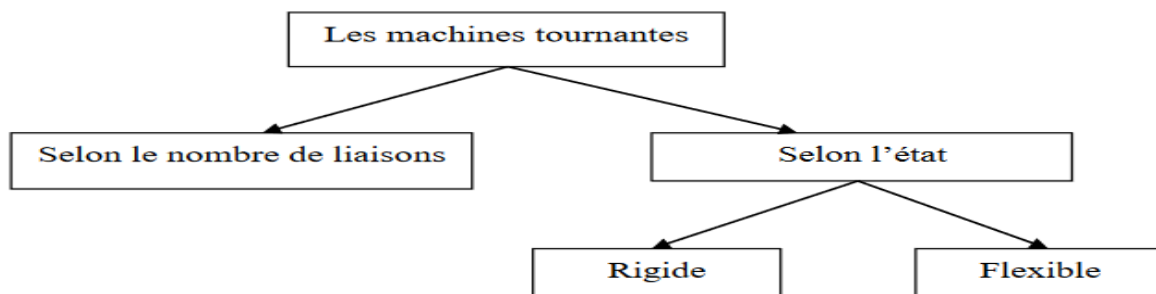
Selon la norme NF C 01 441 : une machine électrique rotative utilise l'induction magnétique pour son fonctionnement et est constituée d'éléments capables de mouvements de rotation en vue de la transformation d'énergie. Ces machines complexes sont soumises à des

## Chapitre I : Partie théorique

contraintes mécaniques importantes et à des environnements industriels difficiles, susceptibles de provoquer des défaillances.

Comme par exemple, les turbines, pompes, moteurs, compresseurs, alternateurs, centrifugeuses, ventilateurs... toutes ces machines, appelées "rotatives", partagent une caractéristique commune : la présence d'organes en rotation. Selon les cas, elles peuvent être des structures relativement simples avec un seul arbre en rotation, ou des machines plus complexes composées de plusieurs arbres tournant à des vitesses différentes.

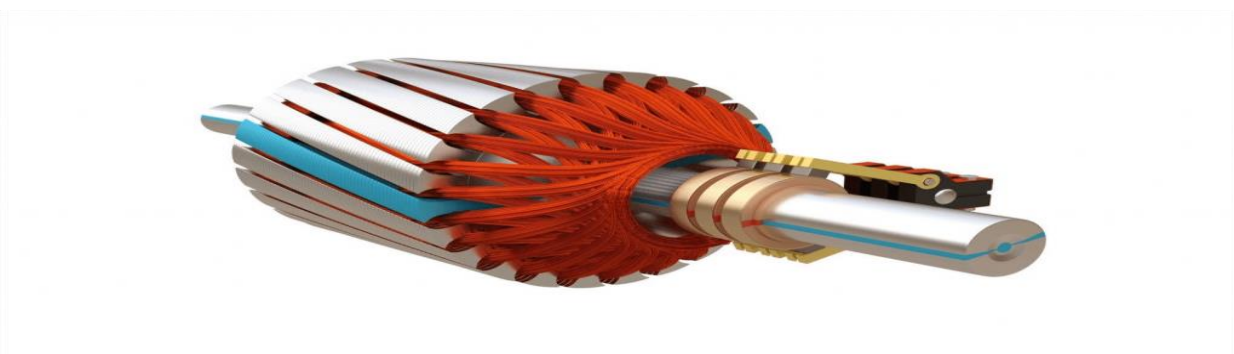
Les machines tournantes peuvent être classées selon plusieurs critères à savoir :



*Figure I.4. Organigramme de classification des machines tournantes*

### 1.4.1.2 Rotor

Le rotor est une structure dont les éléments tournent autour d'une ligne de rotation définie en fonction de l'état mécanique de ce dernier. Cette ligne de rotation est généralement distincte d'un axe, souvent inclinée vers la gauche plutôt qu'une ligne droite. Fabriqué à partir de divers matériaux tels que l'acier, le cuivre, le bois et le plastique, le rotor accomplit différentes fonctions, notamment la manipulation fluide, la manipulation de solides, ainsi que le parcours à travers un champ électromagnétique, etc. [22]



*Fig. I.5. Rotor d'un moteur asynchrone*



### 1.4.1.3 Structure

C'est par lui que les séismes perturbent les machines tournantes

- **Les coussinets (bagues) de faibles dimensions au droit de tourillons de rotor, eu vent être remplacés par des roulements.**
- **Les palier** squire lient les coussinets au stator.
- **Le stator** ou enveloppe de la machine, il contient des éléments essentiels : Circuit magnétiques dans les machines électriques, ailettes pour les turbomachines...
- **Le massif** des systèmes embraqués peut prendre des formes beaucoup plus variées que celles des systèmes terrestres dont les massifs sont liés aux radiers. Une interface adapte le stator au massif.

Cette adaptation exige de résoudre un problème qui relève de la suspension des machines dont peut dépendre la tranquillité vibratoire, spécialement celle de l'environnement.

**Le radier** est un élément spécifique aux systèmes terrestres assurant la liaison entre le massif et le sol. Il sert à limiter les pressions exercées au sol dans des valeurs acceptables. [21].



*Figure 1.6. La structure non rotative d'un moteur.*

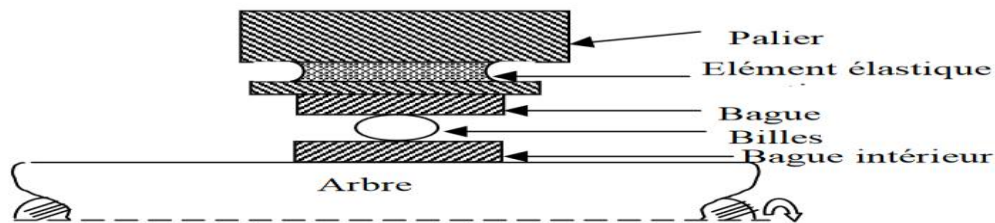
### 1.4.1.4 Liaisons

Le rotor est lié à la structure non rotative par des liaisons qui assurent le guidage des rotors. Les liaisons sont classées dans trois ensembles : à fluide, à roulements, magnétique [21].

- Les liaisons fluides : ce sont les paliers lisses, en fait c'est l'huile de lubrification qui constitue la liaison entre le rotor et le coussinet. Pendant le fonctionnement, des rotors montés sur des paliers lisses, c'est à l'huile de lubrification (de grande viscosité) d'apporter plus d'amortissement indispensable au fonctionnement tranquille des machines tournantes.

## Chapitre I : Partie théorique

- Les liaisons à roulements : la bague intérieure est montée sur le rotor et la bague extérieure dans le palier, la liaison s'organise par un épilâmes entre les billes et les bagues **figure (I.5)**.
- Les liaisons magnétiques : sont utilisées dans les machines-outils, les machines des satellites, celles de la médecine, les volants d'inertie embarqués pour la restitution d'énergie.



*Figure I.7. Elément de roulement - montage de roulement avec un élément amortisseur [21].*

### 1.4.2 Défaillances d'origine mécanique des machines tournante

Le diagnostic de l'état d'une machine n'est réalisable qu'en identifiant les symptômes vibratoires associés à chaque défaillance potentiellement affectante ladite machine. En d'autres termes, la capacité de formuler un diagnostic précis dépend de la connaissance des signatures vibratoires induites par ces défauts particuliers, ainsi que de la compréhension de la cinématique de la machine. En ayant accès à ces informations, il devient envisageable d'évaluer l'état global de la machine. Par ailleurs, les défauts caractéristiques des machines électriques et des systèmes d'entraînement peuvent être classés en deux catégories distinctes en fonction de leurs origines : internes et externes. Les défauts internes résultent des composants de la machine tels que les bobinages du stator et du rotor, les circuits magnétiques, la cage rotorique, l'entrefer mécanique, etc. Quant aux défauts externes, ils sont causés par des facteurs externes tels que le type d'alimentation, la charge mécanique, ainsi que l'environnement d'utilisation de la machine. Cette distinction permet de mieux cibler les sources potentielles de dysfonctionnement et facilite le processus de diagnostic.

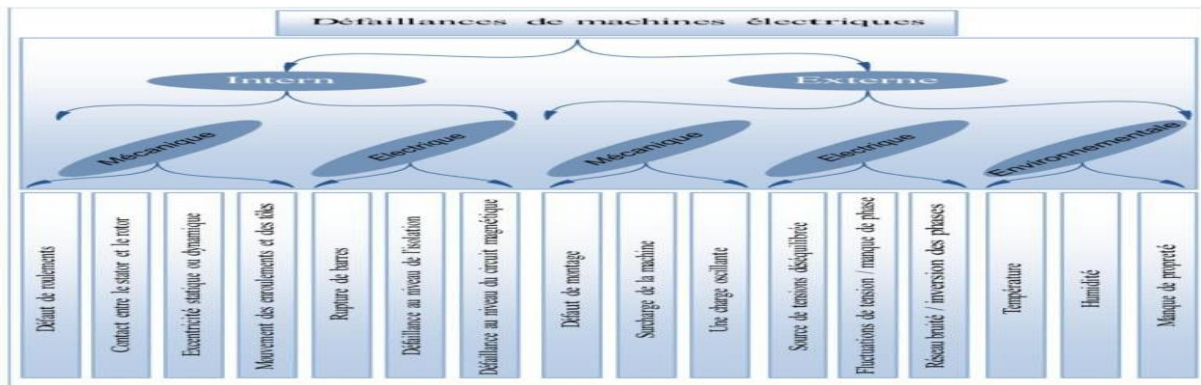


Figure I.8. Classification des défauts selon leurs origines [23]

### 1.4.2.1 Défaut de balourd

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor. De cette non- concentricité, résulte l'application de forces centrifuges proportionnelle à la vitesse de rotation selon la relation, qui déforment le rotor. On dit que le rotor présente un balourd. Ce balourd provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage, ou sont la conséquence :

- D'une altération mécanique : perte d'ailette, érosion ou encrassement, ... [figure I.09.],
- D'une altération thermique : déformation suite à des dilatations différentes des matériaux constituant le rotor ou à des différences de température localisées [24].

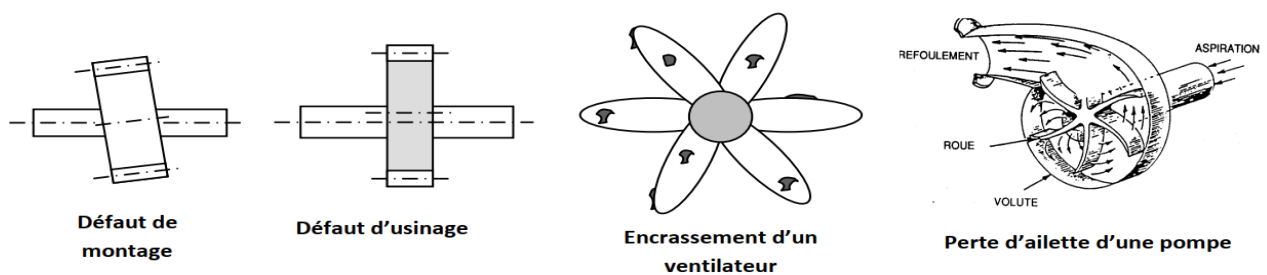


Figure I.9. Exemples de défauts induisant un balourd [24]

#### - Balourd statique

Le balourd statique est la condition de déséquilibre où l'axe central principal est décalé parallèlement au centre de rotation.

Le balourd statique, peut être décelé en plaçant la pièce ouvrière sur des tranchants de couteaux parallèles. Le coté lourd du rotor se déplacera vers le bas.

## Chapitre I : Partie théorique

Le balourd statique, peut souvent être décelé en comparant l'amplitude et la phase de vibration du palier ou de l'arbre aux bouts du rotor. On a trouvé des lectures d'amplitudes et de phase de vibration identiques mesurées aux paliers ou à chaque bout de l'arbre.

Ce type de balourd peut être corrigé en ajoutant ou en enlevant du poids dans un seul plan de correction.



Figure I.10. Balourd statique.

### - Balourd de couple

Le couple est tout simplement deux forces parallèles égales agissant en direction opposée, mais sur la même ligne droite. Le balourd à chaque extrémité du rotor, mais sur des côtés opposés de la ligne du centre de rotation, crée un déséquilibre de couple. Le balourd de couple devient apparent seulement lorsque la pièce est en rotation, et peut souvent être identifié en comparant les lectures d'amplitudes et de phase de vibration du palier au de l'arbre à chaque bout de rotor.

Les lectures d'amplitudes sont égales, mais les lectures de phase seront en désaccord de 180°.

Contrairement au balourd statique, qui peut être corrigé sur un seul plan, le balourd de couple ne peut être corrigé qu'en faisant des corrections d'équilibre sur deux plans.

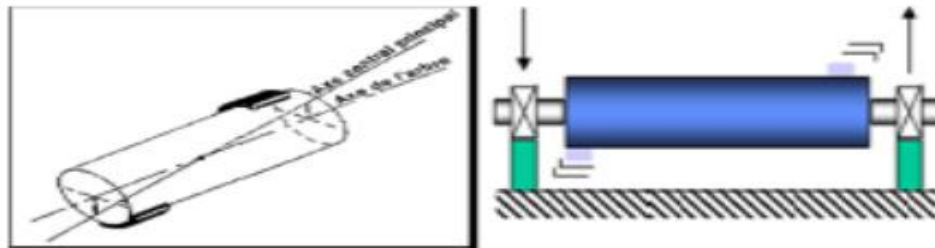
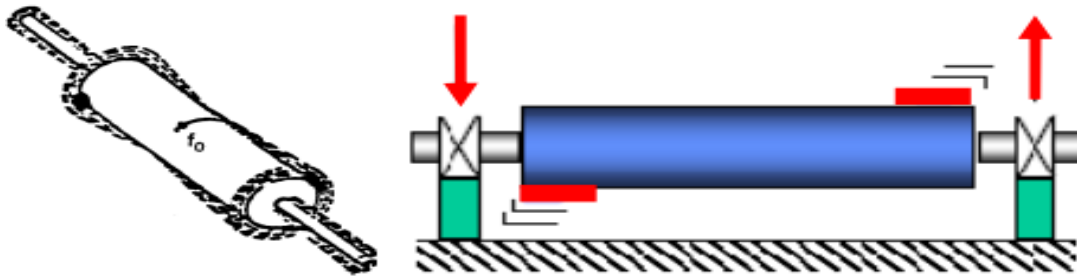


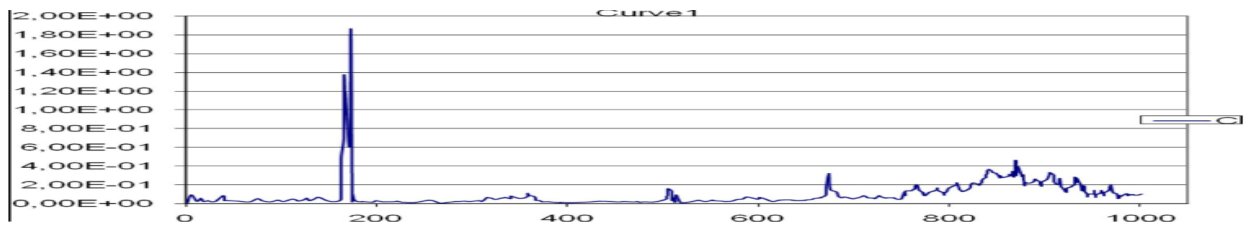
Figure I.11. Balourd de couple.

