

17/531. 612

**Université du 8 mai 1945 Guelma**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de Génie Mécanique**



**Mémoire de fin D'études**  
**Pour l'obtention du diplôme de Master**

Option : Maintenance Industrielle

Présenté par : TRAIFI SALIM

=====

***Détection des défauts de roulement dans  
les moteurs asynchrones par l'analyse  
vibratoire***

=====

Sous la Direction de :

Pr. Ouelaa Nouredine

Année universitaire 2011/2012





# Remerciement

Tous d'abord je remercie ALLAH TAALA le tous puissant au nom d'ALLAH le clément et le miséricordieux qui nous a mené le courage, la force et la patience au cours de toute notre vie et au cours de l'élaboration de ce mémoire et qui nous a toujours dirigé vers le bon chemin en éclairant les nuits les plus obscures.

En tout premier lieu je tiens à remercier les **membres de jury** d'avoir accepté de juger mon travail.

**Pr Ouelaa Nouredine** d'avoir accepté de m'encadrer et diriger mes travaux, pour la confiance qu'il m'a accordée.

Je ne manquerai pas d'exprimer mes vifs remerciements à tout le personnel de l'entreprise fertial annaba « M<sup>r</sup>:kerour fateh » et la raffinerie de Skikda « salim abaidia, boulaknafed madjid, bouaita mouhamed » pour leur accueil, aide, conseils pour les facilités qui m'ont été accordées au stage afin de réaliser ce travail.

Je ne manquerai pas d'exprimer mes vifs remerciements à Dr djbala abderezak , mimade et aziz. et madame souraya , mon amis said aarab et minou

Je ne pourrais jamais oublier la faveur de mes maîtres et mes enseignants qui ont sacrifié leurs temps et efforts afin de nous mettre sur la bonne voie et surtout mon encadreur.

Je tiens à manifester toute mes affections et mes amitiés à l'égard de mes collègues au département gène électrique.

C'est très difficile de citer tous les collaborateurs et je risquerai d'oublier quelqu'un qu'il soit fortement remercie.

## Table des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I Recherche bibliographique</b>	
<b>I.1. Constitution de la machine asynchrone.....</b>	<b>02</b>
<b>I.2. Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone.....</b>	<b>02</b>
<b>I.2.1. Les différents types des défaillances de la machine asynchrone.....</b>	<b>04</b>
<b>I.3. Méthodes de surveillance et de diagnostic de la machine asynchrone.....</b>	<b>05</b>
<b>I.3.1. Méthodes de prises de décision (classification).....</b>	<b>05</b>
<b>I.3.2. Méthodes basées sur une approche système.....</b>	<b>05</b>
<b>I.4. Exemple de diagnostic des défauts de roulements.....</b>	<b>06</b>
<b>I.4.1. Analyse spectrale.....</b>	<b>06</b>
<b>I.4.2. le Cepstre.....</b>	<b>07</b>
<b>I.4.3. Démodulation d'amplitude (analyse d'enveloppe).....</b>	<b>08</b>
<b>I.4.4. Analyse ondelettes.....</b>	<b>09</b>
<b>I.5. Synthèse bibliographique.....</b>	<b>09</b>
<b>I.6. Présentation du complexe (ASMIDAL).....</b>	<b>16</b>
<b>I.6.1. Organigramme d'un complexe « FERITIL ».....</b>	<b>17</b>
<b>Chapitre II Diagnostic des pannes du moto-ventilateur MK 17 de l'entreprise FERTIAL Annaba</b>	
<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>18</b>
<b>II.2. Description de l'équipement.....</b>	<b>18</b>
<b>II.3. Schéma cinématique.....</b>	<b>19</b>
<b>II.3.1. Caractéristiques du moteur M-17.....</b>	<b>20</b>
<b>II.3.2. Caractéristiques du ventilateur K-17.....</b>	<b>21</b>
<b>II.3.3. Principaux défauts mécaniques et électriques dans le moteur M-17.....</b>	<b>21</b>
<b>II.3.4. Calcul numérique.....</b>	<b>23</b>
<b>II.4. Partie expérimental.....</b>	<b>25</b>
<b>II.4.1. Analyse des spectres de vitesse mesurés dans la bande [0-1000HZ].....</b>	<b>25</b>

II.4.2. Analyse des spectres de déplacements mesurés dans la bande [0-200HZ].....	31
II.5. Conclusion.....	36
<b>Chapitre III Détection des défauts de roulement dans un moteur asynchrone par analyse vibratoire</b>	
III.1. Introduction.....	37
III.2. Plan expérimentale et matériel utilisé.....	37
III.2.1 Banc d'essais et matériel de mesure.....	37
III.2.2 Caractéristiques du moteur asynchrone.....	39
III.2.2.1 Caractéristique géométrique des roulements.....	40
III.2.2.2 Technique de création des défauts.....	41
III.2.2.3 Calcule cinématique.....	42
III.2.3 Analyse des résultats.....	42
III.2.3.1 Moteur sain (sans défaut).....	42
III.2.3.2 Spectres et signaux mesurés sans présence de défaut de roulement (12.5 Hz).....	42
III.2.3.3: Spectres et signaux mesurés sans présence de défaut de roulement (17.5 Hz).....	43
III.2.3.4 Moteur défectueux.....	44
III 2.3.5 Spectres, signaux et cepstres avec présence de défaut de roulement (12.5 Hz).....	45
III 2.3.6 Spectres et signaux mesurés avec présence de défaut de roulement (17.5 Hz).....	49
III. 3 Suivi de l'évolution du défaut par le kurtosis.....	52
III 3.1 Valeur du Kurtosis pour différents bandes de fréquences.....	53
III. 3.2 Présentation des Kurtosis sous forme d'histogramme.....	54
III.4. Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	56
Référence bibliographique.....	57

## Liste des figures

<b>Fig. I.1</b> : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	<b>02</b>
<b>Fig. I.2</b> : Proportion des défauts.....	<b>03</b>
<b>Fig. I.3</b> : Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.....	<b>03</b>
<b>Fig. I.4</b> : Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances.....	<b>04</b>
<b>Fig. I.5</b> : Spectre d'un défaut sur la bague extérieure.....	<b>07</b>
<b>Fig. I.6</b> : Cepstre d'un roulement défectueux.....	<b>08</b>
<b>Fig. I.7</b> : Analyse d'enveloppe d'un roulement défectueux .....	<b>09</b>
<b>Fig. II.1</b> : a) Moto-ventilateur MK 17, b) moteur M-17 et c) Ventilateur K-17.....	<b>19</b>
<b>Fig. II.2</b> : Schéma cinématique du moto-ventilateur MK 17.....	<b>19</b>
<b>Fig. II.3</b> : Schéma représentatif des points de mesures sur le MK 17.....	<b>20</b>
<b>Fig. II.4</b> : Photo de l'accouplement.....	<b>20</b>
<b>Fig. II.5</b> : Palier 01 du MK 17.....	<b>24</b>
<b>Fig. II.6</b> : Palier 02 du MK 17.....	<b>24</b>
<b>Fig. II.7</b> : Palier 03 du MK 17.....	<b>25</b>
<b>Fig. II.8</b> : Palier 04 du MK 17.....	<b>25</b>
<b>Fig. II.9</b> : Spectre de vitesse du palier N°1 du M-17 dans la direction axiale A1.....	<b>26</b>
<b>Fig. II.10</b> : Spectre de vitesse du palier N°1 du M-17 dans la direction horizontale H1.....	<b>26</b>
<b>Fig. II.11</b> : Spectre de vitesse du palier N°1 du M-17 dans la direction verticale V1.....	<b>26</b>
<b>Fig. II.12</b> : Zoom du spectre de vitesse du palier N°1 du M-17 dans la direction verticale V1.....	<b>27</b>
<b>Fig. II.13</b> : Spectre de vitesse du palier N°2 du M- 17 dans la direction axial A2.....	<b>27</b>
<b>Fig. II.14</b> : Spectre de vitesse du palier N°2 du M-17 dans la direction horizontale H2.....	<b>27</b>
<b>Fig. II.15</b> : Spectre de vitesse du palier N°2 du M- 17 dans la direction verticale V2.....	<b>28</b>
<b>Fig. II.16</b> : Spectre de vitesse du palier N°3 du K-17 dans la direction axial A3.....	<b>28</b>
<b>Fig. II.17</b> : Spectre de vitesse du palier N°3 du K 17 dans la direction horizontale H3.....	<b>29</b>
<b>Fig. II.18</b> : Zoom spectre de vitesse du palier N°3 du K-17 dans la direction horizontale H3.....	<b>29</b>
<b>Fig. II.19</b> : Spectre de vitesse du palier N°3 du K-17 dans la direction verticale V3.....	<b>29</b>