### - Balourd dynamique

Déphasage de 180° autour du roulement et Principalement des vibrations radiales [25].



*Figure I.12. Balourd dynamique [27]*



*Figure I.13. vibratoire théorique d'un balourd dynamique.*

### **1.4.2.2 Désalignement**

Le désalignement est un problème presque aussi commun que le balourd, et la raison en est bien simple. Malgré l'emploi de paliers auto-alignant, et d'accouplements flexibles, il est difficile d'aligner deux arbres, ainsi que leurs paliers afin d'assurer qu'il n'existe aucune force qui puisse causer de vibration.

Un désalignement provoque des vibrations aux fréquences de rotation, ainsi qu'aux harmoniques d'ordre 2, 3 et parfois 4 de la fréquence de rotation.

Un désalignement se produit par des niveaux [26] : Axiaux très élevés à deux fois la fréquence de rotation et Radiaux élevés à deux fois la fréquence de rotation. On constate deux types de désalignement (parallèle et angulaire).

#### **- Désalignement d'arbres accouplés**

Les axes des deux rotors peuvent présenter un désalignement angulaire lors de l'accouplement, un désalignement radial (défaut de concentricité) ou une combinaison des deux. (Voir Figure I.14.) [24].

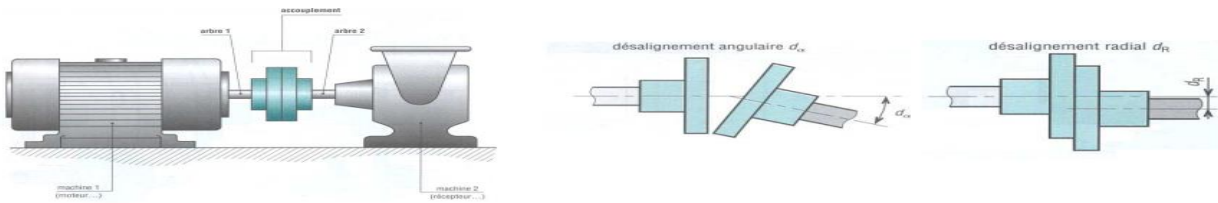


Figure I.14. Défauts d'alignement d'arbres [24]

- **Défaut de désalignement angulaire**

L'alignement angulaire est constaté lorsque les axes des arbres se situent dans le même plan mais ne sont pas parallèles.

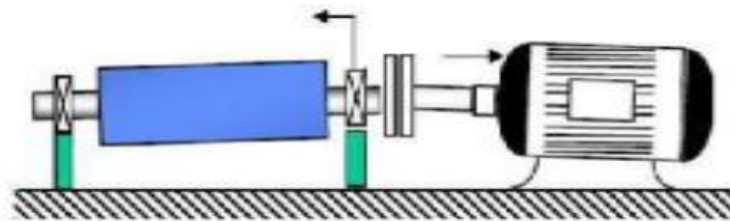


Figure I.15. Désalignement angulaire [23]

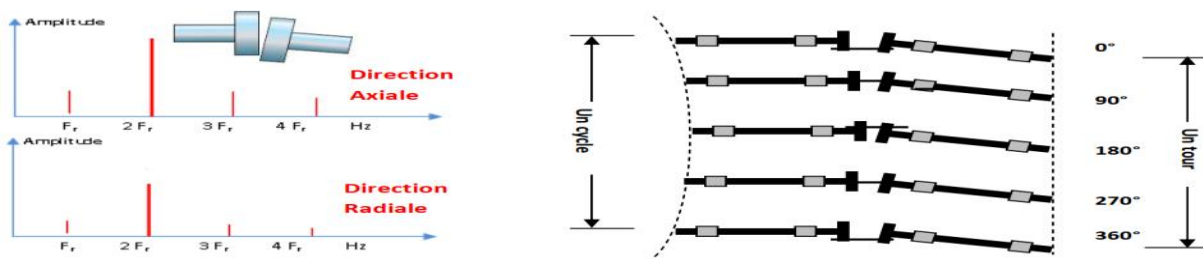


Figure I.16. Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire

- **Défaut de désalignement radial**

Le signal temporel d'un défaut de désalignement présente une allure similaire à celle illustrée dans la **figure I.17**. On observe un phénomène périodique à la fréquence de rotation (avec une période équivalente à un tour), ainsi que des phénomènes récurrents à chaque demi-tour et tiers

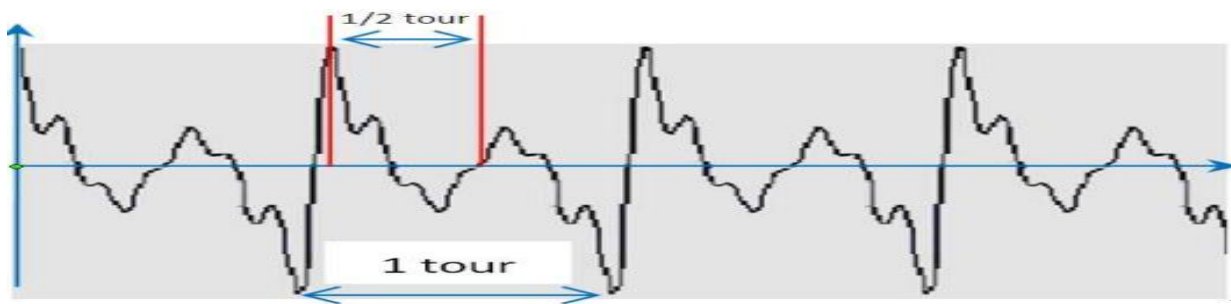


## Chapitre I : Partie théorique

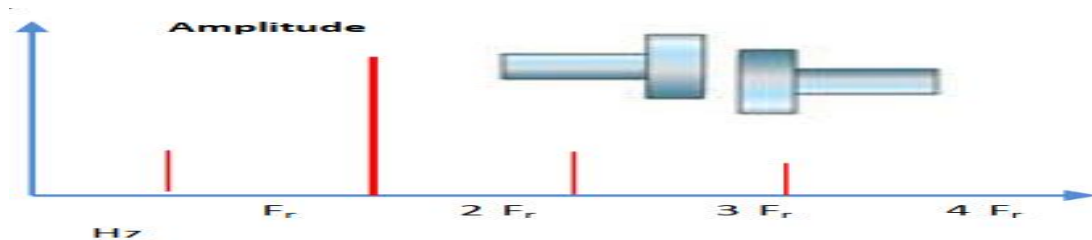
de tour. Cela se traduit généralement par la présence de composantes d'ordre 2, 3, voire 4 fois la fréquence de rotation, avec des amplitudes supérieures à celles de la composante d'ordre 1.

Un désalignement se manifeste par un pic d'amplitude prépondérante, généralement à 2 fois la fréquence de rotation, parfois à 3 ou 4 fois cette fréquence. On observe une vibration dans la direction **radiale**, principalement de composante d'ordre 2 de la fréquence de rotation, parfois

d'ordre 3, voire exceptionnellement d'ordre 4. Les **amplitudes supérieures** dans ces ordres sont souvent plus élevées que celles des composantes d'ordre 1, comme illustré dans la **figure I.18**. Ce même phénomène se manifeste également dans la direction axiale.



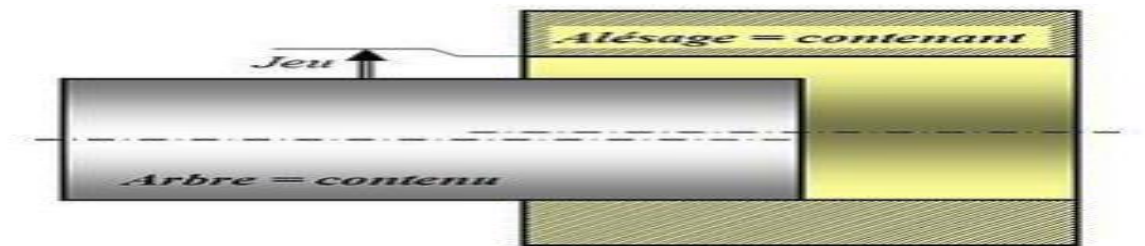
*Figure I.17. Signal temporel d'un défaut d'alignement*



*Figure I.18. vibratoire d'un défaut d'alignement radial [24]*

### 1.4.2.3 Jeu mécanique

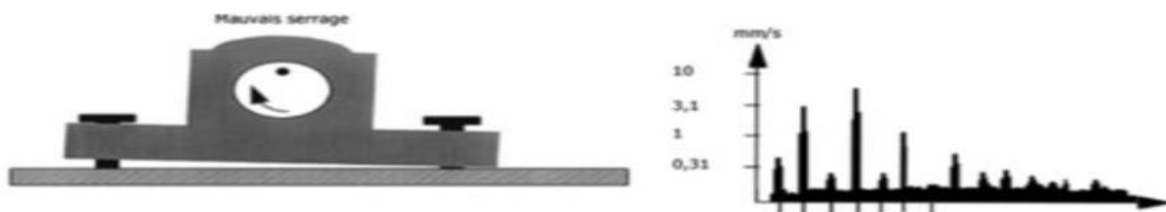
La figure suivante montre le spectre typique d'un jeu mécanique associé au mauvais serrage d'un roulement et à celui d'un jeu d'arbre excessif. La vibration causée par un problème de jeu mécanique est souvent caractérisée par un deuxième harmonique élevé ( $2\times$ ) de la fréquence de rotation, accompagné de composantes inter harmoniques ( $0.5\times$ ,  $1.5\times$ , etc.) [27].



*Figure I.19. Jeu Mécanique.*

### **1.4.2.4 Défauts d'un mauvais serrage mécanique**

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



*Figure I.20. Mauvais serrage mécanique et leur image vibratoire.*

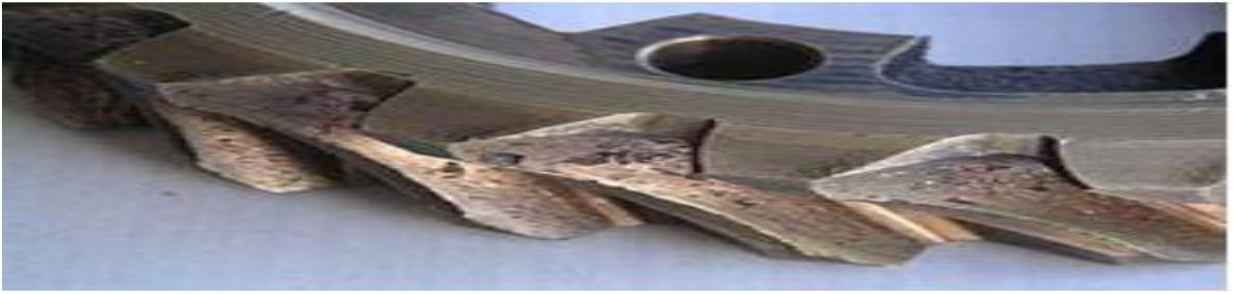
### **1.4.2.5 Défauts d'engrenages**

Les engrenages ont pour fonction de transmettre une puissance d'un arbre en rotation à un autre arbre tournant à une vitesse généralement différente, les deux vitesses ont un rapport constant. On peut distinguer pour les dentures d'engrenages deux types de défauts, des défauts uniformes et d'autres localisés. [25]

#### **- Défauts uniformes**

Les défauts uniformes concernent, en général toutes les dents, on peut en citer deux exemples :





*Figure I.21. Défaut d'usure*

[25]. L'usure, représentée par la Figure I.21, est un enlèvement de matière dû au glissement des deux surfaces de contact. Il peut modifier le profil des dents et conduire à un mauvais fonctionnement de l'engrènement.

Le défaut de piqûres (pitting) est présenté par figure I.22. Il s'agit de trous plus ou moins profonds qui affectent toutes les dents, il peut évoluer suivant les matériaux jusqu'à la destruction de la denture.



*Figure I.22. Défaut de piqûres*

### - *Défauts localisés*

Quant aux défauts localisés, ils ne concernent que quelques dents et se répartissent en trois types : La fissuration, l'écaillage et la fracture.

La fissuration d'une dent représentée par la figure I.23. Conduit rapidement à la rupture de la dent.



*Figure I.23. Défaut de fissuration*

L'écaillage est représenté par la figure I.25. Il s'agit également de trous ; mais ceux-ci sont moins nombreux, plus profonds et plus étendus que ceux du pitting.



*Figure I.24. Défauts d'écaillage*

La fracture qui est représentée par la figure I.26, est un état de dégradation avancé de l'engrenage, elle génère des chocs importants sur le signal temporel



*Figure I.25. Défauts de fracture*

### - *Vibrations d'engrenages*

Les vibrations induites par les engrenages ont une amplitude importante. Même en l'absence de défauts, les impulsions données à chaque engrènement provoquent des vibrations émergeant nettement du niveau global du bruit. Le défaut soit significatif, si l'amplitude de la fréquence (raie) d'engrènement augmente ou s'il y a une génération d'autres fréquences (harmoniques et

## Chapitre I : Partie théorique

modulation de la fréquence d'engrènement). Les figures I.27, I.28 et I.29 représentent les allures spectrales des différents cas d'une denture d'engrenage. [25]

### a) Denture correcte

Une denture correcte montre les fréquences des deux arbres plus la fréquence d'engrènement. [28] La fréquence d'engrènement. Où  $N$  représente le nombre de dents



Figure I.26. Représentation fréquentielle d'une denture correcte

### b) Une seule dent détériorée sur un pignon

Si une seule dent est détériorée, il y aura un choc périodique à chaque tour de la roue on verra donc de nombreuses harmoniques de la fréquence de rotation de l'engrenage en cause ( $n$ ).

La gravité du problème sera en fonction du nombre d'harmoniques (5 et plus)

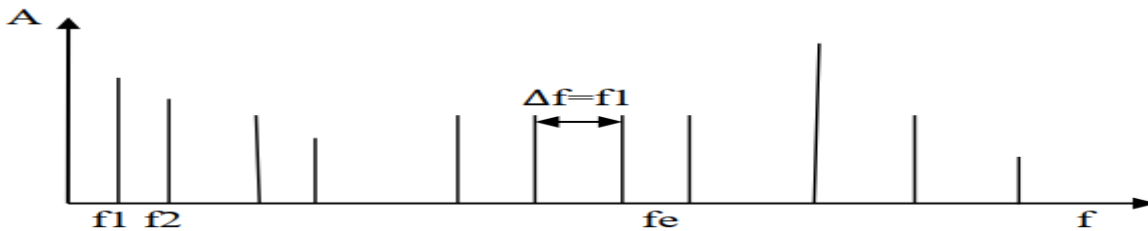


Figure I.27. Représentation fréquentielle d'une seule dent détériorée sur un pignon

### c) Ensemble des dentures détériorées

Si on détecte de nombreuses harmoniques de la fréquence d'engrènement (3 et plus un choc à chaque dent), Alors l'ensemble des dentures est détérioré La gravité du problème n'est pas montrée par les amplitudes, mais par le nombre d'harmoniques ( $x$ ). [25]

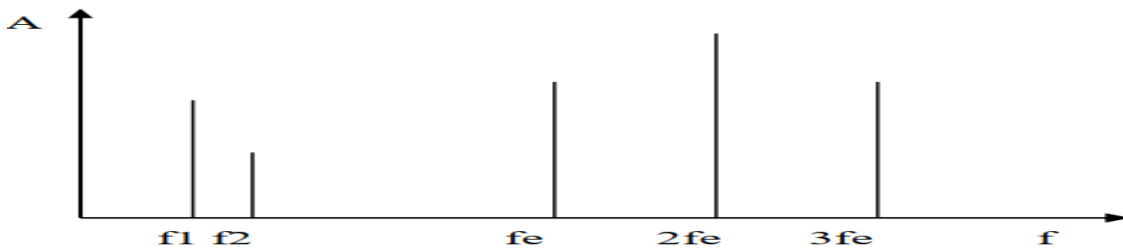


Figure I.28. Représentation fréquentielle d'un Ensemble des dentures détériorées

#### 1.4.2.6 Défauts de roulement

Les défauts de roulement se manifestent comme des défauts d'asymétrie au rotor, qui sont usuellement rangés dans la catégorie des défauts relatifs à l'excentricité [26], [27]. Un défaut de roulement se manifeste par la répartition continue du contact défectueux [28], [29]. Le type de roulement dans notre étude est les roulements à billes qui sont constitués de quatre éléments : une bague externe, une bague interne et une rangée de billes gardées par une cage, ainsi que de la graisse pour un mouvement souple (lubrification). La Figure I.30. illustre les différents éléments constitutifs le roulement.

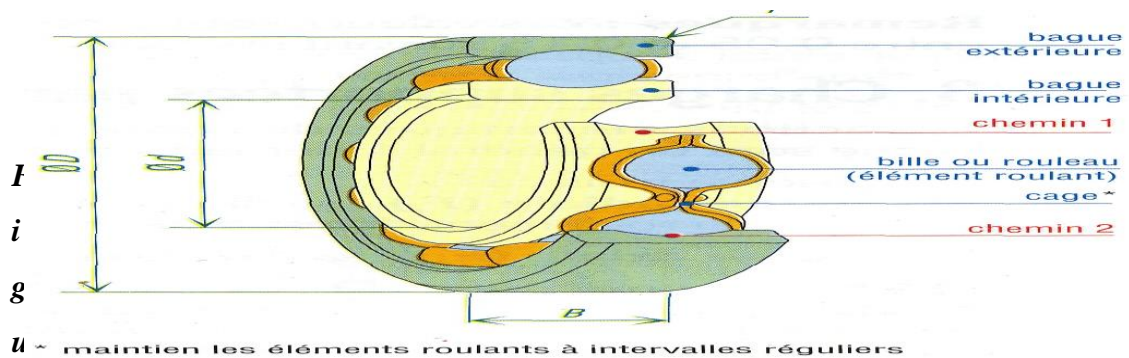


Figure I.29. Eléments constitutifs d'un roulement à billes [30].

Le roulement de notre machine à une bague extérieure fixe en contact avec le stator, et une bague intérieure tournante en contact avec le rotor. Par ailleurs, les billes sont en contact avec les deux pistes des deux bagues.

La durée de vie normale d'un roulement sous une charge est déterminée par la durée de l'usage et la fatigue des surfaces des éléments du roulement. La durée de vie a la notation  $L_{10}$  et se compte par un nombre d'heures. Est calculée comme suit [31] :

$$L_{10} = L_h = \frac{\left(\frac{C_R}{P_R}\right) \cdot 10^6}{60 \cdot f_r} [h] \quad (I.1)$$

Avec,  $C_R$  est une constante caractéristique de roulement, c'est la charge équivalente sur le roulement. [32]

a) Défaut sur la bague extérieure :

$$f_{ORBP} = \left(\frac{N}{2}\right) f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right) \cos \varphi\right] \quad (I.2)$$

b) Défaut sur la bague intérieure:

$$f_{IRBP} = \left(\frac{N}{2}\right) f_r \left[1 + \left(\frac{d}{D}\right) \cos \varphi\right] \quad (I.3)$$

c) Défaut sur la bille:

$$f_{BSF} = \left(\frac{D}{d}\right) f_r \left[1 - \left(\left(\frac{d}{D}\right) \cos \varphi\right)^2\right] \quad (I.4)$$

d) Défaut sur la cage :

$$f_{BSF} = \left(\frac{1}{2}\right) f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right) \cos \varphi\right] \quad (I.5)$$

Les défauts qui peuvent affecter le roulement sont nombreux, on peut décrire dans cette partie, certain de ces défauts:

### - *L'usure*

Le glissement des différents éléments, progresse avec l'introduction de particules contaminant au montage ou pendant le fonctionnement. Il est vrai que l'usure d'un roulement à billes peut être une source de contamination. [32]



**Figure I.30.** Bille saine et une autre défailante.

### - *Piquetage*

Ce phénomène important est créé par des arcs électriques qui traversent le roulement, ce courant se traduit par des points de fusions, des stries circonférentielles, des micro-trous ou des soudures. Le problème va donc s'aggraver en présence d'un refroidissement rapide, c'est-à-dire l'élément visé peut être exposé aux fissurations [33].



*Figure I.31. Fissure (cassure) et piquetage dans la bague extérieure.*

### - *Grippage*

Le frottement métal-métal produit des échauffements, ces derniers font des microsoudures. Le manque de lubrifiant, résulte le grippage. Selon le type, les dimensions et l'application du roulement, la lubrification initiale est une opération indispensable, en particulier quand il s'agit de roulements à faible bruit, haute précision ou de roulements de broche à hautes vitesses. La lubrification des roulements à l'aide de graisses ou d'huiles empêchent tout contact métallique direct entre les composants et la cage.

La lubrification empêche par ailleurs les infiltrations de corps étrangers dans les roulements et protège ces derniers contre la corrosion. [32]



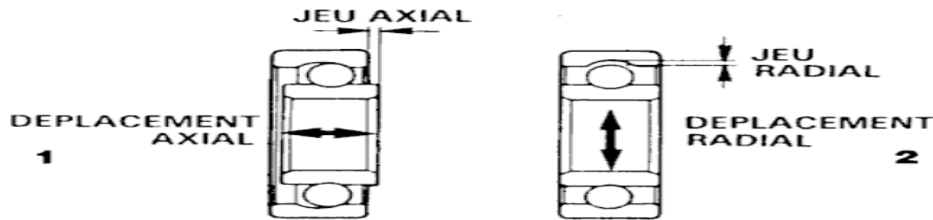
*I.32. Grippage d'un roulement [39]*



## Chapitre I : Partie théorique

### - *Jeu de roulement*

Comme indiqué sur la figure I.34 ci-dessous, on peut distinguer plusieurs positions des vides bagues intérieure ou extérieure, billes ou cage, le jeu est très dangereux puisqu'il aggrave l'état de roulement rapidement (ex. écaillage) et fait une dégradation des contacts mécaniques surtout dans un milieu pollué. [32]. Le jeu radial ou axial au niveau de roulement peut provoquer l'usure.



*Figure I.33. Jeu de roulement*

### - *Corrosion*

Des réactions chimiques à l'aide des paramètres atmosphériques d'humidité ou des acides dans le roulement. Les composants oxydés modifient la qualité de lubrifiant, ce qui conduit à l'apparition de rouille. [32]



*Figure I.34. Corrosion d'un roulement*

### - *Mauvaise lubrification*

Le choix du type de lubrification dépend plus de l'application prévue que du type de roulement. Dans de nombreuses applications, le lubrifiant a pour fonction principale, de réduire les frottements et l'usure, l'effet des particules et le bruit. Les particules indésirables peuvent endommager les surfaces et conduire à la dégradation rapide des éléments machines. La présence de grains de sable (pollution) dans le lubrifiant provoque des pertes de cotes notables aux premiers cycles de fonctionnement. [32]



Figure I.35. Lubrification d'un roulement

## 1.5 Techniques de l'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est largement appréciée et employée en raison de sa capacité à s'adapter à l'analyse des composants mécaniques et des machines industrielles en opération. Elle permet de repérer la plupart des défauts potentiels dans les machines en rotation. [34].

L'analyse vibratoire vise deux objectifs principaux [35] la première c'est la détection des défauts et la deuxième, l'analyse détaillée des défauts on utilise des paramètres soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel, soit dans les deux à la fois.

### 1.5.1 Méthodes d'analyse des vibrations

#### 1.5.1.1 Méthodes temporelles

L'analyse temporelle repose sur l'examen des "indicateurs de défauts" associés à un signal vibratoire enregistré. Elle consiste à étudier le comportement vibratoire de la machine à partir de ces indicateurs. Un indicateur temporel est une mesure qui caractérise la puissance, l'amplitude ou la répartition des amplitudes du signal vibratoire. L'évolution de ces indicateurs indique l'apparition et l'aggravation d'un défaut. Ces indicateurs évaluent l'état de fonctionnement global des équipements sans localiser précisément le défaut. De nombreux indicateurs sont décrits dans la littérature, certains étant des combinaisons de plusieurs d'entre eux.

Tableau I.1: Les indicateurs de méthode temporelles

	Formule	Description	Avantage	Inconvénient
<b>RMS</b>	$x_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x(i)^2)}{N}}$	La valeur efficace mesure l'énergie moyenne d'un signal et détecte les dissipations d'énergie anormales dues aux	Elle permet de mesurer l'énergie moyenne du signal et est utilisée pour détecter des dissipations	-valeur efficace n'évolue pas de manière significative au cours de la



		défauts. Elle est la racine carrée de la moyenne quadratique du signal vibratoire discrétisé.	d'énergie anormalement élevées accompagnant l'apparition d'un défaut	première phase de dégradation -détection précoce impossible
<b>Facteur crête</b>	$x_{FC} = \frac{X_{Peak}}{X_{RMS}}$	Contrairement à la valeur efficace, le facteur de crête est mieux adapté pour les signaux impulsions, comme ceux causés par les écaillages de roulements. Il est défini comme le rapport entre la valeur crête $X_{peak}$ et la valeur efficace (RMS).	-détecter un défaut dès son apparition -fournissant ainsi une information très précoce pour la maintenance prédictive	-il augmente dès qu'un début d'écaillage apparaît. Cette augmentation est due à la présence de chocs dans le signal vibratoire
<b>Kurtosis</b>	$x_{ku} = \frac{1/N \sum_{i=1}^N [x(i) - \bar{x}]^4}{\sigma^4}$	Le kurtosis est un indicateur qui permet de caractériser le degré d'aplatissement d'une distribution ce qui permet la détection précoce d'un défaut de roulement	Le kurtosis détecte précocement les défauts de roulement. Pour un roulement sans écaillage, la distribution est gaussienne avec un kurtosis proche de 3. En cas de défaut, cette valeur dépasse 3.	

### 1.5.1.2 Méthodes fréquentielles

L'analyse du signal porte sur un vaste ensemble de phénomènes et des réalités physique diverses : la variation de la pression de l'air en un lieu donné en fonction du temps est un signal sonore ; l'évolution de l'intensité du courant en un point d'un réseau est un signal électrique ; la vibration du sol est un signal sismique et fluctuations de l'indice de la bourse constituent un signal économique. Ces signaux dépendent d'une seule variable (ici le temps). Mais ce n'est pas toujours le cas. Une photographie en noir et blanc peut être interprétée comme une quantité numérique (le niveau de gris) fonction de deux considéré. L'analyse du signal consiste à extraire dans chacun de ces cas l'information pertinente. La nature de celle-ci différant selon la nature

## Chapitre I : Partie théorique

physique du signal Le signal dans le domaine temporel est un signal brut, et un signal transformé par une quelconque des Transformations mathématique disponibles est un signal traité. [36].

Les transformations sont appliquées aux signaux pour obtenir plus d'informations. Du signal, qu'il n'y en a apparemment de disponibles dans le signal brut. La transformation la plus populaire dans le domaine du traitement du signal en général est sans doute la transformation de Fourier [41].

### - Transformation de Fourier

Bien que l'analyse fréquentielle de Fourier implique deux représentations conjuguées et globales, l'une temporelle et l'autre fréquentielle, il existe de nombreux signaux pour lesquels l'information pertinente est véhiculée non seulement par les fréquences émises, mais également par la structure temporelle intrinsèque du signal [38,39] Les transformations de Fourier directe et inverse sont définies comme suit :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(jf)e^{+j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} df \text{ (I,6)}$$

$$X(jf) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt \text{ (I,7)}$$

On constate que les descriptions temporelle et spectrale sont parfaitement symétriques, mais que les unités de  $X(f)$  ne sont pas les mêmes que celles de  $x(t)$ .

Est une tension électrique, sa transformée  $X(f)$  s'exprime en  $[V / Hz]$  et elle est définie comme la densité spectrale d'amplitude du signal temporel  $x(t)$  [40].