<b>Fig. III.8:</b> Signal sans défaut $F_r=12.5$ Hz, Bande de fréquence [0-400Hz].....	<b>43</b>
<b>Fig. III.9:</b> Spectre sans défaut pour $F_r=12.5$ Hz, bande de fréquence [0-400 Hz].....	<b>43</b>
<b>Fig. III.10:</b> Signal sans défaut $F_r = 17.5$ Hz, Bande [0-400Hz].....	<b>44</b>
<b>Fig. III.11:</b> Spectre sans défaut $F_r=17.5$ Hz, bande [0-400 Hz].....	<b>44</b>
<b>Fig. III 12:</b> Signal d'un défaut de BPFO pour $F_r = 12.25$ Hz, Bande [0-400Hz]... ..	<b>45</b>
<b>Fig.III 13 :</b> Spectre d'un défaut de BPFO pour $F_r = 12.25$ Hz, Bande [0-400Hz].....	<b>45</b>
<b>Fig. III 14 :</b> Cepstre d'un défaut de BPFO pour $F_r = 12.25$ Hz, Bande [0-400Hz].....	<b>46</b>
<b>Fig. III 15:</b> Signal d'un défaut de BPFO pour $F_r = 12.25$ Hz, Bande [0-1600Hz].....	<b>46</b>
<b>Fig. III 16:</b> Spectre d'un défaut de BPFO pour $F_r = 12.25$ Hz, Bande [0-1600Hz].....	<b>46</b>
<b>Fig. III 17:</b> Zoom spectre d'un défaut de BPFO pour $F_r = 12.25$ Hz, Bande [0-1600Hz].....	<b>47</b>
<b>Fig. III 18:</b> Cepstre d'un défaut de BPFO pour $F_r = 12.25$ Hz, Bande [0-1600Hz].....	<b>47</b>
<b>Fig. III 19:</b> Signal d'un défaut de BPFO pour $F_r = 12.25$ Hz, Bande [0-12800Hz].....	<b>47</b>
<b>Fig. III 20:</b> spectre d'un défaut de BPFO pour $F_r = 12.25$ Hz, Bande [0-12800Hz].....	<b>48</b>
<b>Fig. III 21 :</b> Signal d'un défaut de BPFO pour $F_r = 12.25$ Hz, Bande [0-25600Hz].....	<b>48</b>
<b>Fig.III 22 :</b> Spectre d'un défaut de BPFO pour $F_r = 12.25$ Hz, Bande [0-25600Hz].....	<b>48</b>
<b>Fig. III 23 :</b> Signal d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-400Hz].....	<b>49</b>
<b>Fig. III 24 :</b> Spectre d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-400Hz].....	<b>49</b>
<b>Fig. III 25 :</b> Cepstre d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-400Hz].....	<b>50</b>
<b>Fig. III 26 :</b> Signal d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-1600Hz].....	<b>50</b>
<b>Fig. III 27 :</b> Spectre d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-1600Hz].....	<b>50</b>
<b>Fig. III 28 :</b> Cepstre d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-1600Hz].....	<b>51</b>
<b>Fig.III 29 :</b> Signale d'un défaut de BPFO pour $F_r = 17.25$ Hz, Bande [0-12800Hz].....	<b>51</b>
<b>Fig. III 30 :</b> Spectre d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-12800Hz].....	<b>51</b>
<b>Fig. III 31:</b> Signal d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-25600Hz].....	<b>52</b>
<b>Fig. III 32 :</b> Spectre d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-25600Hz].....	<b>52</b>
<b>Fig.III.33:</b> Résultats obtenus dans le cas $F_{crt}=25$ Hz.....	<b>54</b>
<b>Fig.III.34:</b> Résultats obtenus dans le cas $F_{crt}=35$ Hz.....	<b>54</b>

<b>Fig. II.20</b> : Zoom du spectre de vitesse du palier N°3 du M-17 dans la direction verticale V3.....	<b>30</b>
<b>Fig. II.21</b> : Spectre de vitesse du palier N°4 du K-17 dans la direction axial A4.....	<b>30</b>
<b>Fig. II.22</b> : Zoom du spectre de vitesse du palier 4 du K-17 dans la direction axial A4.....	<b>30</b>
<b>Fig. II.23</b> : Spectre de vitesse du palier N°4 du K-17 dans la direction axial H4.....	<b>31</b>
<b>Fig. II.24</b> : Spectre de vitesse du palier N°4 du K-17 dans la direction verticale V4.....	<b>31</b>
<b>Fig. II.25</b> : Spectre de déplacement du palier N°1 du M-17 dans la direction axial A1.....	<b>32</b>
<b>Fig. II.26</b> : Spectre de déplacement du palier N°1 du M-17 dans la direction horizontale H1.....	<b>32</b>
<b>Fig. II.27</b> : Spectre de déplacement du palier N°1 du M-17 dans la direction verticale V1...	<b>32</b>
<b>Fig. II.28</b> : Spectre de déplacement du palier N°2 du M-17 dans la direction axiale A2.....	<b>33</b>
<b>Fig. II.29</b> : Spectre de déplacement du palier N°2 du M-17 dans la direction horizontale H2.....	<b>33</b>
<b>Fig. II.30</b> : Spectre de déplacement du palier N°2 du M-17 dans la direction verticale V2...	<b>33</b>
<b>Fig. II.31</b> : Spectre de déplacement du palier N°3 du K-17 dans la direction axiale A3.....	<b>34</b>
<b>Fig. II.32</b> : Spectre de déplacement du palier N°3 du K-17 dans la direction horizontale H3.....	<b>34</b>
<b>Fig. II.33</b> : Spectre de déplacement du palier N°3 du K-17 dans la direction verticale V3....	<b>34</b>
<b>Fig. II.34</b> : Spectre de déplacement du palier N°4 du K-17 dans la direction axiale A4.....	<b>35</b>
<b>Fig. II.35</b> : Spectre de déplacement du palier N°4 du K-17 dans la direction horizontale H4.....	<b>35</b>
<b>Fig. II.36</b> : spectre de déplacement du palier N°4 du MK 17 dans la direction verticale V4.	<b>35</b>
<b>Fig. III.1</b> Banc d'essai.....	<b>37</b>
<b>Fig III.2</b> Accéléromètre triaxiale.....	<b>38</b>
<b>Fig.III.3</b> Schéma cinématique.....	<b>38</b>
<b>Fig.III.4</b> Multi-analyses de PULSE.....	<b>39</b>
<b>Fig. III.5</b> : Défauts sur la bague extérieure Figure.....	<b>40</b>
<b>Fig.III.6:</b> Rotor sain.....	<b>40</b>
<b>Fig.III.7:</b> Matériel utilisé pour la création des défauts.....	<b>41</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Fréquences d'apparition des défauts de roulements.....	<b>06</b>
<b>Tableau. I.2</b> : Organigramme d'un complexe « FERTIAL ».....	<b>17</b>
<b>Tableau II.1</b> : Caractéristiques du moteur asynchrone M-17.....	<b>20</b>
<b>Tableau II.2</b> : Caractéristiques du ventilateur K-17.....	<b>21</b>
<b>Tableau II.3</b> : Analyses vibratoires, signatures fréquentielles.....	<b>22</b>
<b>Tableau III.1</b> : Caractéristiques du moteur étudié (moteur asynchrone).....	<b>40</b>
<b>Tableau III.2</b> : la fréquence des défauts de roulement du palier 01.....	<b>42</b>
<b>Tableau III.3</b> : la fréquence des défauts de roulement du palier 02.....	<b>42</b>
<b>Tableau III.4</b> : Résultats obtenus.....	<b>53</b>
<b>Tableau III.5</b> : Résultats obtenus.....	<b>53</b>

A decorative circular frame with a light blue border. At the four cardinal points (top, bottom, left, and right), there are ornate floral motifs. Each motif features a central yellow flower with a red center, surrounded by green leaves and smaller blue and yellow flowers. The frame is set against a plain white background.

# Introduction générale

Sous la pression de la concurrence mondiale, les installations de production ont vu leurs performances croître régulièrement. Les moteurs asynchrone sont de plus en plus sollicités, vitesse de rotation, durées de fonctionnement et efficacité augmentent. Il s'ensuit une augmentation des dégâts et des pannes qui entraînent des arrêts non programmés. Les coûts d'arrêts de production sont donc nettement supérieurs aux coûts de réparation et de remise en état. Ainsi la prévention des dégâts des moteurs a pour chaque entreprise une grande signification économique.

Continuité dans la production, maintien de l'outil, respect de l'environnement et succès économiques ne peuvent être garantis dans le temps qu'à l'aide d'une maintenance qui prévient efficacement les dégâts et les pannes, et qui utilise de façon optimale le potentiel des moteurs. Ces deux conditions ne peuvent être remplies que par la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle.

L'objectif principal d'une bonne surveillance est de détecter les anomalies de fonctionnement avant qu'elles ne présentent un risque pour le moteur. Lorsqu'un défaut est détecté, il faut être capable de préciser s'il est grave, et dans ce cas combien de temps on peut la laisser en fonction avant de l'arrêter.

Pour assurer cette surveillance, on dispose d'informations représentatives (symptômes) des défauts à surveiller.

En effet la disponibilité de l'appareil de production, son état de fonctionnement ainsi que sa maintenance sont des soucis majeurs de l'industrie actuelle. A travers la mesure, le stockage, et l'analyse des signaux vibratoires, il est possible de mettre au point des procédés efficaces de surveillance et de diagnostic des moteurs.

La surveillance par les vibrations peut se révéler une méthode efficace pour parvenir aux résultats, et parfois à moindre frais ; ce dernier point qui représente l'aspect économique de la surveillance n'est pas négligeable pour un industriel.