En notation abrégée, on décrira ces deux transformations pas les opérateurs  $TF\{-\}$  &  $TFI\{-\}$ . La correspondance réciproque s'écrit alors:

$$x(t) = TFI\{X(f)\} \leftrightarrow TF\{x(t)\} = X(f) \text{ (I,8)}$$

Si la fonction  $x(t)$ . Ne possède pas de symétries particulières, sa densité spectrale d'amplitude  $X(f)$  est une fonction complexe :

$$x(t) \leftrightarrow X(f) = X_r(f) + jX_i(f) \text{ (I,9)}$$

Le module et la phase de la densité spectrale d'amplitude valent alors :

$$|X(f)| = X(f) = \sqrt{X_r^2(f) + X_i^2(f)} \text{ (I,10)}$$

$$\angle X(f) = \alpha(f) = \tan^{-1} \frac{X_i(f)}{X_r(f)} \quad (\text{I,11})$$

### - *Transformée de Fourier Discrète*

La version numérique de la transformée de Fourier continue est la transformée de Fourier discrète (TFD). Elle est utilisée pour calculer la transformée de Fourier d'une fonction à l'aide de calculs numériques [41.39]. Un signal  $x(t)$  peut être décomposé en série de Fourier.

$$x(t) = \sum_n x_n \cdot e^{(j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{T}) \cdot n \cdot t} \quad (\text{I,12})$$

Avec

$$x_n = \frac{1}{T} \int_T x(t) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot t \cdot \frac{1}{T}} \cdot dt \quad (\text{I,13})$$

La transformée de Fourier de  $x(t)$  est :

$$X(f) = \int x(t) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} \cdot dt \quad (\text{I,14})$$

Alors

$$X_n = \frac{1}{T} \cdot X[nf] \Rightarrow X_n = \frac{1}{T} \cdot X[n/T] \quad (\text{I,15})$$

Le passage de  $X(f)$  à  $X_n$  est obtenu par échantillonnage de  $X(f)$  à une cadence  $F=1/T$  [41].

### - *Transformée de Fourier Rapide*

Grâce à cette idée simple, purement mathématique, toute une industrie est passée de la lenteur à la rapidité [42].

La popularité de la transformée de Fourier réside dans le fait qu'elle peut être appliquée sans aucune hypothèse sur l'origine physique du signal. En particulier, depuis le développement de la transformée de Fourier rapide, un algorithme de calcul très économique, elle s'est révélée être extrêmement utile tant sur le plan théorique que numérique.

Les équations définissant la transformée de Fourier discrète fournissent une relation entre deux ensembles de nombres complexes, ce qui peut être exprimé sous forme matricielle en posant [41].

$$W = e^{\frac{-i \cdot 2 \cdot \pi}{N}} \quad (\text{I,16})$$

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N x(n) \cdot W^{nk} \quad (\text{I,17})$$

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W & W^2 & W^3 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W^2 & W^4 & W^6 & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & W^3 & W & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & W^{N-1} & W^{2(N-1)} & \cdot & \cdot & \cdot & W^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_{N-1} \end{bmatrix} \quad (I,18)$$

La matrice carrée(N) a une caractéristique particulière : les lignes et les colonnes ayant le même indice ont les mêmes éléments, et ces éléments sont des puissances du nombre de pas W, de sorte que  $W^n = 1$ . Dans ce cas, une simplification importante est supposée, conduisant à un algorithme de calcul rapide. [41,39].

### 1.6 Conclusion

D'après la description des techniques d'analyse vibratoire, il est clair qu'une complémentarité entre les différentes méthodes est essentielle. Chaque technique, qu'elle soit temporelle ou fréquentielle, possède ses propres avantages et limites. L'analyse temporelle permet une détection rapide des anomalies grâce à des calculs simples, mais elle est sensible au bruit et ne permet pas de localiser précisément l'origine des défauts. En revanche, l'analyse fréquentielle identifie les fréquences spécifiques associées aux défauts et réduit l'impact du bruit, mais elle est plus complexe à interpréter et moins efficace pour les signaux non stationnaires. Pour une surveillance et un diagnostic optimaux des systèmes, il est crucial de combiner ces deux approches. Ainsi, pour des décisions d'intervention de maintenance préventive fiables et efficaces, il est impératif de ne pas se baser sur une seule technique, mais d'utiliser une approche intégrée et synergique.

*Chapitre II :*

*Étude de cas*

## 2 Chapitre II : étude de cas

### 2.1 Introduction

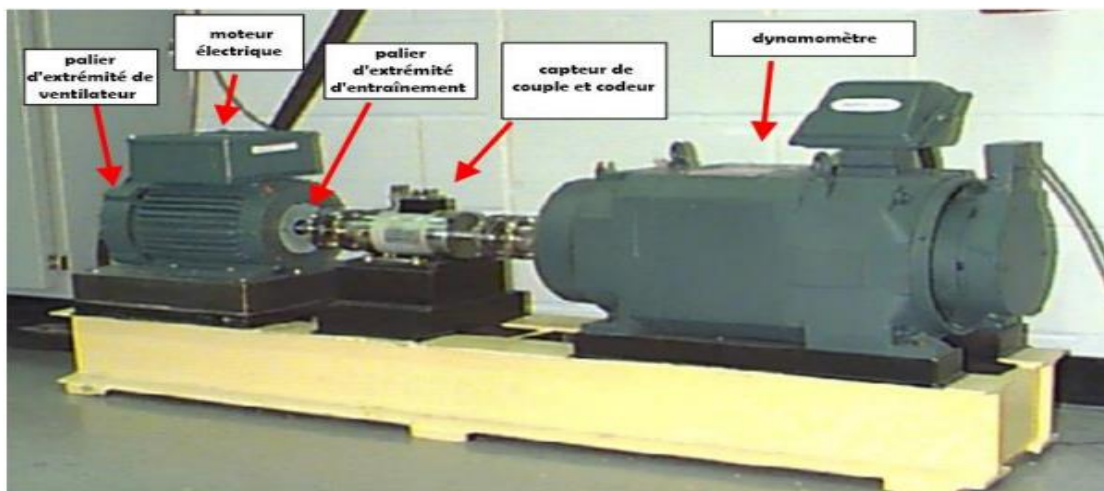
Les signaux de vibration que nous avons l'intention d'étudier ont été fournis par "le centre de données de roulement de l'université Case Western Reserve" ; une base de données d'essais de roulements à billes normaux ou défectueux collectés sur un banc d'essai relativement simple composé d'un moteur, d'un accouplement et d'un générateur. Sur les nombreux organes qui composent les roulements d'essai, de simples défauts en forme de taches "de différents diamètres et profondeurs" ont été pratiqués.

### 2.2 Présentation du banc d'essais

Il s'agit d'une base de données américaine qui donne accès à des signaux de roulements sains et endommagés dans diverses configurations (différentes tailles de défauts, couples, types de défauts, etc.). [43]

Le banc de test est principalement composé d'un moteur (à gauche), d'un couplage « transducteur/codeur » (au centre), d'un dynamomètre (à droite) et de circuits de commande (non représentés). Des accéléromètres aimantés à la cage du moteur ont été utilisés pour enregistrer les signaux.

Les capteurs ont été placés à la position 12 heures « verticale », des deux côtés accouplement



**Figure II.1:** Banc d'essai de roulement de « Bearing Data Center » [43]

### 2.2.1 Paramètres des mesures

Les couples résistant sont respectivement 0, 1, 2, 3 Hp ce qui donne des vitesses respectives de 1797, 1772, 1750, 1730 tr/min. La fréquence d'échantillonnage est  $f_e = 48$  KHz. et les tailles des défauts des roulements sont : 0.007 inch (0,1778 mm), 0.014 inch (0,3556 mm), et 0.021 inch (0,5334 mm).

Les roulements que nous avons considérés dans notre travail sont les roulements du côté accouplement de type SKF 6205-2RS JEM<sup>1</sup>. Les fréquences caractéristiques sont :

- Fréquence de la bague intérieure :  $f_{PFI} = 5,4146 \times Fr$ .
- Fréquence de la bague extérieure :  $f_{PFO} = 3,5854 \times Fr$ .
- Fréquence de la bille :  $f_B = 2,3584 \times Fr$ .
- Fréquence de la cage :  $f_C = 0,3984 \times Fr$ .

Ensuite, on calcul les fréquences de rotation par la relation suivante :  $r = \frac{N}{60}$ .  $N$  : La vitesse de rotation en tr/min. Donc on peut calculer les fréquences caractéristiques et les résultats obtenus présenté par le tableau suivant :

**Tableau. II.2** : Les fréquences des éléments du roulement

	<b>29,95 Hz - 0 Hp</b>	<b>29,53 Hz - 1 Hp</b>	<b>29,17 Hz - 2 HP</b>	<b>28,83 Hz - 3 Hp</b>
$f_{IRBP} = \left(\frac{9}{2}\right) f_r \left[1 + \left(\frac{7.825}{38.5}\right)\right]$	162,18 Hz	159,89 Hz	157,94 Hz	156,10 Hz
$f_{ORBP} = \left(\frac{9}{2}\right) f_r \left[1 - \left(\frac{7.825}{38.5}\right)\right]$	107,38 Hz	105,88 Hz	104,59 Hz	103,37 Hz
$f_{BSF} = \left(\frac{38.5}{2 \times 7.825}\right) f_r \left[1 - \left(\frac{7.825}{38.5}\right)^2\right]$	70,63 Hz	69,64 Hz	68,79 Hz	67,99 Hz
$f_{FTF} = \left(\frac{1}{2}\right) f_r \left[1 - \left(\frac{7.825}{38.5}\right)\right]$	11,93 Hz	11,76 Hz	11,62 Hz	11,49 Hz

### 2.3 Résultats et discussions

Pour analyser les résultats obtenus, nous avons prédominé les nominations suivantes :

- *Cas ou position (a) : cas de défaut détecté par l'accéléromètre placé au palier coté conduire(DE)*
- *RMSs : RMS pour l'état sain (sans défaut)*

---

<sup>1</sup>Diamètre intérieur (d=25 mm), diamètre extérieur (D=52 mm), Épaisseur B=15 mm), Diamètre de bille Db=7.825 mm, diamètre moyen Dm= 38.5 mm), Nombre de billes (n=9) et l'angle de contact (=0°).

- $RMS_b$  : RMS de défaut bille
- $RMS_{in}$  : RMS pour le défaut de bague intérieur
- $RMS_{ex}$  : RMS pour le défaut de bague extérieur
- $KUR_s$  : Kurtosis pour l'état sain
- $KUR_b$  : Kurtosis pour l'état défaut bille
- $KUR_{in}$  : Kurtosis pour l'état défaut de bague extérieur
- $KUR_{ex}$  : Kurtosis pour l'état défaut de bague intérieur

### 2.3.1 Analyse temporelle

Dans le cadre de cette étude, les calculs des valeurs scalaires RMS et Kurtosis pour chaque défaut et pour chaque dimension de défauts afin de réaliser une comparaison entre ces valeurs et constater l'efficacité de ces valeurs scalaires pour la détection de défaut à un niveau précoce.

#### 2.3.1.1 Comparaison entre RMS en fonction de type des défauts

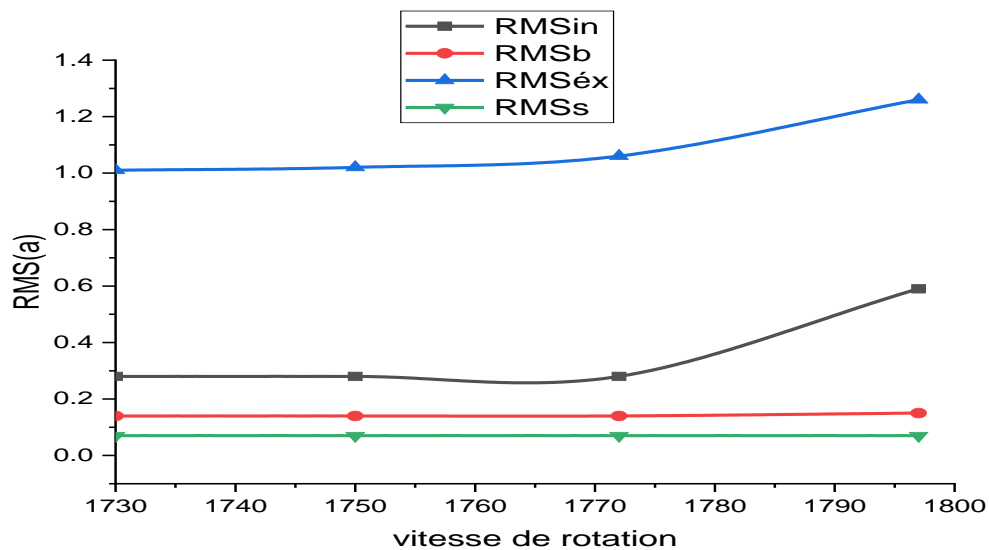
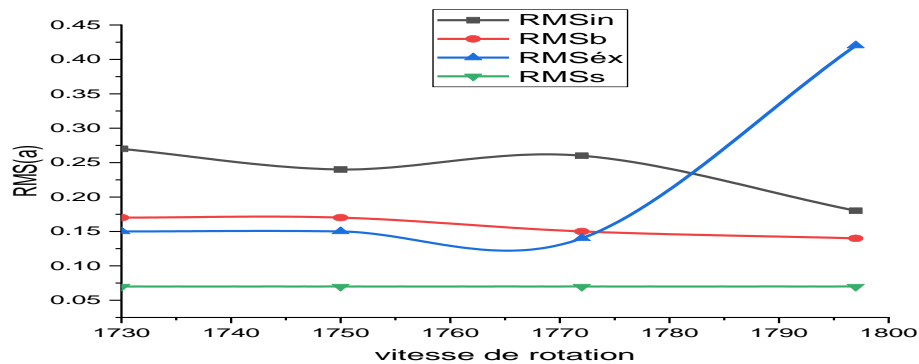
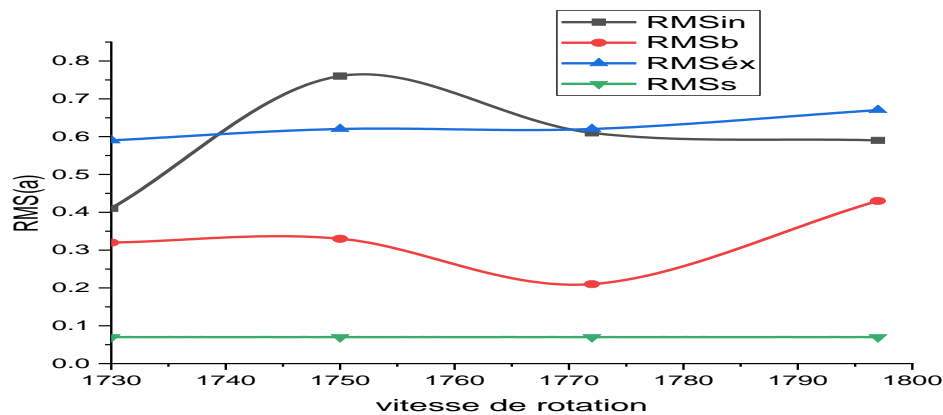


Figure II.2 : RMS (0.007) en fonction de vitesse de rotation pour capteur DE





**Figure II.3:** RMS (0.014) en fonction de vitesse de rotation pour capteur DE



**Figure II.4:** RMS (0.021) en fonction de vitesse de rotation pour capteur DE

### Constat de commentaire :

Notons que les valeurs de RMS de l'état sain d'un équipement sont variées entre 0.1 à 1 (valeurs de références sans défaut), et d'après les résultats présentés par Les **Figure II.2** à **Figure II.4** nous constatons que les variations enregistrées des valeurs RMS par les différents types et dimension des défauts, les différentes vitesses sont inférieures à la valeur de référence et cela indique que les valeurs RMS enregistré ne détecte pas les différents défauts qui ont été créé au niveau de roulements quel que soit leurs dimensions. Et de plus, on peut tirer les constatations suivantes :

## Chapitre II : étude de cas

- Les valeurs RMS s'augmente avec l'augmentation des valeurs de vitesse (à partir une valeur précise qui est dans notre cas 1770). Donc, RMS est un outil de diagnostic efficace pour les grandes vitesses.
- Nous constatons que RMS c'est un indicateur tardifs de défaut (n'est pas fidèles à exprimer le défaut au stade précoce) et par conséquent, il ne peut pas basée sur cette indicatrice seulement pour le diagnostic des défauts

### 2.3.1.2 Comparaison entre Kurtosis en fonction de type des defaults

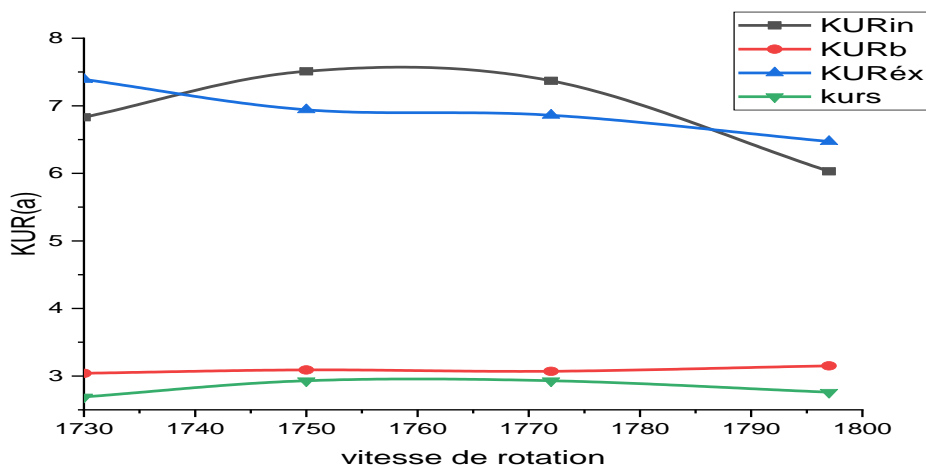


Figure II.5: kurtosis (0.007) en fonction de vitesse de rotation pour capteur DE

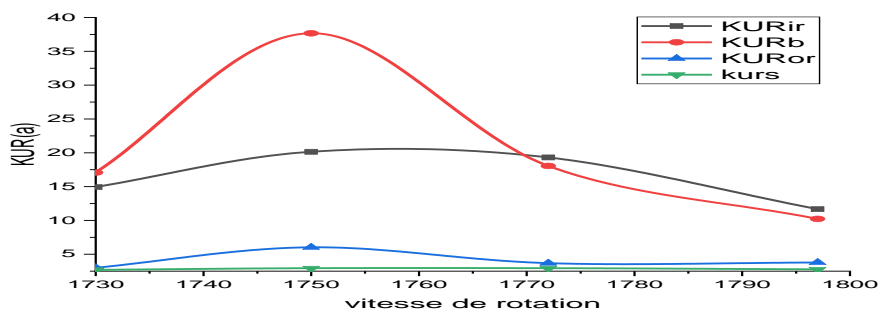
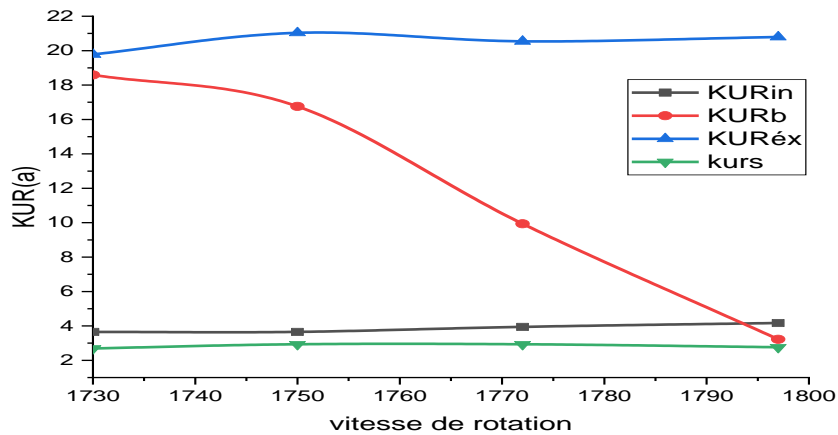


Figure II.6: kurtosis (0.014) en fonction de vitesse de rotation pour capteur DE



**Figure II.7:** kurtosis (0.021) en fonction de vitesse de rotation pour capteur DE

### Constats de KURTOSIS

Il a essentiel de souligner que parmi les avantages de Kurtosis qu'il est indépendant des variations des vitesses de rotation et des charges de la machine.

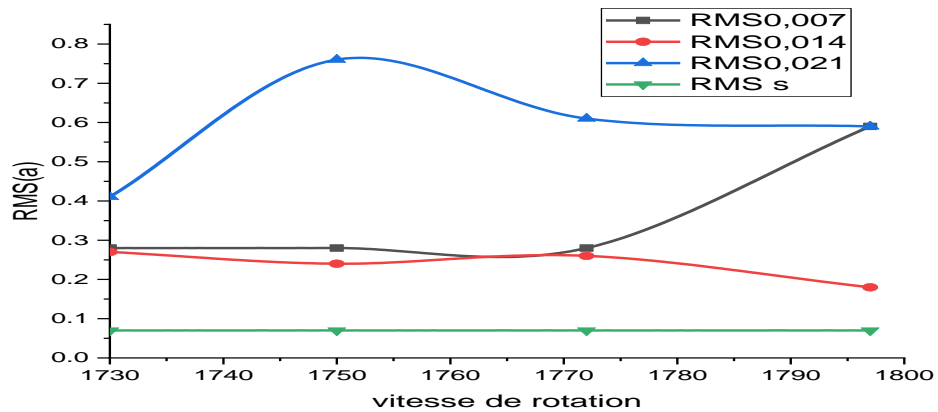
L'examen des résultats obtenus nous permet de constater que les valeurs de Kurtosis calculées pour les différents défauts indiquent l'existence des défauts et se varient selon la dimension des défauts entre les deux seuils moyen (3.2-4) et d'alerte (>4). Ainsi que, ces valeurs influencent par la dimension de défaut, Plus la dimension des défauts est grande, plus les valeurs de Kurtosis sont grandes.

*Kurtosis c'est un indicateur de qualité pour diagnostiquer les défauts au stade précoce, en effet pour les deux défauts de bague intérieure et extérieure nous a donné de bons résultats mais, il est essentiel de signaler que ces résultats influencent par la position des capteurs et la dimension des défauts.*

### 2.3.1.3 Comparaison entre RMS et Kurtosis en fonction de dimension des défauts

#### 2.3.1.3.1 Défaut de Bague Intérieure

- Calcul des valeurs RMS

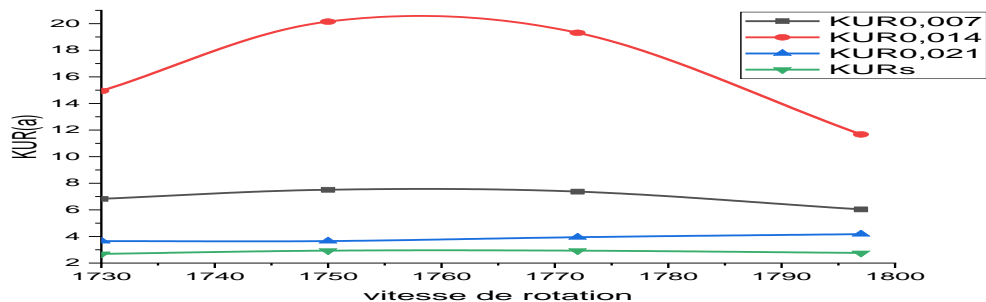


**Figure II.8:** RMS en fonction de dimensions des défauts (Bague intérieur)

Comme indique la **Figure II.8** on note que les valeurs  $RMS_{ex}$  constantes pour les deux défauts (0.007) et (0.014) a des grandeurs de vitesse entre 1730 et 1772, et nous avons enregistré une augmentation de  $RMS_{ex_{0.007}}$  et une diminution de  $RMS_{ex_{0.014}}$ . De plus,  $RMS_{ex_{0.021}}$  ces valeurs augmentent puis diminué et enfin se stabilise à une valeur constante (0.6).

Nous constatons que les valeurs **RMS** enregistré sont restent inférieur à la valeur de références et ne s'indique qu'on est en état stable sans défaut.

### - Calcul des valeurs Kurtosis

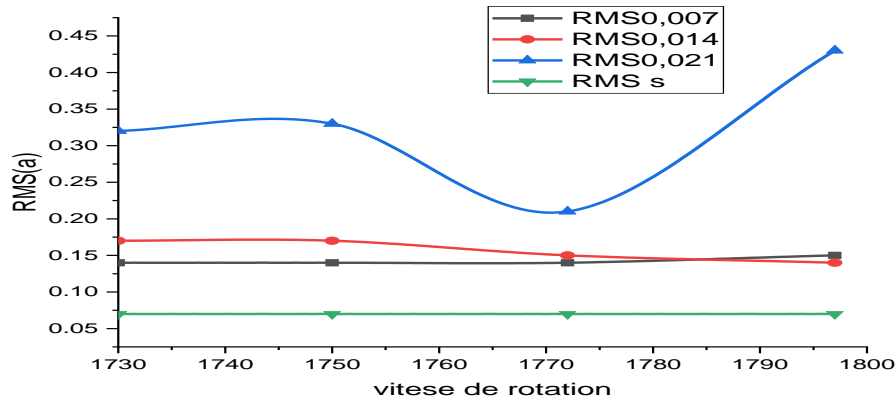


**Figure II.9:** Kurtosis en fonction de dimensions des défauts (Bague intérieur)

On note que la valeur de kurtosis pour les défauts de (0,007) et (0,021) a des valeurs constantes pour les différentes vitesses ; critique pour le cas de défaut (0.007) et de moyenne criticité pour le défaut (0.021).

2.3.1.3.2 Défaut de bille

- Calcul des valeurs RMS



Figure

II.10: RMS en fonction de dimensions des défauts (Bille)

L'examen de la **Figure II.10** montre que pour toutes les dimensions des défauts, les valeurs RMS calculée sont constantes et ils ont inférieurs à la valeur de référence et par conséquent, nous indiqué que nous avons en état sans défaut.

- Calcul des valeurs Kurtosis

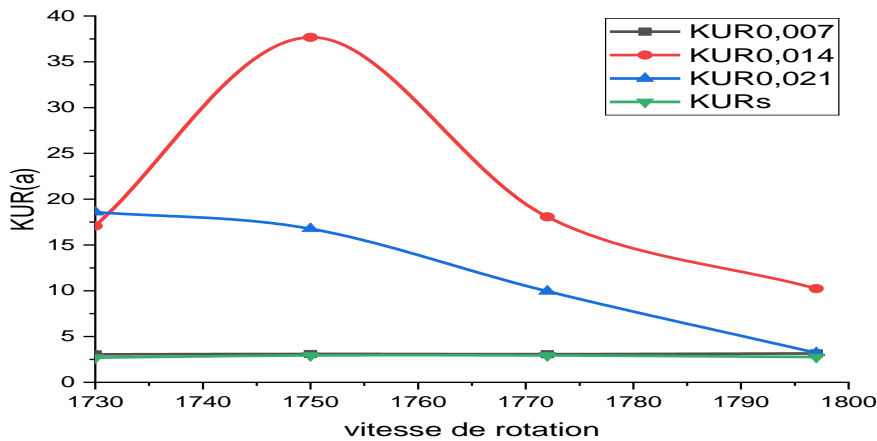


Figure II.11: Kurtosis en fonction de dimensions des défauts (bille)

La **Figure II.11** montrent que pour la dimension de défaut (0.007), les valeurs de kurtosis est presque identique à celle de l'état normale.

## Chapitre II : étude de cas

L'examen de la variation des valeurs kurtosis pour la dimension de défaut (0.014) montre une augmentation puis une diminution. Et les valeurs calculée de Kurtosis se varie entre les deux intervalles moyen et critique qui nécessité une intervention de maintenance préventive.

Nous constatons également, une diminution de 15 à 5 mais, il est dans l'intervalle d'alerte qui nécessite une intervention de maintenance préventive.