# Chapitre I

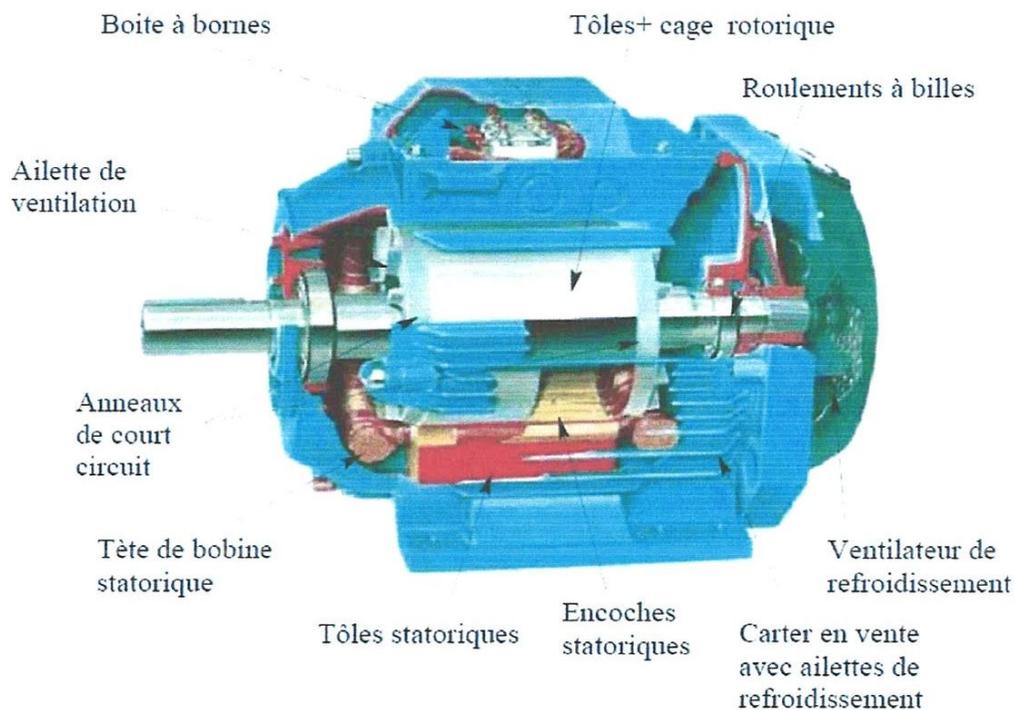
## Recherche bibliographique

## Chapitre I

### Recherche bibliographique

#### I.1. Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe, on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux mêmes en permanence, on définit deux types de rotor bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électrique ment équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la Figure I.1



**Fig. I.1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [1]**

#### I.2. Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes [2] :

- ❖ les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation

Une autre étude statistique [4] faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur la Figure I.4 :

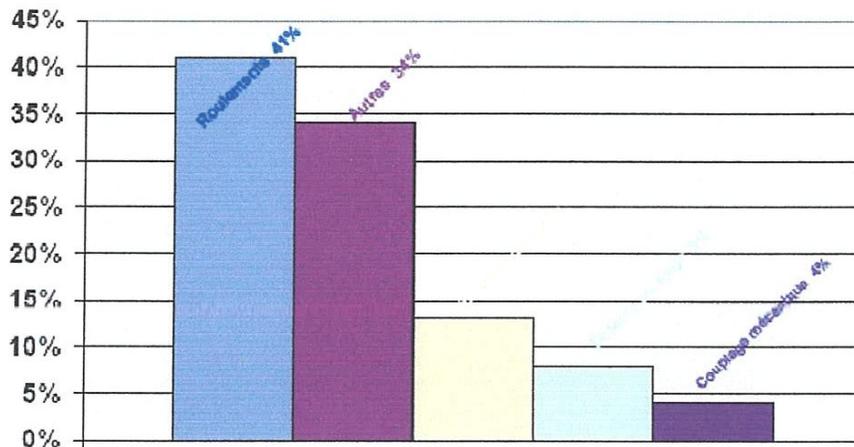


Fig. I.4 : Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances

### I.2.1. Les différents types des défaillances de la machine asynchrone

- Défaillances au stator
- Défaillances au rotor
- Défaillances mécaniques :
  - ❖ Défauts roulements

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. Dans l'article [5], l'auteur présente la plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement. Comme il a été présenté précédemment, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles :

- l'usure due au vieillissement
- la température de fonctionnement élevée
- la perte de lubrification
- l'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement)
- le défaut de montage
- les courants d'arbres.

### **I.3. Méthodes de surveillance et de diagnostic de la machine asynchrone**

#### **I.3.1. Méthodes de prises de décision (classification)**

##### **a. Discriminant Linéaire – ACP**

Le but principal de l'ACP est donc de trouver un ensemble de facteurs (composantes) qui ont une dimension inférieure à celle de l'ensemble original des données et qui puissent décrire correctement les tendances principales. L'ACP est une procédure qui ne prend en compte quelles variables du processus. Parfois, un ensemble additionnel de données est disponibles.

##### **b. Les K plus proches Voisins (K- Nearest Neighbors)**

C'est la première méthode de classification qui ne suppose pas un type de distribution des données. L'algorithme fait un calcul de distance entre tous les individus et chaque objet est classé dans le groupe où se trouvent ses K plus proches voisins.

##### **c. Réseaux de Neurones**

La structure générale d'un réseau de neurones utilisée pour le diagnostic de systèmes, est généralement constituée de trois couches : une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie.

##### **d. Méthodes de coalescence (clustering)**

Ces algorithmes ont comme paramètres d'entrée le nombre de classes. Ils partagent l'ensemble de N objets en K groupes, ainsi la similarité à l'intérieur d'un même groupe est élevée mais faible entre les différentes classes. Pour ce faire, ces algorithmes itèrent en deux étapes, d'abord ils calculent les centres des groupes et deuxièmement ils assignent chaque objet au centre le plus proche.

#### **I.3.2. Méthodes basées sur une approche système**

##### **a. Réseaux de neurones**

Le principe des réseaux de neurones s'inspire des neurones biologiques. Le modèle du neurone formel se comporte comme un opérateur effectuant une somme pondérée de ses entrées, suivie d'une non linéarité, appelée fonction d'activation, responsable du comportement du neurone.

##### **b. Reconnaissance de forme (RdF)**

La reconnaissance des Formes (RdF) repose sur le classement des objets ou formes en les comparants à des formes-types.

##### **c. Analyse Temps-fréquence (outil privilégié de détection)**

La représentation temporelle du signal ne donne pas une bonne perception des composantes oscillantes multiples, tandis que la représentation fréquentielle (transformée de Fourier) ne montre pas clairement la localisation temporelle de ces composantes. Il semble donc naturel de penser que ces limitations pourraient être surmontées par une analyse temps fréquence où le signal est représenté comme une fonction conjointe du temps et de la fréquence c'est-à-dire dans un plan « temps-fréquence » plutôt qu'une fonction du temps ou de la fréquence.

Les représentations temps-fréquences (RTF), présentées dans ce contexte, sont issues de la classe de Cohen [6]. Elles décrivent le contenu énergétique pour une fréquence à un instant donné.

#### I.4.Exemple de diagnostic des défauts de roulements

##### I.4.1.Analyse spectrale

Le spectre se représente sous forme d'un graphique montrant l'amplitude à chaque fréquence. L'apparition d'un pic sur le spectre, correspondant à l'une de ces fréquences ou de leurs harmoniques, c'est un signe de la présence d'un défaut. Le tableau. I.1 illustre les expressions mathématiques des différentes fréquences d'apparition des défauts de roulements [7].

**Tableau I.1 : Fréquences d'apparition des défauts de roulements**

Défaut	Fréquence d'apparition
Bague extérieure	$BPFO = \frac{nN}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$
Bague intérieure	$BPFI = \frac{nN}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$
Elément roulant	$BPF = \frac{DN}{d} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \alpha\right)$
Cage	$CF = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$

Où  $D$  est le diamètre moyen du roulement en mm,  $\alpha$  représente l'angle de contact en degré,  $n$  le nombre d'éléments roulants et  $d$  leur diamètre en mm. Pour des vitesses de rotation normales, ces fréquences sont dans le rang des basses fréquences. En pratique, elles peuvent être un peu différent des valeurs réelles présentes dans le spectre. En plus, les pics correspondants peuvent être modulés de part et d'autre par des bandes latérales [7]. En réalité,

il y a d'autres défauts comme le désalignement du roulement dont les fréquences sont des multiples de la vitesse de rotation. Nous allons nous intéresser uniquement à ceux des quatre familles précédentes.

Pour illustrer l'approche fréquentielle de la détection des défauts de roulements, nous présentons, sur la figure I.5 le spectre d'un roulement défectueux.

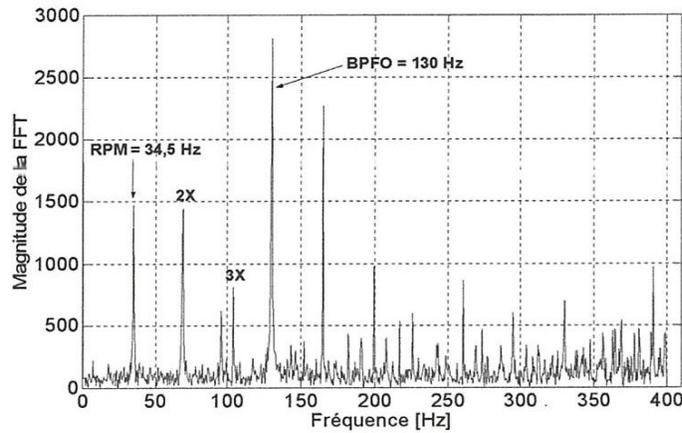


Fig. I.5 : Spectre d'un défaut sur la bague extérieure [8]

#### I.4.2. le Cepstre

Cette fonction (transformée inverse du logarithme du spectre) permet, dans un spectre de rechercher, d'identifier et de quantifier rapidement toute famille de composantes périodiques, induit par un défaut. Ces familles de composantes peuvent se présenter tant sous forme de peigne de raies que sous forme de bandes latérales de modulation autour d'une fréquence cinématique. Le Cepstre permet d'avoir des indicateurs de dépistage adaptés à des stades plus ou moins avancés, des énergies vibratoires peu importantes. Cet outil puissant, permettant la détection de l'évolution de défaut est désormais utilisé dans les systèmes experts industriels. Il nécessite cependant les compétences de spécialistes pour le choix du nombre de points de l'échantillon et ainsi que le facteur d'échantillonnage, afin d'avoir une amplitude significatif des pics à surveiller [7]. La figure I.6 montre l'exemple d'un cepstre d'un roulement défectueux.