### 2.3.1.3.3 Défaut Bague Extérieur

#### - Calcul des valeurs RMS

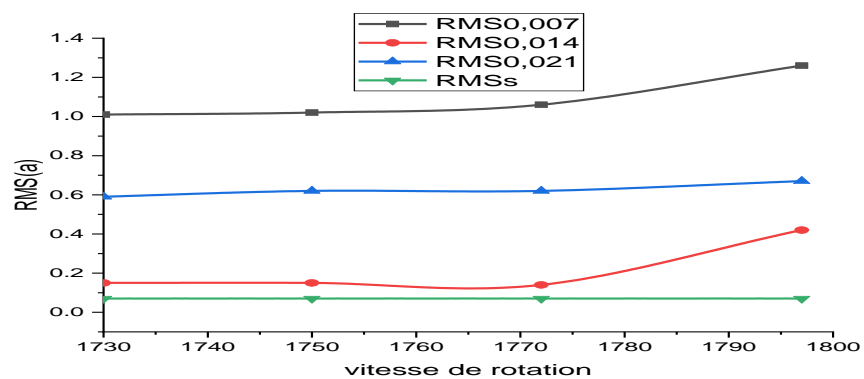
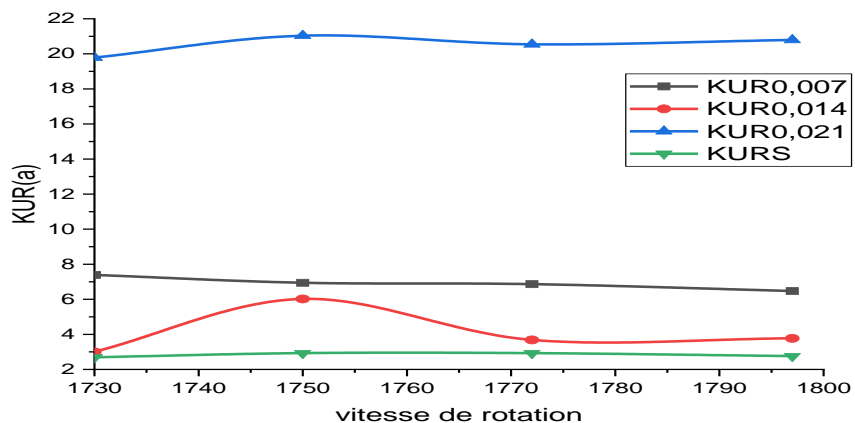


Figure II.12 : RMS en fonction de variation de vitesse pour le défaut de (bague extérieur)

Les résultats présentés par la **Figure II.12** montrent que pour le défaut de dimension (0.007) et (0.014) sont stable à des valeurs (0.18) et (0.6) respectivement qui sont inférieurs à la valeur de référence par contre, pour la dimension de défaut (0.021), la valeur RMS calculée est supérieurs à la valeur de références et ne s'indique que u défaut a été enregistré.

#### - Calcul des valeurs Kurtosis



**Figure II.13:** Kurtosis en fonction de dimensions des défauts (bague extérieure)

L'examen de la **Figure II.13** montre que le défaut de bague extérieure est constatable pour des valeurs variables mais critiques et par contre, pour les deux autres dimensions de défaut, ce défaut est constable mais avec de criticité moyenne (seuil d'alerte).

L'examen de la Fig. III-13 montre que le défaut de bague extérieure est constatable pour des valeurs de kurtosis variables.

### **Constat:**

*Les résultats obtenus de calcul de RMS et Kurtosis nous a confirmé les résultats obtenus dans la première partie de l'étude, le Kurtosis c'est un indicateur de qualité pour détecter les défauts au stade précoce par rapport RMS. En effet, Kurtosis est influencé par la dimension de défaut ; leurs valeurs s'augmente avec l'augmentation des dimensions de défaut et ne s'influence pas par la variation de vitesse. Par contre, RMS ne détecte pas les défauts au stade précoce malgré la variation des dimensions des défauts (une petite sensibilité des dimensions de défauts mais reste inférieurs à la valeur de référence dans la majorité des cas) et avec les vitesses de notre étude de cas.*

### **2.3.2 Analyse fréquentielle**

L'analyse spectrale permet de détecter les défauts de roulement en comparant le spectre de roulement à l'état sain avec celui de l'état défailant. Si les amplitudes des raies des fréquences déjà existantes changent ou si de nouvelles fréquences apparaissent, on peut conclure qu'il y a une anomalie ou un défaut de roulement.

#### **2.3.2.1 Analyse spectrale**

##### **2.3.2.1.1 Signatures spectrales de roulement à l'état sain (état de référence)**

Ce spectre sera considéré comme la référence de tous les prochains tests.

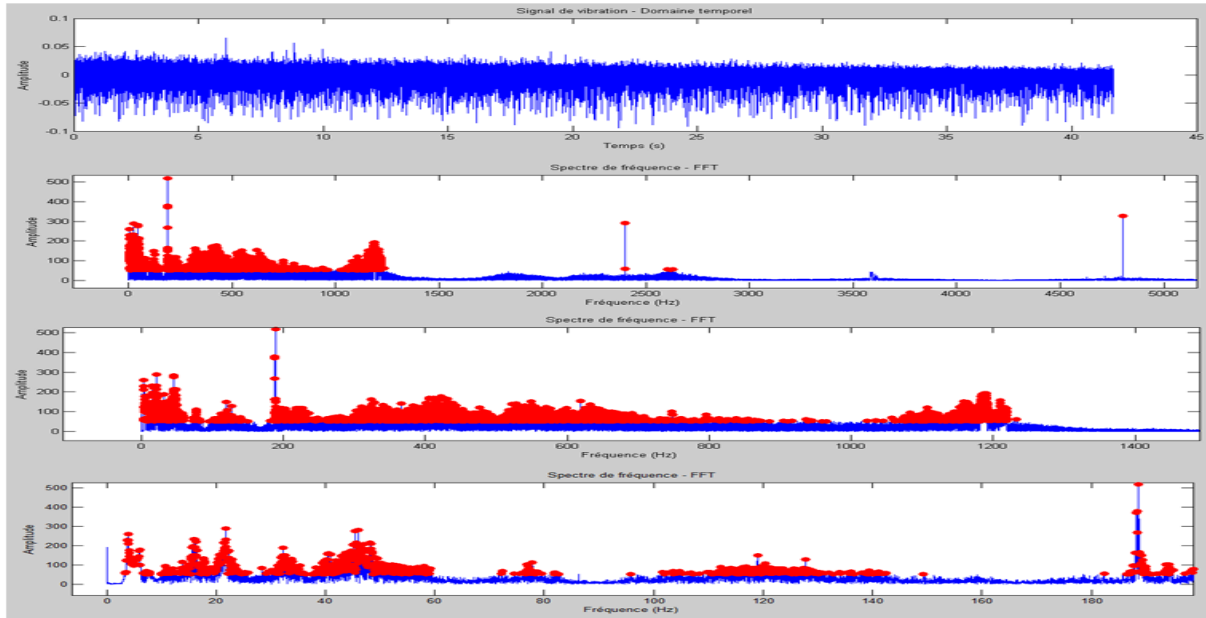


Figure II.14 : Signatures spectrales de roulement à l'état sain (état de référence)

### 2.3.2.1.2 Signatures spectrales à l'état défaillant

#### - Signatures spectrales de défaut de la bague externe

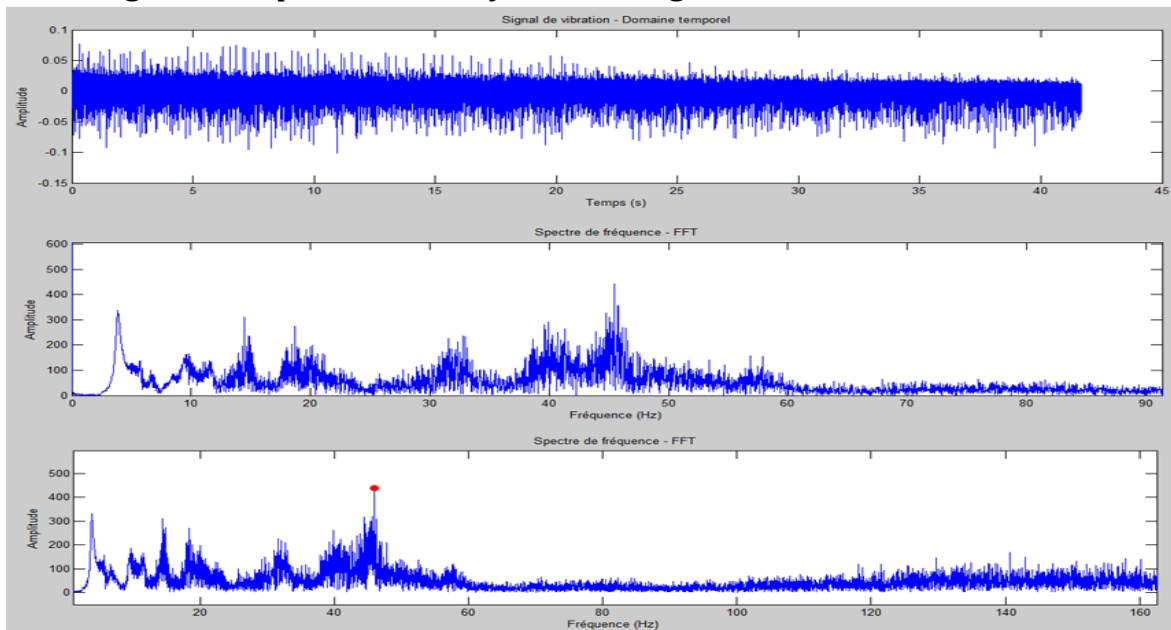
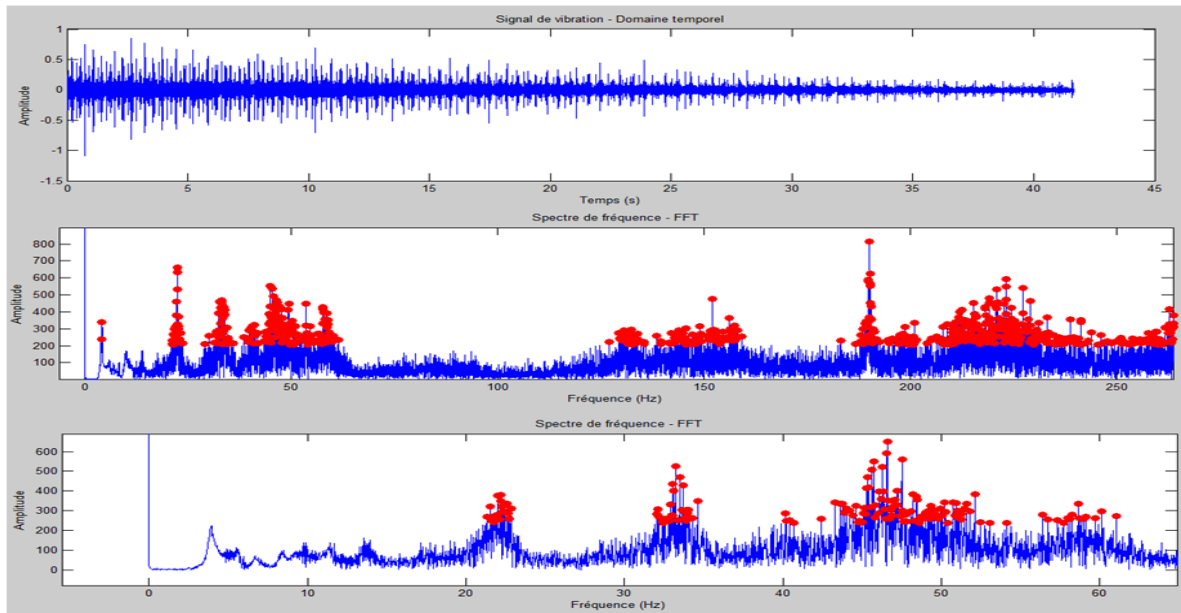


Figure II.15: Signatures spectrales de défaut de la bague externe (0.014)

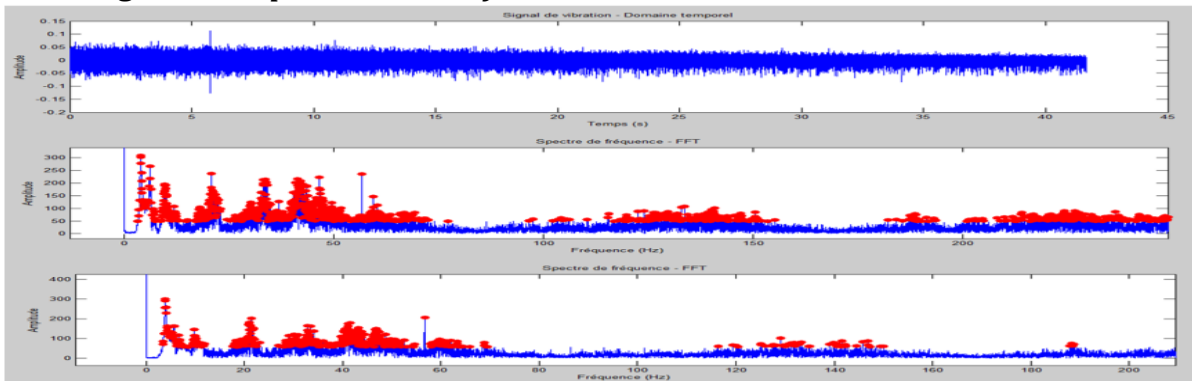


- *Signatures spectrales de défaut de la bague interne*



*Figure II.16 : Signatures spectrales de défaut de la bague interne (0.014)*

- *Signatures spectrales de défaut de la bille*



*Figure II.17 : Signatures spectrales de défaut de la bille (0.014)*

**Constats:**

Les résultats obtenus grâce à l'analyse fréquentielle avec le traitement de transformation de fourrier montrent que ces résultats présentent le même comportement que les *Figure II.14 a* *Figure II.17*

- Le spectre de défaut de roulement affectant les bagues extérieures, intérieures et de bille pour un diamètre de défaut de 0,014 est présenté dans ces résultats. En comparant ce spectre avec celui de la référence (état sain), on observe une variation de l'amplitude de la raie de fréquence, ce qui indique l'existence d'un défaut.

## Chapitre II : étude de cas

- L'amplitude de la raie de fréquence caractéristique des défauts est altérée lors de l'évolution. Il y a des moments où il augmente et des moments où il diminue, et ces résultats sont très logiques car, en pratique (expérimentalement), les fréquences des défauts varient par rapport aux valeurs théoriques, et cette variation est justifiée par les caractéristiques communes des défauts (un défaut peut entraîner une autre et, par conséquent, il est impossible d'obtenir la même amplitude ou fréquence théorique).
- Dans la plupart des cas traités, l'amplitude des défauts varie aléatoirement en fonction d'une fonction non linéaire, et cela est en relation avec l'augmentation du diamètre de défaut.

Après l'analyse fréquentielle FFT, on remarque que dans le cas d'une augmentation du diamètre du défaut, le spectre devient plus bruité que celui avec un diamètre de défaut plus petit, ce qui masque les pics et les composantes du spectre, ce qui conduit à une interprétation difficile.

### 2.3.2.2 *Analyse d'enveloppe*

Bien que présentant de nombreux avantages, l'analyse de Fourier présente un inconvénient majeur : elle suppose les signaux stationnaires, ce qui empêche d'associer à une signature fréquentielle l'intervalle temporel où elle se produit. L'approche la plus simple pour concilier les concepts de temps et de fréquence consiste à analyser l'évolution temporelle d'un harmonique sur une fréquence spécifique. La méthode est appelée analyse d'enveloppe, où l'enveloppe correspond à l'amplitude temporelle de l'harmonique. L'utilisation de l'analyse d'enveloppe est relativement simple. Elle est largement employée dans la surveillance et le diagnostic des machines en mouvement (dont les signaux sont généralement non stationnaires) et dans le contrôle non destructif (émission sonore).