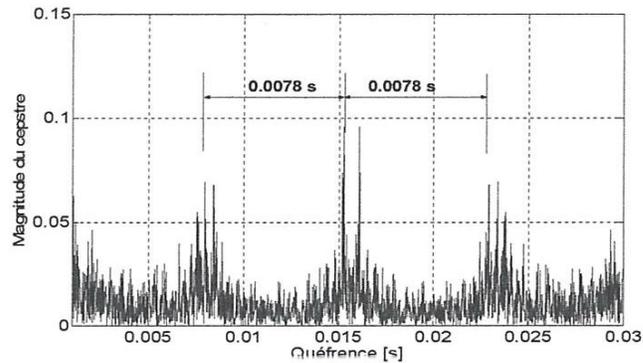
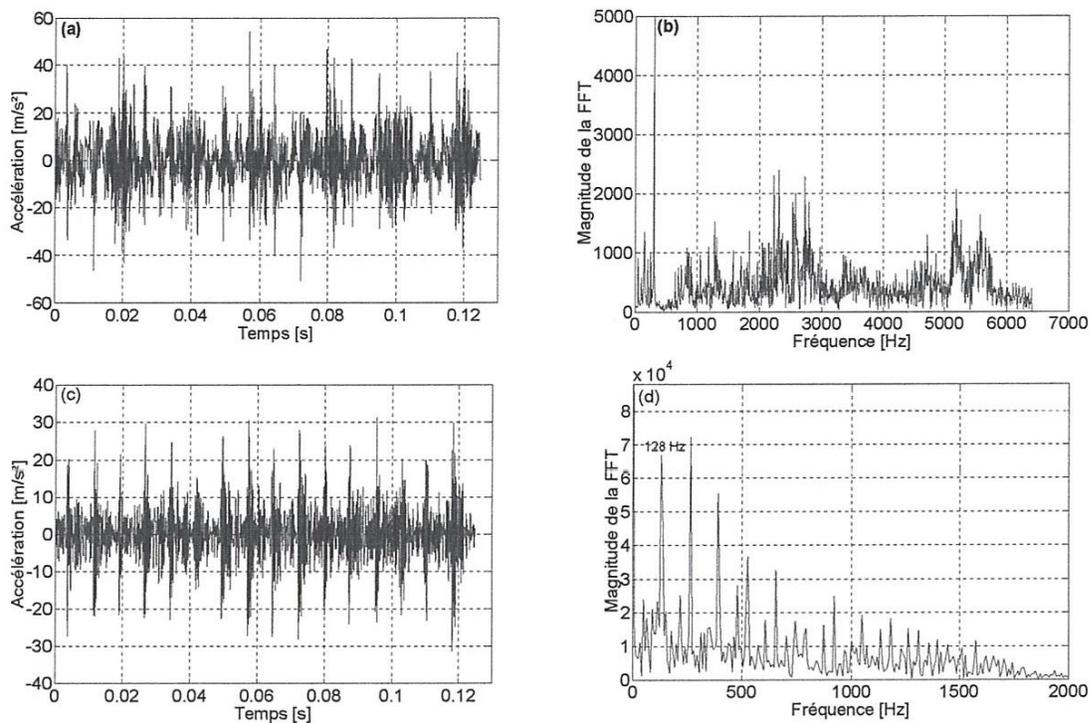


Fig. I.6 : Cepstre d'un roulement défectueux [8]

### I.4.3. Démodulation d'amplitude (analyse d'enveloppe)

La démodulation d'amplitude, appelée plus souvent encore détection d'enveloppe, est un outil d'aide au diagnostic très intéressant pour la détection des défauts de roulements. La démodulation d'amplitude permet en effet d'analyser la forme du signal, notamment lorsque le défaut recherché excite un mode de résonance de la structure (par exemple, bagues de roulements, paliers, carters), ce qui est fréquemment le cas en mécanique où beaucoup de défauts engendrent des forces pulsionnelles qui excitent des modes de résonance de la structure bien avant de se manifester à leurs propres fréquences cinématiques.

La détermination des fréquences de modulation et donc des taux de répétition des chocs, associée à la connaissance de la cinématique de l'installation, permet de localiser, voire de déterminer, l'origine du défaut et cela de façon précoce et rapide, même lorsque le défaut est noyé dans un bruit de fond dû à l'environnement immédiat de l'organe incriminé. La démarche numérique de calcul de l'enveloppe est la suivante : on applique la transformée de Fourier au signal temporel. Le spectre ainsi défini permet d'isoler les résonances du système. Le signal temporel est filtré passe-bande afin d'obtenir un spectre réduit autour de la fréquence principale du système, puis on applique la transformée d'Hilbert puis la transformée inverse de Fourier, on obtient le signal d'enveloppe temporel. Ce signal est rarement directement employé comme outil d'analyse, on utilise plutôt le spectre d'enveloppe [9]. La figure I.7 montre l'exemple d'une analyse d'enveloppe d'un roulement défectueux.



**Fig. I.7 : Analyse d'enveloppe d'un roulement défectueux [8]**

#### I.4.4. Analyse ondelettes

L'analyse par ondelettes est une méthode de traitement de signaux récent qui a fait l'objet de plusieurs applications pour la détection des défauts de roulements. Venant combler les limites de l'FFT, elle est adaptée spécialement pour l'analyse des signaux transitoires. Elle est toujours un domaine de recherche d'actualité dans plusieurs secteurs.

#### I.5. Synthèse bibliographique

L. Zamponi et al. [10], ont présenté une méthodologie pour calculer les pressions de contact dans les éléments roulants et d'autres paramètres significatifs applicables aux pistes de roulement utilisé dans les boîtes de vitesse aéronautique d'hélicoptère. Le mécanisme est modélisé par une méthode hybride où les composantes sont discrétisées par les éléments finis et les roulements sont décrit par des caractéristiques de substitution. Le modèle hybride présenté, permet d'une part, d'expliquer le comportement global des roulements dans un mécanisme complet, et d'autre part, pour déterminer avec précision le comportement local des éléments roulant. En plus, les déformations et les défauts géométriques de toutes les parties du mécanisme sont inclus dans cette méthodologie, qui directement inclut dans l'environnement de CATIA V5, utilisé dans la conception, les simulations présentées mettent en avant les

effets de la flexibilité et les défauts géométriques des éléments sur le comportement du roulement (déformation, pression de contact). La répartition des charges dans le roulement est modifiée par la flexibilité des pièces et des pistes de roulement, ce qui augmente la durée de vie du roulement. Ils montrent dans ce travail l'impact de la flexibilité de différentes pièces mécaniques et de leurs défauts géométrique sur le comportement des pistes de roulement. Trois importantes conclusions sont mises à l'avant, en premier lieu, la répartition des charges dans le roulement. En second lieu, la position du défaut dans l'assemblage étudié n'a pas d'effet significatif sur la durée de vie du roulement, et finalement, la direction des défauts augmente la pression dans les roulements et la variation de la vitesse orbitale des billes dans les roulements.

Tomasz Barszcz et al. [11], ont présenté l'application de la technique spectrale de kutosis pour la détection d'une fente de dent dans l'engrenage planétaire d'une turbine de vent.

Leur travail provient d'un vrai cas du défaut catastrophique d'engrenage sur une turbine de vent, Qui n'a pas pu être détecté par les méthode actuellement appliquée. Certain nombre de ces méthode généralement appliquée dans la surveillance vibratoire en ligne et les système de diagnostics sont explorés, ces méthode n'ont pas réagi à l'échec jusqu'à quelque minutes avant le défaut la méthode de la moyenne des vibration d'engrènement dans le domaine temporelle est étudiée, elle aussi ne détecte aucune trace de fissure sur la dent d'engrenage à cause de la gamme extrême de fréquence des symptôme de défaut.

En conclusion, les auteures proposent une méthode basé sur le kutosis spectral qui donne de bons résultats, cette méthode peut détecter l'existence de la fente de dent plusieurs semaines avant l'échec d'engrenage.

Jian-Da Wua et al [12], ont décrit l'application d'une technique de surveillance adaptative pour le diagnostic des defaults dans les machines tournantes, les méthodes conventionnelles de cette technique sont principalement basées sur l'analyse de fourrier. Malheureusement, dans quelques applications pratiques de surveillance est limité, quand un problème de bruitage. Dans cette étude, le système proposé de diagnostic de défaut est basé sur RLS (récurive least-square) un algorithme de filtrage du moindre carré récurif. Des amplitudes peuvent être calculées avec haute résolution dans l'exécution en temps réel. L'algorithme est mis en application sur une plateforme du processeur de signal numérique DSP (digital signal processor) pour le diagnostic. Une étude expérimentale est mise en application pour évaluer le système proposé dans deux application de diagnostic des défauts d'ensemble d'engrenage défectueux, et dans le diagnostic des lames endommagées de

turbocompresseur de moteur, en employant l'algorithme de filtrage proposé RLS. Les résultats des expériences indiquent que l'algorithme proposé est efficace dans le diagnostic des défauts pour les deux cas expérimentaux.

N. Saravanan et al. [13], ont présenté l'utilisation de l'arbre de décision pour choisir les meilleurs dispositifs statistiques qui distingueront les conditions de panne du réducteur de transmission des signaux extraits. Ces dispositifs sont extraits à partir des signaux de vibration. Un ensemble de règle est formé des dispositifs extraits et alimenté à un classificateur brouillé. Le nécessaire réglé de règle pour établir le classificateur brouillé est obtenu en grande partie par la connaissance d'intuition et de domaine.

Il présenté également l'utilisation de l'arbre de décision pour produire des règles automatiquement de l'ensemble de dispositif. Le signal de vibration d'un capteur piézoélectrique est capturé pour les conditions suivantes - le bon pignon conique, pignon conique avec la rupture de dent (GTB) (bevel gear with tooth breakage), pignon conique avec la fente à la racine de la dent (GTC) (bevel gear with crack at root of the tooth), et le pignon conique avec l'usage de face des dents (TFW) (bevel gear with face wear of the teeth) pour différents états de chargement et de lubrification.

Les dispositifs statistiques ont été extraits et de bons dispositifs qui distinguent les différentes conditions de panne de la boîte de vitesse ont été choisis usinés l'arbre de décision. L'ensemble de règle pour le classificateur brouillé est obtenu près une fois utilisé l'usinage de l'arbre de décision encore. Un classificateur brouillé est établi et examiné avec données représentatives. Les résultats s'avèrent d'une manière encourageante.

Dans la mémoire de magister[14], l'auteur Présenté une étude d'identification des défauts combinés d'engrenage et de roulements par analyse vibratoire avec les différents outils de traitement du signal tels que l'analyse fréquentielle basée sur le spectre moyenne « Autospectre » mesuré et celui calculé avec la transformée de Fourier du signal mesuré et le cepstre moyenne mesuré, le filtrage passe bande et l'analyse d'enveloppe basée sur la transformée de Hilbert, l'analyse multi résolution en ondelettes « AMRO » ou la transformée en ondelettes discrètes. Il présente d'une part, une méthodologie numérique telle que la simulation numérique des défauts isolés d'engrenages et de roulements et ceux combinés (roulement-roulement, engrenage-roulement et engrenage-engrenage). Il présente une démarche expérimentale qui aide à la détection et la localisation des défauts qui peuvent être générés sur la bague intérieure ou/et extérieure du roulement et sur les dentures d'engrenage roue ou/et pignon pour différentes conditions d'essai (vitesse de rotation, graissage, bandes de fréquences).

Dans la thèse de [8] l'auteur Présenté, une étude théorique poussée a été réalisée sur un modèle mathématique simulant des chocs, l'objectif étant l'optimisation de la sensibilité de plusieurs indicateurs scalaires afin, d'une part, permettre la détection la plus précoce possible et d'autre part d'en déduire l'indicateur le plus adapté à la détection des défauts de chocs.

Il remarque le grand effet néfaste du bruit aléatoire et des fréquences parasites sur le kurtosis et le facteur de crête. Une nouvelle approche est développée. Basé principalement sur l'optimisation de l'analyse multi résolution en ondelettes afin de l'adapter au traitement de signaux de chocs.

A ce propos, plusieurs paramètres ont été choisis et optimisés ce qui a permis une nette amélioration de la sensibilité des indicateurs scalaires et un grand apport en gain de détection même dans les conditions les plus extrêmes. La validation expérimentale a été réalisée sur un grand nombre de roulements à billes à contact radial et à rouleaux cylindriques. Le but est de prouver, d'une part, l'influence des paramètres étudiés auparavant dans la simulation et d'autre part l'apport de l'analyse multi résolution en ondelettes dans l'amélioration de la sensibilité des indicateurs scalaires et par suite dans la détection des différents défauts simulés sur les roulements. Une analyse de variance et une application industrielle ont également été réalisées.

Dans l'article [15], l'auteur présente la modélisation et la simulation d'un moteur asynchrone à cage par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce type de moteur s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction, par contre sa simulation est difficile, car le modèle est fortement non linéaire. Actuellement, la disponibilité de puissants outils informatiques de calcul permet de surmonter cette difficulté. Le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraînée a été modélisé et simulé. Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé. D'autres régimes de fonctionnement du moteur peuvent être facilement étudiés.

Abdelkader Mellakhi et al.[16], ont développés une technique maintenant répandue qu'est l'analyse spectrale de la signature du courant statorique du moteur asynchrone à cage d'écureuil en vue de la détection d'un défaut au rotor, cassure de barres, en tenant compte des harmoniques d'espace. Le modèle de la machine utilisée est l'approche des multi circuits électriques couplés magnétiquement et ont présenté l'effet de cassure des barres rotoriques avec une prise en compte des harmoniques d'espace, et ainsi identifié les signatures les plus significatives sur le spectre du courant statorique à partir des résultats obtenus par la simulation. Les cassures de barres engendrent :

- des oscillations sur le couple et la vitesse ;

- l'augmentation d'amplitude du couple moyen ;
- l'apparition d'harmoniques sur les courants statoriques.

L'analyse spectrale du courant statorique permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la rupture des barres de la cage rotorique. Il s'est avéré que la surveillance de l'amplitude des composantes de fréquence, présente dans le spectre fréquentiel du courant statorique, permet de détecter la présence d'un défaut au niveau de la cage rotorique de la machine.

L'analyse de l'amplitude des harmoniques d'espace dans le spectre du courant statorique donne des informations supplémentaires non négligeables pour le diagnostic des défauts rotoriques.

Dans l'article [17], les auteures présentent trois méthodes de détection des cassures de barres dans un moteur asynchrone triphasé à cage. Ces méthodes sont basées sur l'analyse spectrale(FFT) des signaux du couple, de la vitesse et du courant statorique afin de déterminer leurs composition fréquentielle, et donc de retrouver les raies associées au défaut. Ils présentent un modèle multi-enroulement décrivant le comportement du moteur en présence de cassure de barres. Une étude analytique du défaut est décrite. Les résultats de la simulation obtenus ont permis de montrer l'intérêt de ces techniques ainsi que la comparaison entre elles. Des testes de simulations ils ont permis de comparer entres ces techniques. Il s'est avéré que la détection des défauts est plus aisée sur le courant statorique que sur la vitesse ou sur le couple. Cette constatation s'explique en partie par le fait que le courant statorique est plus accessible et mesurable extérieurement.

Dans la thèse de [18], les auteures présentent un modèle de simulation de l'interaction entre les engrenages et le roulement en présence de défaut. Ils présentent un modèle dynamique combinée d'engrenage/roulement, sur un band d'essai de boite de vitesse et une simulation des défauts localisé des roulements. Pour simuler ceci il est nécessaire de modéliser un système d'engrenages portés sur des roulements .Ce mode est basées sur la théorie hertzienne de contact qui comporte les déplacements dans les deux pistes des roulements avec la charge comprise par les éléments roulants des les roulements. Les signaux simulés et expérimentaux (signaux d'accélération) des défauts localisés ont été soumis aux même techniques de diagnostic : analyse spectrale, analyses spectrales de kurtosis (SK) et analyses d'enveloppe. Les signaux simulés ont les mêmes caractéristiques que ceux mesurés, la similitude entre ces derniers confirme que se modèle peut être employé efficacement pour simuler des défauts de différentes positions et gravités.

Yaguo lei et al. [19] utilisent une méthode intelligente hybride multidimensionnelle pour le diagnostic des défauts d'engrenage automatiquement. Le problème qui se pose c'est l'identification des catégories des défauts et de leurs niveaux de dégradation. Particulièrement pour les défauts naissants et combinés, dans cette méthode la transformée de Hilbert, la transformée par paquet d'ondelette WPT (wavelet packet transform) et la décomposition empirique de mode EMD (empirical mode decomposition) sont exécutées. Une des principales méthodes c'est sur des signaux vibratoires pour extraire l'information additionnelle caractéristiques des défauts. Ces signaux sont capturés pour différentes charges et vitesse de rotation du moteur à partir d'une boîte de vitesse. Cette dernière est les principales composantes dans les machines tournantes. Plusieurs méthodes ont été développées pour détecter et diagnostiquer les défauts d'engrenages. Une des principales méthodes c'est l'analyse vibratoire par le traitement des signaux vibratoires et la technique d'intelligences artificielles qui ont été appliquées avec succès à la détection et au diagnostic automatisés du défaut d'engrenage. La combinaison de l'algorithme génétique GA (genetic algorithm) avec les classificateurs basé sur le réseau de neurone MLP (multi-layer perceptron) multicouche, radial neurologique de la fonction de base RBF (radial basis function) et l'algorithme de la classification KNN (K nearest neighbor) pour construire une méthode fiable et précise de diagnostic des défauts. Le résultat d'analyse sur des données d'engrenage prouvent que la méthode intelligente hybride proposée permet la détection des anomalies dans les engrenages et en même temps l'identification des catégories et des niveaux de ces dommages.

Dans l'article [20], les auteurs présentent une étude sur la détection de défaut au niveau du rotor de la machine à induction par le suivi des résistances rotoriques d'un modèle triphasé. Un outil de détection des défauts rotoriques basé sur l'observateur de Kalman consiste à surveiller la machine asynchrone lorsqu'un défaut rotorique apparaît. Ils ont développé un outil de diagnostic basé sur l'observation des paramètres significatifs des défauts dans une machine asynchrone. Un observateur de Kalman étendu nous a permis le suivi des résistances des trois phases rotoriques. Alors, on peut servir de cet observateur comme une alarme indicatrice de défaut.

Dans l'article [21] les auteurs ont proposé une méthode de détection des défauts en temps réel dans les réducteurs de transmission en utilisant l'algorithme adaptatif d'extraction des caractéristiques pour traiter les signaux défectueux non stationnaires. Ce dernier est généralement employé dans différentes applications et a de fortes capacités d'optimisation. La méthode basée sur une combinaison des méthodes de recherche conventionnelles unidimensionnelles et multidimensionnelles qui ont donné un rendement plus élevé et des résultats de détection des

défauts plus précis en comparaison aux algorithmes évolutionnaires. L'efficacité, la praticabilité et la robustesse de la méthode proposée de recherche adaptative qui détecte des défauts de large bande, employée pour extraire toute les impulsions possible des défauts émanant de défèrent structures en fonction du temps et pour des plages de fréquences déférents.