2.3.2.2.1 Signatures d'enveloppe de roulement à l'état sain (état de référence)

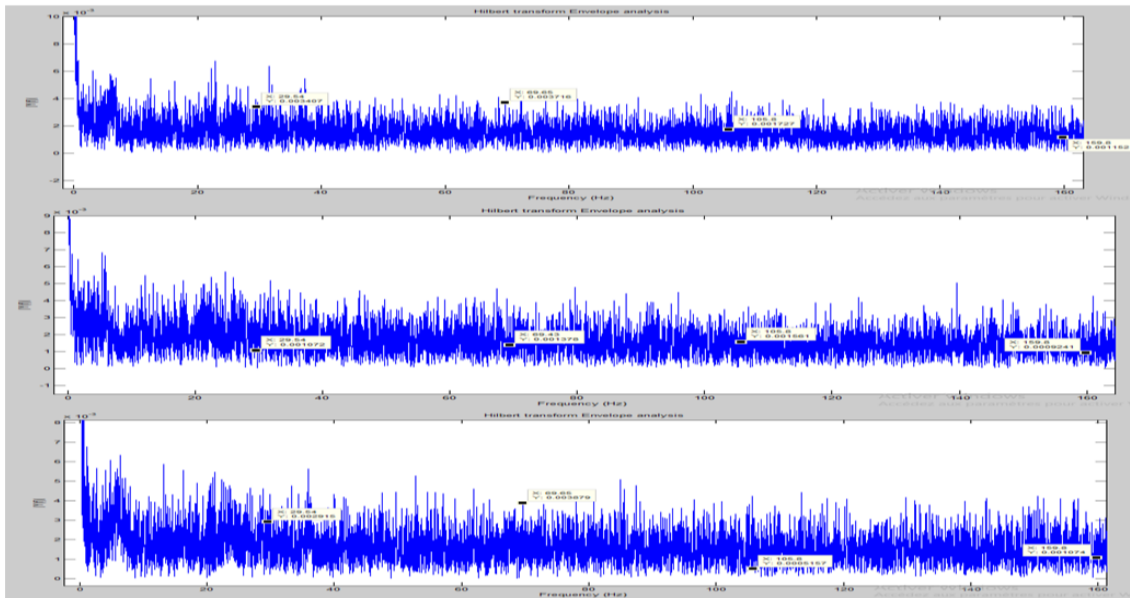


Figure II.18 : Signatures d'enveloppe de roulement à l'état sain

2.3.2.2.2 Signatures d'enveloppe de roulement à l'état défaillant

- Signatures d'enveloppe de roulement pour le défaut de la bague externe

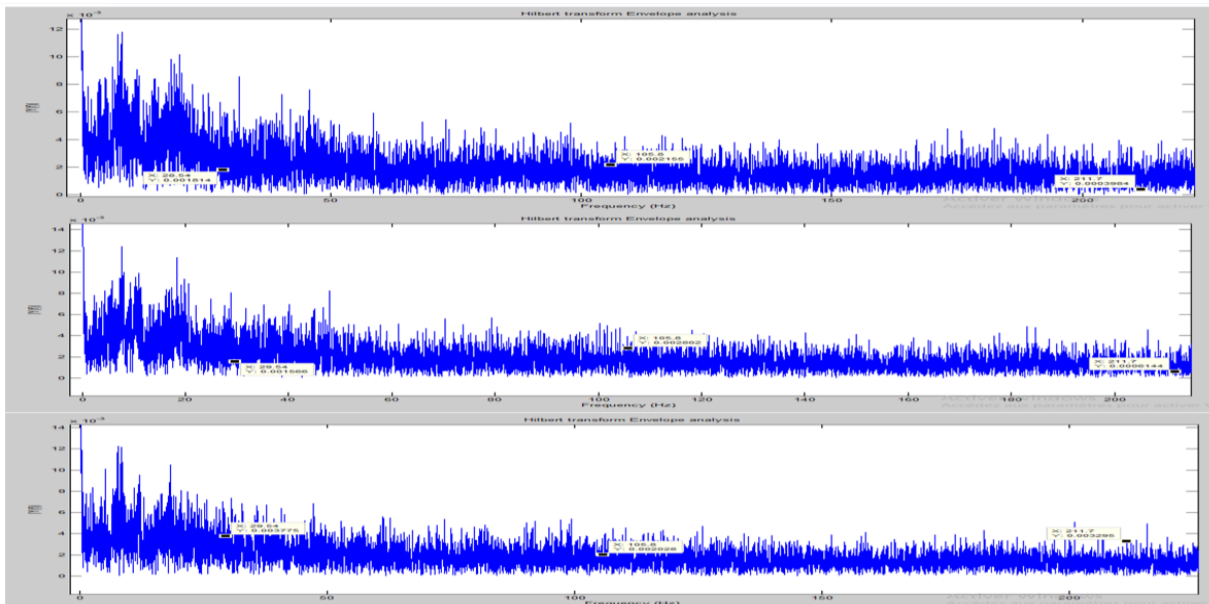
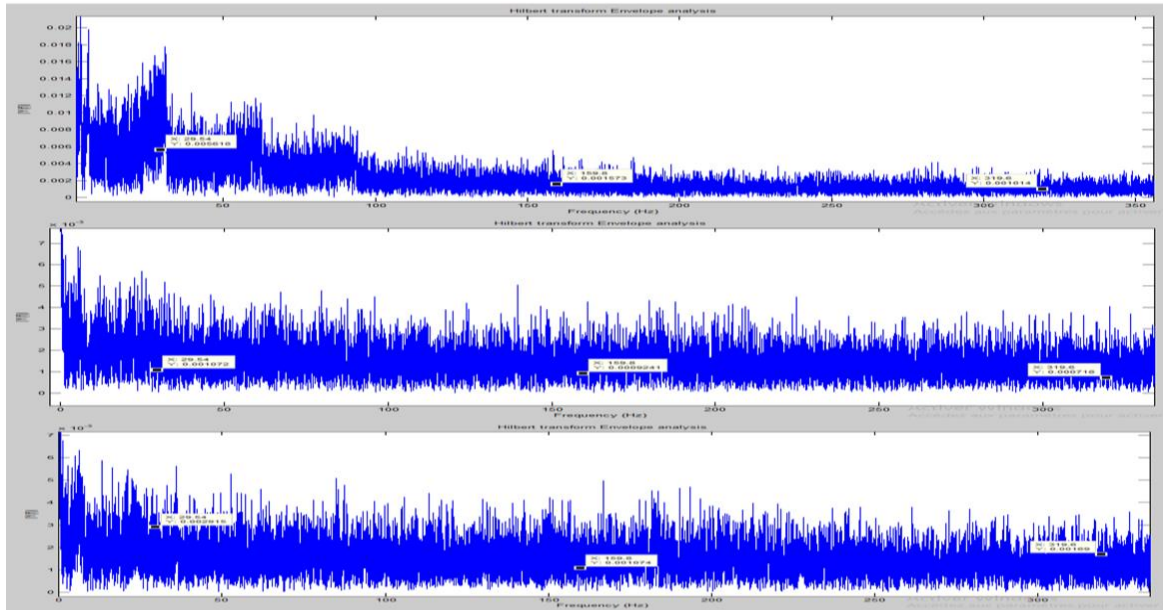


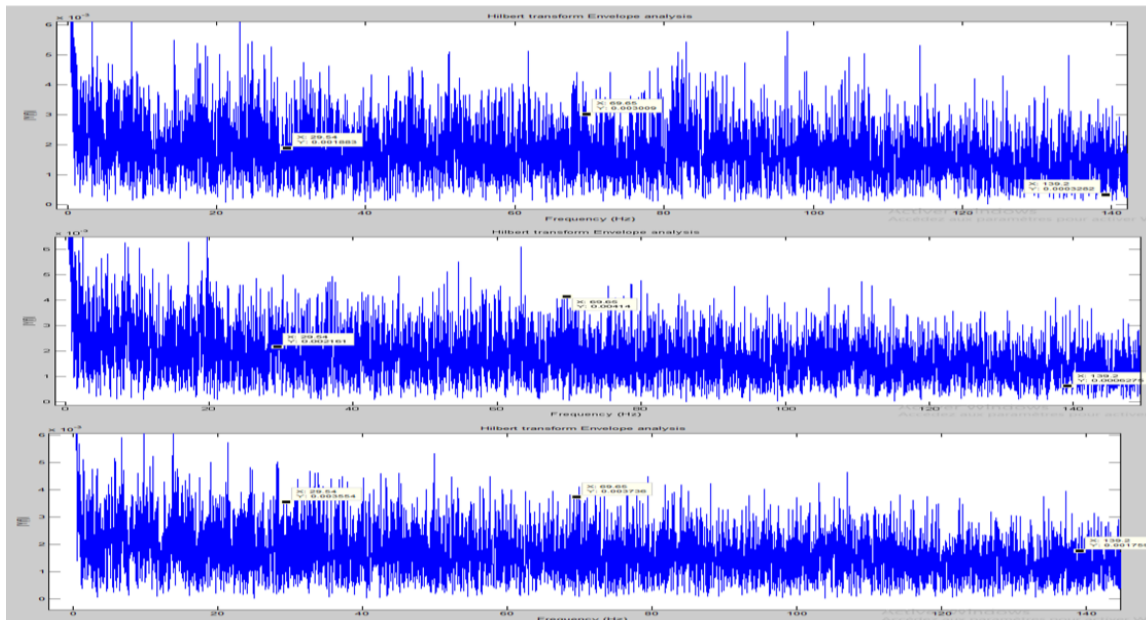
Figure II.19 : Signatures d'enveloppe de pour le défaut de la bague externe

- *Signatures d'enveloppe de roulement pour le défaut de la bague interne*



*Figure II.20 : Signatures d'enveloppe de roulement pour le défaut de la bague interne*

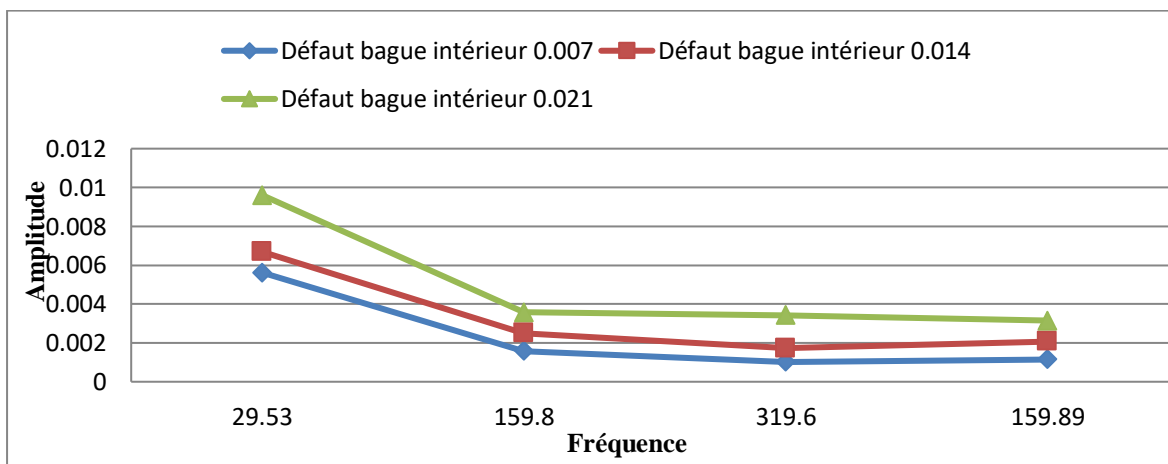
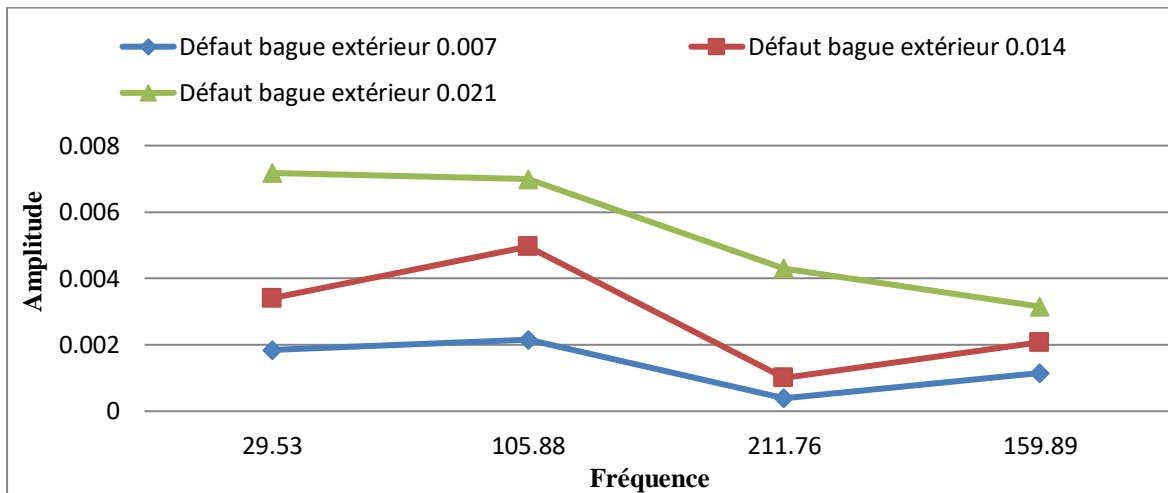
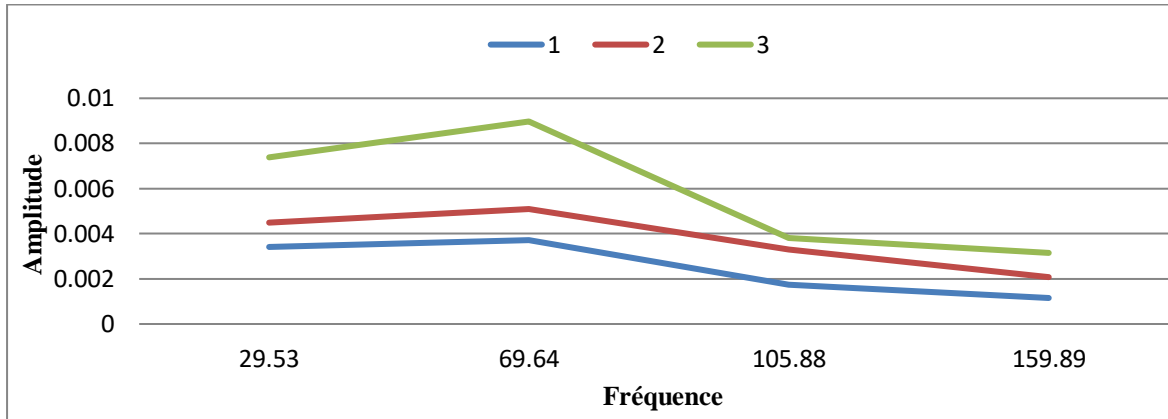
- *Signatures d'enveloppe de roulement pour le défaut de la bille*