A. Djebala et al [22] ont proposé une étude théorique, expérimentale et statistique, qui aide à la détection de défauts de roulement par l'analyse multirésoution en ondelette (AMRO) ou la transformée en ondelette discrète. Elle est utilisée comme un filtre passe bande. L'étude consacrée à l'optimisation des différents paramètres de l'AMRO pour une bonne détection de défaut. Ces paramètres sont le choix optimal du nombre de niveaux de décomposition, la fréquence maximale du signal, le vecteur optimal de décomposition, le choix optimal de la fréquence d'échantillonnage et le choix de l'ondelette analysante. La validation expérimentale est effectuée par l'application des choix précédents sur des signaux réels mesurés sur un banc d'essai conçu spécialement pour ce type de défauts (défauts de type chocs : BPFO, BPFI, BPF, CF). Plusieurs types et tailles de défauts sont introduites sur 7 roulements de type 6200. L'acquisition des signaux vibratoires est effectuée pour différentes vitesses de rotation 10, 15, 30, 50 Hz et différentes fréquences d'échantillonnages tels que 1024, 4096, 16384, 32768 et 65536 Hz. Les résultats trouvés sont traités par l'AMRO afin de tirer les conclusions suivantes : le kurtosis est vraiment sensible au bruit de fond, et que le filtrage par l'AMRO est plus efficace que celle passe bande et permet une augmentation des indicateurs (Kurtosis, facteur de crête, RMS,..) de détection des défauts de roulement. Le kurtosis est plus sensible aux chocs que le facteur de crête.

Dans le mémoire de magister [1] L'auteure a présentée un travail basé sur un diagnostic par la classification des défauts de la machine Asynchrone. Trois types de défauts ont été traités à savoir le défaut statorique, le défaut rotorique et le défaut de roulement.

Les techniques et autres outils de diagnostic étant très nombreuses, classées en deux approches une approche signal basée sur le traitement de signal des grandeurs mesurables, à savoir le courant et la tension. Une approche système, en l'occurrence la classification par les représentations optimisées temps-fréquence.

La classification automatique des défauts de la machine asynchrone a été réalisée à partir de la représentation temps-fréquence dite "dépendante de la classe du signal". Il a montré que les RTF classiques ont des noyaux paramétriques et à priori prédéfinis donc inappropriés à la classification, d'où l'orientation vers le plan d'ambiguïté doppler-retard où toutes les RTF peuvent être dérivées par un choix approprié d'un noyau. Après avoir montré

les limites du noyau DCS de moyenne carrée et du noyau discriminant linéaire, à cause respectivement du non prise en considération de la variance interclasse pour le premier noyau et la nécessité des grands ensembles d'apprentissage pour le second noyau, il a opté pour le noyau discriminant de Fisher afin de palier à ces deux inconvénients.

La première phase du processus de classification est la phase d'extraction des points pertinents. La seconde phase consiste à la prise de décision concernant l'affectation d'un signal non classé. Deux méthodes de la prise de décision ont été utilisées à savoir les réseaux de neurones et les k-plus proches voisins. Cette dernière a été retenue vu ces performances et l'interprétation de ces résultats.

### I.6. Présentation du complexe (ASMIDAL)

ASMIDAL est définie comme une entreprise publique économique S.P.A. Cette entreprise a été créée par décret N° 84/258 du 01/09/84, et ce à l'issue de la décentralisation qu'a connue la SONATRACH en 1984.

Le choix de l'implantation du complexe des engrais phosphatés et azotés d'Annaba a été fait selon des considérations économiques, parmi les quelles on peut citer :

- Proximité des installations portuaires.
- Moyens de communication rapide.
- Disponibilité des eaux (eau de mer, eau de barrage).
- Les centres thermiques d'Annaba et d'El-Hadjar.
- L'existence de la voie ferrée.

Le complexe s'étale sur une superficie de 108 hectares. En plus, de la direction centrale on note l'existence de dix autres départements qui sont respectivement la production, la maintenance, la technique approvisionnement, la sécurité, les finances, organisation, administration, direction des ressources humaines et en fin le département des moyens généraux.

Le complexe comprend deux zones de production, la zone Azotée ou la zone nord et la zone phosphatée ou la zone sud.

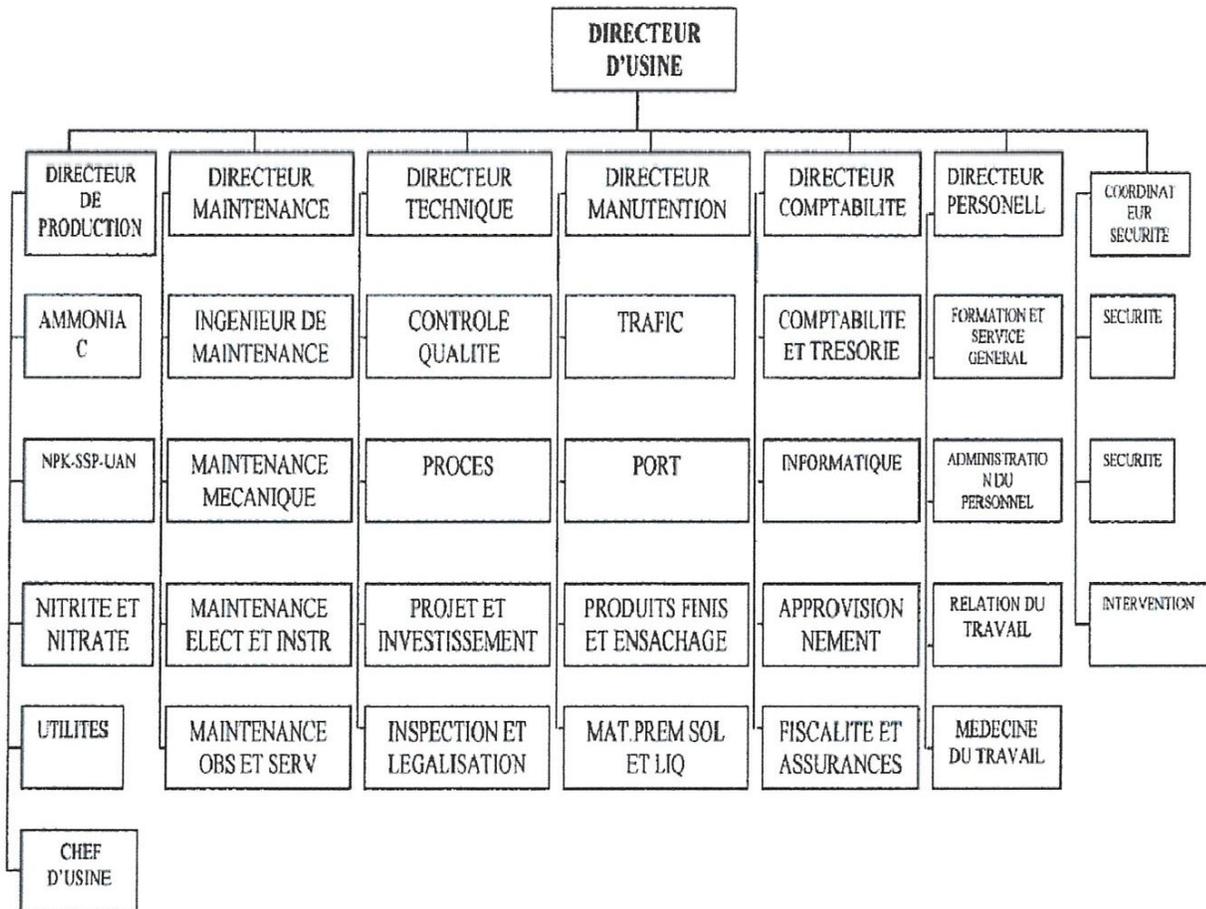
L'organigramme comprenait plus de 5000 travailleurs, actuellement, après assainissement financier et compression des effectifs ce nombre a été réduit à environ 2000 travailleurs. ASMIDAL est composée de plusieurs unités pour la fabrication de l'ammoniac et des engrais

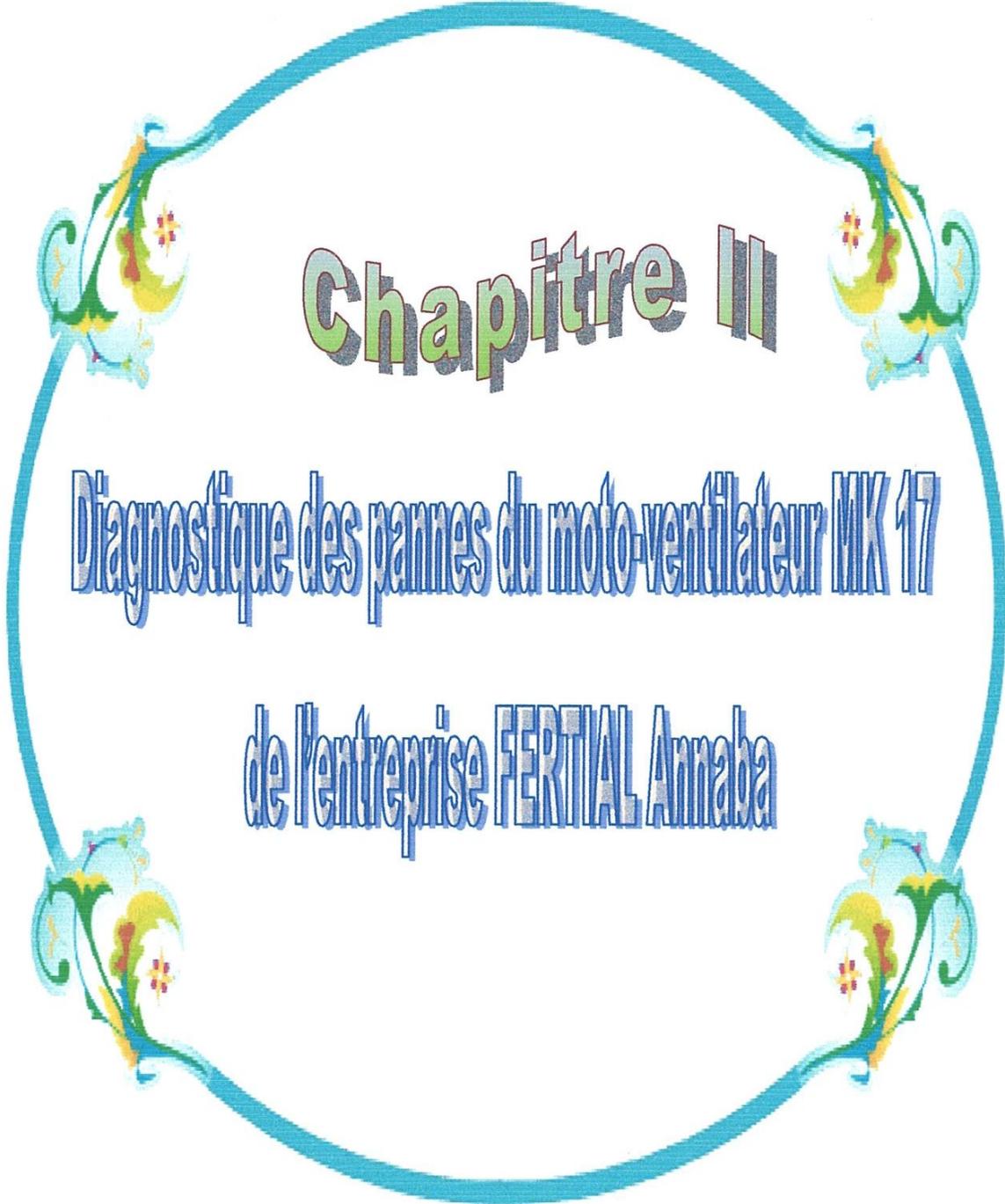
- Une unité d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ).
- Une unité d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ).
- Une unité de nitrates d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{NH}_3$ ).

- Une unité de super simple phosphaté (SSP).
- Une unité d'engrais phosphatés (NPK).
- Une unité d'utilité (CCU).

**I.6.1. Organigramme d'un complexe « FERITIL »**

**Tableau. I.2: Organigramme d'un complexe « FERTIAL »**





# Chapitre II

Diagnostic des pannes du moto-ventilateur MK 17

de l'entreprise FERTIAL Annaba

## Chapitre II

### Diagnostic des pannes du moto-ventilateur MK 17 de l'entreprise FERTIAL Annaba

#### II.1. Introduction

Le moto-ventilateur MK17 se trouve au niveau de l'unité de nitrate d'ammonium, de l'entreprise FERTIAL d'Annaba, c'est une machine primordiale dans le processus de fabrication nécessite une surveillance continue. Malheureusement, ce mécanisme est suivi en off line, par la mesure des niveaux globaux de vibration de vitesse et d'une manière périodique par des prélèvement des spectres de vibration, indicateur utilisé pour la détection des chocs dans les machines tournantes, tels que les chocs dans les roulements, dans les engrenages, jeu de desserrage,... etc. L'analyse spectrale du moto-ventilateur se limite à deux bandes de fréquences [0- 200Hz] et [0-1000Hz]. D'après les calculs cinématiques des principaux défauts potentiels qui peuvent survenir sur cette machine, tels que les défauts de roulements, qui possèdent des fréquences de résonances très élevées, on montre dans ce qui suit que les bandes de fréquences choisies par le service de maintenance de l'entreprise ne sont pas appropriés pour une bonne surveillance du moto-ventilateur MK 17.

Durant notre stage de fin d'étude, qui a duré 30 jours dans l'unité de nitrate d'ammonium de l'entreprise FERTIAL, nous avons constaté que le moto-ventilateur souffre d'un niveau de vibration très élevé. En concertation avec notre encadreur, nous avons décidé de lancer une campagne d'essais pour établir un diagnostic concernant les causes potentiels qui provoquent cette augmentation du niveau de vibration dans le moto-ventilateur MK 17.

#### II.2. Description de l'équipement

Le Moto-ventilateur MK 17 est composé d'un ventilateur à double rangé de pales K-17 entraîné par un moteur asynchrone triphasé M-17.

Le ventilateur K-17 est le plus volumineux de l'unité de nitrate d'ammonium, il déplace 840.000 kg/h de gaz. Pour cela, Il est entraîné par un moteur M-17 de puissance 1200 KW aligné à celui-ci par un accouplement.

Le ventilateur joue un rôle primordial au sein de l'unité puisqu'il extrait l'air de la tour de prill, créant ainsi un mouvement de l'air à contre flux de la chute de nitrate d'ammonium nécessaire à la cristallisation du produit. Ensuite, il permet la circulation de l'air a travers des deux laveurs de l'unité.



(a)



(b)



(c)

Fig. II.1 : a) Moto-ventilateur MK 17, b) moteur M-17 et c) Ventilateur K-17

II.3. Schéma cinématique

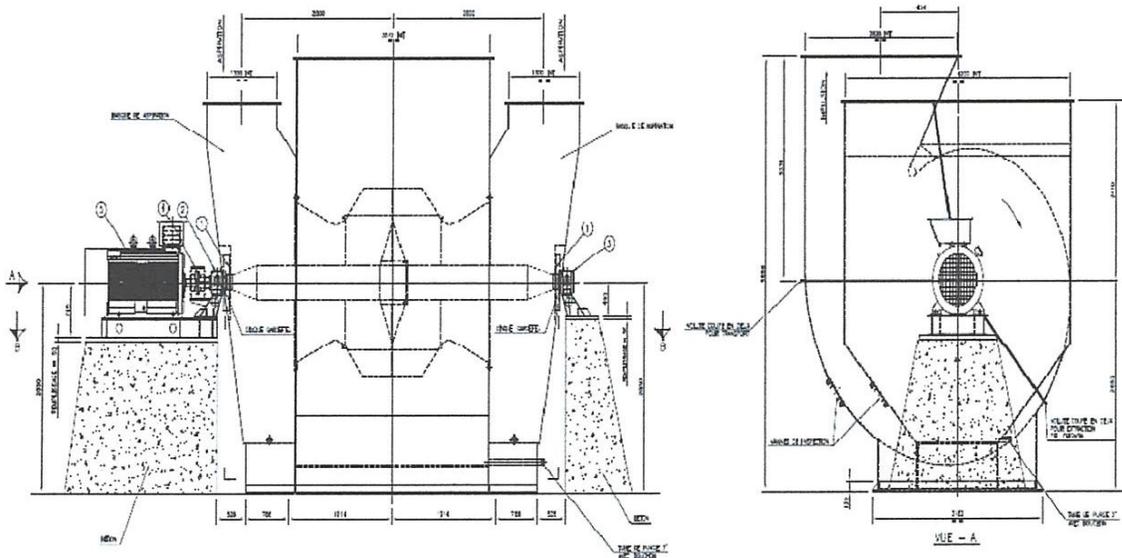


Fig. II.2 : Schéma cinématique du moto-ventilateur MK 17

Avec : 1- fermeture

2- support fixe (lubrification par graisse)

3- support libre (lubrification par graisse)

4- accouplement

5- moteur asynchrone (M-17)

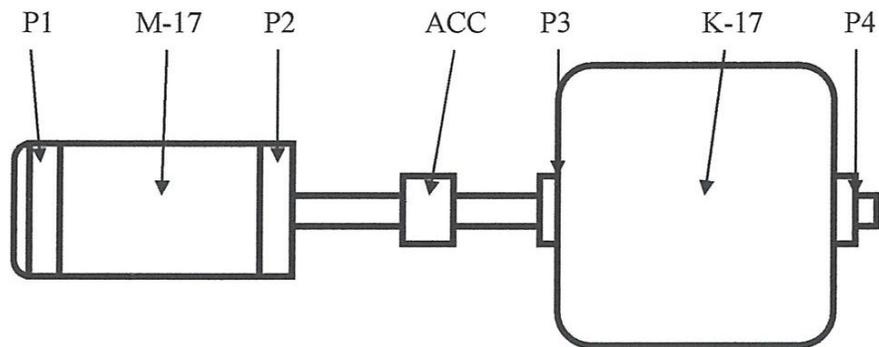


Fig. II.3: Schéma représentatif des points de mesures sur le MK 17

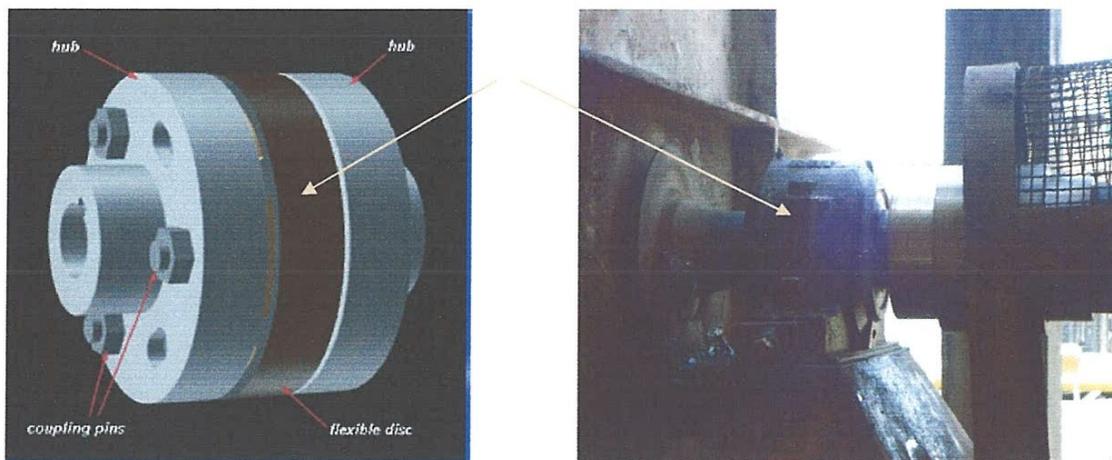


Fig. II.4 : Photo de l'accouplement

### II.3.1. Caractéristiques du moteur M-17

Les caractéristiques du moteur asynchrone M-17 sont les suivantes :

Tableau II.1 : Caractéristiques du moteur asynchrone M-17

Type moteur	1LA4 504-6CN90-Z
Puissance (KW)	1200
Vitesse de rotation (tr/min)	1000
Type palier	Roulement

Roulement coté accouplement	roulement rouleaux cylindrique
Roulement coté arrière	roulement rigide à billes
Type huile	lubrification par graisse
Nombre de pair de pole	1
Fréquence d'alimentation	50 Hz
COS $\phi$	0.87
Courant In (A)	148
tension Un (v)	5500

### II.3.2. Caractéristiques du ventilateur K-17

Les caractéristiques du ventilateur K-17 sont les suivantes :

**Tableau II.2 : Caractéristiques du ventilateur K-17**

Type huile	lubrification par graisse
Vitesse de rotation (tr/min)	1000
Type palier	Roulement
Roulement coté accouplement	roulement à rotule sur rouleaux
Roulement coté arrière	roulement à rotule sur rouleaux
Nombre de rangé de pale	2
Nombre de pale	10
Fluides à véhiculer	Air atmosphérique

### II.3.3. Principaux défauts mécaniques et électriques dans le moteur M-17

Les 3 enroulements statoriques alimentés par un réseau triphasé équilibré créent dans l'entrefer un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation de synchronisme  $n_s$ . Les conducteurs du rotor sont soumis à ce champ tournant. Ils sont alors traversés par des courants de Foucault induits. D'après la loi de Lenz (" les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur donnent naissance "), les enroulements du rotor étant en court-circuit, la circulation des courants est alors possible. Les forces de Laplace qui en résultent exercent des moments sur le rotor. Le rotor tourne alors à la fréquence de rotation  $n_r$ .