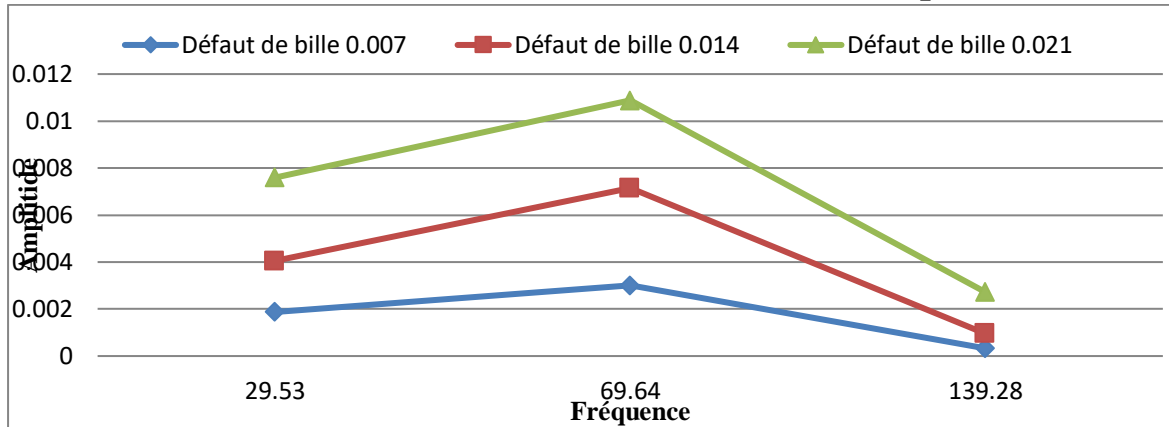


*Figure II.21 : Signatures d'enveloppe de roulement pour le défaut de billes*

## Chapitre II : étude de cas

Et pour plus de détails et lisibilité, les valeurs de variation des amplitudes pour chaque signature de défaut ont été résumé par la figure suivante pour les défauts s: état sain, défaut de bague extérieur, défaut de bague intérieure et pour le défaut respectivement.





**Figure II.22** : évolution de l'amplitude selon la fréquence des défauts

Constat:

La plupart du temps, les défauts de roulements entraînent des chocs périodiques sur une période très courte, contrairement aux défauts sinusoïdalisés (balourd, désalignement, etc.) dont la période est beaucoup plus longue. Les résonances du système sont stimulées par ces chocs à des fréquences élevées, ce qui se manifeste sur le spectre par la formation de bosses ou de bandes latérales autour de ces fréquences.

En analysant les courbes d'évolution de l'amplitude des défauts traités, nous avons observé que pour les défauts de bague intérieure et de bille, l'amplitude augmente avec la taille du défaut, puis diminue malgré une augmentation de sa taille. En revanche, pour le défaut de bague extérieure, l'amplitude diminue avec la taille du défaut avant de se stabiliser. L'analyse des résultats indique une tendance générale à la diminution de l'amplitude en fonction de la taille des défauts, quelle que soit leur nature. Les différences importantes entre les valeurs des fréquences des défauts calculées théoriquement et celles issues des résultats expérimentaux (après traitement des signaux expérimentaux) s'expliquent par la non-stationnarité et la non-périodicité des signaux, ainsi que par les effets de masque entre ces défauts. Par exemple, la création d'un défaut de bague intérieure entraîne automatiquement un défaut de bille, ce qui contribue à ces différences entre valeurs théoriques et expérimentales. En conclusion, bien que ces techniques permettent de détecter l'existence de défauts, elles ne permettent pas une identification précise de ces derniers.

### 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude de cas pour le traitement des signaux vibratoires en utilisant trois techniques différentes. Nous avons choisi de tester la technique de traitement de signal temporel, qui est efficace pour détecter les défauts mais à un stade plus avancé (retard de détection).

En revanche, pour le traitement spectral, la détection est très difficile en raison de la variation aléatoire des amplitudes des défauts. En revanche, dans le cadre de l'analyse d'enveloppe, nous avons réussi à représenter ces variations d'amplitude en fonction de la taille des défauts. Ces méthodes sont employées afin de détecter les défauts, mais il est toujours très difficile d'identifier le type des défauts.

*Conclusion générale*



# *Conclusion générale*

Pour atteindre nos objectifs, le premier chapitre se concentre sur les concepts fondamentaux liés au processus de surveillance industrielle, les problèmes mécaniques des machines tournantes et les méthodes de traitement des signaux vibratoires à la fin du chapitre.

Dans cette étude de diagnostic des défauts des machines tournantes, nous utilisons le banc d'essais de l'université de Western Reserve (dans différentes configurations : roulements sains, défaut de bague intérieure, défaut de bague extérieure, défaut de bille, et impact du diamètre du défaut et des types de défaut). Nous collectons les signaux de vibration d'un roulement afin de déterminer l'état de panne des machines tournantes. Nous utilisons deux méthodes les plus couramment utilisées : l'analyse temporelle avec des valeurs scalaires et l'analyse fréquentielle. Nous avons examiné plusieurs défauts et interprété la variation de ces paramètres pour chaque cas.

L'application des techniques de traitement des signaux vibratoires à travers des techniques temporelle et fréquentielle présente par le chapitre II sur un exemple l'illustration, comparant leur efficacité. Le traitement temporel se distingue par une détection efficace des défauts, bien que légèrement retardée, tandis que l'approche spectrale, comme la transformée de Fourier, rencontre des difficultés en raison des variations aléatoires des amplitudes des défauts. En revanche, l'analyse par enveloppe a permis de modéliser les variations d'amplitude en fonction de la taille des défauts. Ces techniques sont utilisées pour détecter les défauts, mais l'identification précise du type de défaut reste très difficile.

Le chapitre II présente une illustration de l'application des techniques de traitement des signaux vibratoires en utilisant des techniques temporelles et fréquentielles, en comparant leur efficacité. La détection des défauts est efficace dans le traitement temporel, même si elle est légèrement retardée, tandis que l'approche spectrale, comme la transformée de Fourier, est difficile en raison des variations aléatoires des amplitudes des défauts. D'autre part, l'analyse par enveloppe a donné l'opportunité de représenter les fluctuations d'amplitude en fonction de la taille des défauts. Ces méthodes sont employées afin de repérer les imperfections, cependant il demeure extrêmement complexe d'identifier précisément le type de défaut.

## **Conclusion générale**

Comme perspectives, nous optons d'exploiter ces résultats dans le cadre d'améliorer davantage les politiques de maintenance et, nous proposons l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI).

## *Références bibliographiques*

## Références bibliographiques

# *Références bibliographiques*

- [1] Cordier, M.O., Dague, P., Dumas, M., Levy, F., Montmain, J., Staroswiecki, M., Trave-Massuyes, L. AI and automatic control approaches of model-based diagnosis: Links and underlying hypotheses. In: Proceedings of the 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes. Budapest, 274-279.
- [2] Roth, M., Lesage, J-J., Litz, and L: The concept of residuals for fault localization in discrete event systems. *Control Engineering Practice* 19, 978-988.
- [3] Basseville, M. et Cordier, M., Surveillance et diagnostic de systèmes dynamiques : approches complémentaires du traitement de signal et de l'intelligence artificielle. INRIA. Rapport de recherche n° 2861. Avril 1996.
- [4] Lefebvre, A., Simeu-Abazi, Z., Derain, J.P., Glade, M. Diagnostic of the avionic equipment based on dynamic fault tree. IFAC-CEA, Monterrey, Mexico.
- [5] Pecht, M., Dube, M., Natishan, M., Williams, R., Banner, J., Knowles, I. Evaluation of built-in test. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vol 37, no.1, 266-271.
- [6] Implementation Strategies and Tools for Condition Based Maintenance at Nuclear Power Plants. ISBN 92-0-103907-7.
- [7] Jardine, A.K.S., Lin, D., Banjevic, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483-1510
- [8] Mathur, A., Cavanaugh, K.F., Pattipati, K.R., Willett, P.K., Galie, T.R. Reasoning and Modeling Systems in Diagnosis and Prognosis. Proceedings of the SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 4389, 189-194.
- [9] Combacau, M., P. Berrut, F. Charbonnaud et A. Khatab. « Reflexions sur la terminologie : Surveillance – supervision », Groupement pour la recherche en Productique, Systèmes de Production Sûrs de Fonctionnement, 2000.
- [10] Mokhtari, A. 2007, Diagnostic des systèmes hybrides : développement d'une méthode associant la détection par classification et la simulation dynamique, thèse de doctorat,

## Références bibliographiques

Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

- [11] Aldrich, C., and Auret, L. (2013). Unsupervised process monitoring and fault diagnosis with machine learning methods. Springer
- [12] Polanyi, M. (1958). Personal knowledge: Towards a post-critical philosophy. Chicago: University of Chicago Press. ISBN 0-226-67288-3.
- [13] Venkat Venkatasubramanian, Raghunathan Rengaswamy, Surya N. Kavuri, Kewen Yin (2003). A review of process fault detection and diagnosis Part (1, 2, 3). Computers and Chemical Engineering 27 (2003).
- [14] Varanon Uraikul, Christine W. Chan, Paitoon Tontiwachwuthikul (2007). Artificial intelligence for monitoring and supervisory control of process systems. Engineering Applications of Artificial Intelligence 20 (2007) 115-131.
- [15] Chow, E. Y. and A. S. Willsky (1984). Analytical redundancy and the design of robust election systems. IEEE Trans. Automatic Control 29(7), 603-614.
- [16] Gertler, J. and D. Singer (1990). A new structural framework for parity equation-based failure detection and isolation. Automatica 26(2), 381-388.
- [17] Rosario Toscano (2004). Commande et diagnostic des systèmes dynamique. Ellipses édition 2004.
- [18] CHAKOUR Chouaib, “ Diagnostic et surveillance des procédés industriels et de leur environnement sur la base de l’analyse de données”, thèse de doctorat en Génie Electrique, Université Badji Mokhtar - Annaba
- [19] Dunia, R., and Joe Qin, S. (1998). Subspace approach to multidimensional fault identification and reconstruction. AIChE Journal, 44(8), 1813-1
- [20] Pr.M. Ouali cours machines tournantes dispense à l’université de Blida année 2019/2020
- [21] Reland BIGRET et Jaque-louis FERON « Diagnostic-maintenance disponibilité des machines tournantes »1995.
- [22] Chérif Khélifi, et Mohammed Ouali Modélisation dynamique d'un aérogénérateur par un modèle à trois masses, Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza
- [23] BOUDIAF Adel, « Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Tournantes par Analyse Multi résolution », Thèse de Doctorat, (2016).
- [24] Landolsi Foued, Support De Cours, « Techniques De Surveillance », Institut Supérieur des études technologiques de NABEUL.

## Références bibliographiques

- [25] Hachemi Mohammed, « Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration des machines tournantes », Mémoire master, (2012).
- [26] Schoen, R.R., Habetler, T.G., Kamran, F., Bartfield, R.G., —Motor bearing damage detection Using stator current monitoring| IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, pp. 1274-1279, IEEE 1995
- [27] Mr. FENINECHE HOCINE, « Application des réseaux de neurones artificiels au diagnostic des défauts des machines tournantes », Mémoire Présenté Pour l'obtention du diplôme de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF
- [28] Ocak, H., Loparo, K. A., —A new bearing fault detection and diagnosis scheme based on hidden Markov modelling of vibration signals|. International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing ICASSP '01, Salt Lake City-UT, USA, pp. 3141-3144, IEEE 2001
- [29] Ojaghi, M., Sabouri, M. —Dynamic modeling and simulation of induction motors with different bearing faults|. In Electrical Machines and Systems (ICEMS). The 18th International Conference, pp. 726-731, IEEE 2015.
- [30] [http://www.zpag.net/Tecnologies\\_Industrielles/Roulements\\_Etude.htm](http://www.zpag.net/Tecnologies_Industrielles/Roulements_Etude.htm)  
Philippe Arquès, —Diagnostic prédictif et défaillance des machines (théorie traitement-analyse reconnaissance-prédiction|. Technipe Paris, livre édition 2009.
- [31] BESSOUS Nouredine, « Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation », Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences, Université Mohamed Khider – Biskra, 2017
- [32] Bessous N., Z. S. Eddine, A. Chemsas —A New Analytical Model Dedicated to Diagnose the Rolling Bearing Damage in Induction Motors -Simulation and Experimental Investigation-|. International Conference on Control Engineering and Information Technology, CEIT, Hammamet, Tunisia, 2016.
- [33] <https://www.nskeurope.fr/fr/bearings/services/troubleshooting/damage-by-type/seizure.htm>
- [34] Hamdad N., 2013. Transformée de Huang-Hilbert : Application à la détection des défauts (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou.
- [35] Messaoudi F. & Sadok H., 2016. Conception d'une interface graphique pour une analyse du signal électromyogramme (EMG) par la transformée en ondelette et la décomposition

## Références bibliographiques

modale empirique (Doctoral dissertation).

- [36] Yves Meyer, Stéphane Jaffard et Olivier Rioul, ‘‘ L’analyse par Ondelettes ‘‘ Pour la science. Septembre 1987
- [37] ROBI POLIKAR, ‘‘ Concepts Fondamentaux – vue d’ensemble de la théorie Des Ondelettes
- [38] NADEGE THIRION-MOREAU ‘‘ Analyses temps-fréquence linéaire et Quadratique’’ Techniques de l’ingénieur, traité télécoms, TE 5 240
- [39] ALAIN YGER, ‘‘ traitement du signal et Ondelettes Master ingénieur Mathématique’’ 18 octobre 2006
- [40] FREDDY MUDRY, ‘‘ Traitement des signaux quelques applications  
<http://www.yopdf.com/freddy-mudry-pdf.html#a3>
- [41] BENYOUCEF M, ‘‘ Reconnaissance Automatique de Parole pour la Commande Des Systèmes ‘‘ thèse Magister université de Batna 1995
- [42] Demaeyer Jonathan, Bebronne Michael et Forthomme Sébastien, ‘‘ les Ondelettes ‘‘ Université Libre de Bruxelles