De par son principe, la fréquence de rotation du rotor est inférieure à la fréquence de synchronisme  $n_s$  :  $n_r < n_s$ .

❖ **Le glissement :**

On appelle glissement d'un moteur asynchrone triphasé le rapport de vitesse de glissement à la vitesse de synchronisme, on définit le glissement par la formule suivante :

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

$n_s$  : fréquence d'alimentation

$$n_s = \frac{f}{p}$$

Avec :  $f$  : fréquence du réseau en Hz

$p$  : nombre de paires de pôles

$n_s$  : fréquence d'alimentation en Hz.

$n_r$  : fréquence de rotation en Hz

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et horizontales.

Au même titre que les courants, les vibrations de la machine fournissent des informations pratiquement sur tous les défauts mécaniques fréquemment rencontrés. Plutôt que de disposer d'une étude au cas par cas, nous avons réalisé une synthèse de l'ensemble des informations que peuvent fournir ces signaux en fonction des défauts, à partir des références [13], qui présentent les signatures vibratoires qui seraient caractéristiques des défauts. Ces défauts sont résumés dans le tableau II.3.

**Tableau II.3 : Analyses vibratoires, signatures fréquentielles**

Type de défaut	Analyse vibratoire
Rupture de barres Rupture de portions d'anneaux	$f_r \pm 2 \cdot g \cdot f_s$
Excentricité Statique	$2 \cdot f_s$ ou des composantes à $k \cdot f_r \pm f_s$
Excentricité Dynamique	$f_r \pm 2 \cdot g \cdot f_s$ ou $f_r$

Défaillance du roulement	$\text{BPFO} = \frac{z}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$ $\text{BPFI} = \frac{z}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$ $\text{BPF} = \frac{D}{d} f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha\right)^2\right]$ $f_c = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$
--------------------------	---

Avec :  $f_r$  : fréquence de rotation

$f_s$  : fréquence du courant statorique

BPFO : fréquence d'un défaut localisé sur la bague externe du roulement

BPFI : fréquence d'un défaut localisé sur la bague intérieure du roulement

BPF : fréquence d'un défaut localisé sur un élément roulant du roulement

$f_c$  : fréquence d'un défaut de cage du roulement.

### II.3.4. Calcul cinématique

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

#### Palier 1 du moteur M-17 : Roulement SKF 632:

- fréquence de rotation du moteur :  $f_r = 16.56 \text{ Hz}$

- diamètre extérieur du roulement :  $D_{\text{ext.}} = 260 \text{ mm}$

- diamètre intérieur du roulement :  $D_{\text{int.}} = 120 \text{ mm}$

- diamètre moyen :  $D = \frac{D_{\text{ext.}} + D_{\text{int.}}}{2} = 190 \text{ mm}$

- diamètre d'éléments roulants :  $d = 41.27 \text{ mm}$

- nombre d'éléments roulants :  $z = 8$

Fréquence défaut bague intérieure :  $\text{BPFI} = 81.15 \text{ Hz}$

Fréquence défaut bague extérieur : BPFO = 52.19 Hz

Fréquence défaut d'élément roulants : BPF = 73.11Hz



**Fig. II.5 : Palier 01 du MK 17**

**Palier 2 du moteur M-17 : Roulement SKF NU324E**

- diamètre extérieur du roulement :  $D_{\text{ext}} = 260 \text{ mm}$
- diamètre intérieur du roulement :  $D_{\text{int}} = 120 \text{ mm}$
- diamètre moyen :  $D = 190 \text{ mm}$
- diamètre d'élément roulants :  $d = 38 \text{ mm}$
- nombre d'élément roulants :  $z = 13$
- fréquence défaut bague intérieure : BRFI = 129.77 Hz
- fréquence défaut bague extérieure : BRFO = 86.89 Hz
- fréquence défaut d'élément roulants : BRF = 80.91 Hz



**Fig. II.6: Palier 2 du M-17**

**Palier 3 et 4 du ventilateur K-17 : Roulements SKF 22230CC**

- diamètre extérieur du roulement :  $D_{\text{ext}} = 270 \text{ mm}$
- diamètre intérieur du roulement :  $D_{\text{int}} = 150 \text{ mm}$
- diamètre moyen :  $D = 210 \text{ mm}$
- diamètre d'éléments roulants :  $d = 30 \text{ mm}$
- nombre d'éléments roulants :  $z = 19$
- fréquence défaut bague intérieure :  $\text{BPFI} = 180.43 \text{ Hz}$
- fréquence défaut bague extérieure :  $\text{BPFO} = 136.24 \text{ Hz}$
- fréquence défaut d'éléments roulants :  $\text{BPF} = 115.43 \text{ Hz}$

**Fig. II.7 : Palier 3 du K-17****Fig. II.8 : Palier 4 du K-17****II.4 .Partie expérimental**

Des mesures de vibrations de vitesse et de déplacement ont été prises sur les quatre paliers du moto-ventilateur dans les trois directions axiale, horizontale et verticale et cela pour deux bandes de fréquences [0-200Hz] et [0-1000Hz].

**II.4.1. Analyse des spectres de vitesse mesurés dans la bande [0-1000HZ]**

Les spectres des deux paliers du moteur M-17, A1, H1, V1, A2, H2, V2, montrent des niveaux de vibration très raisonnables, bien loin du niveau d'alarme (7 mm/s). Cependant, on note un désalignement résiduel sur les paliers 1 et 2 dans la direction axiale (A1 et A2).

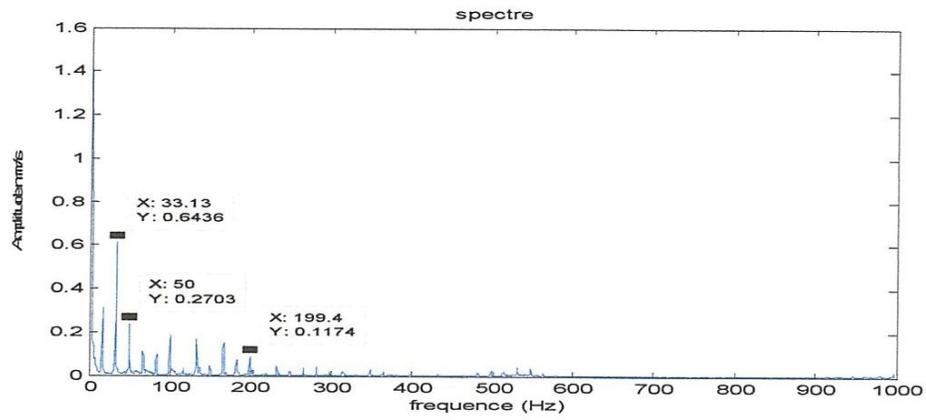


Fig. II.9 : Spectre de vitesse du palier 1, du M-17, direction axiale A1

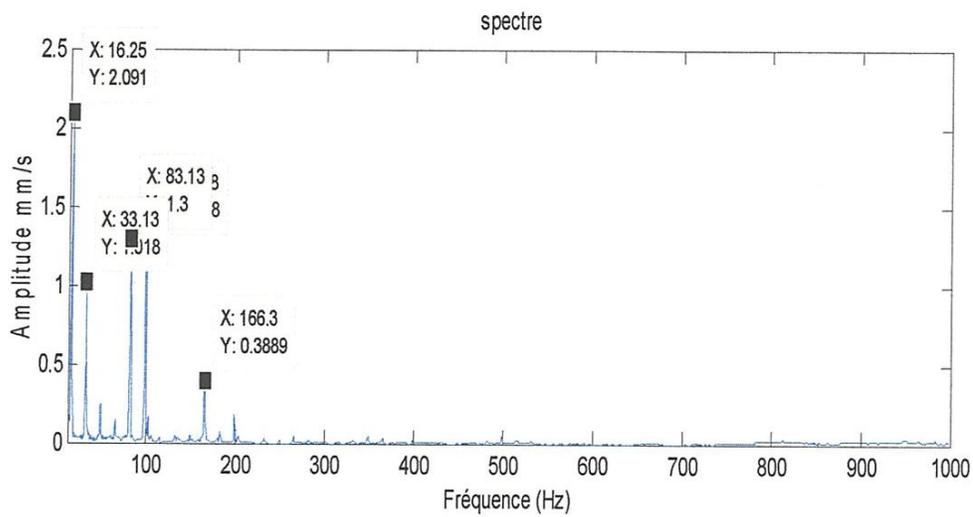


Fig. II.10 : Spectre de vitesse du palier 1, du M-17, direction horizontale H1

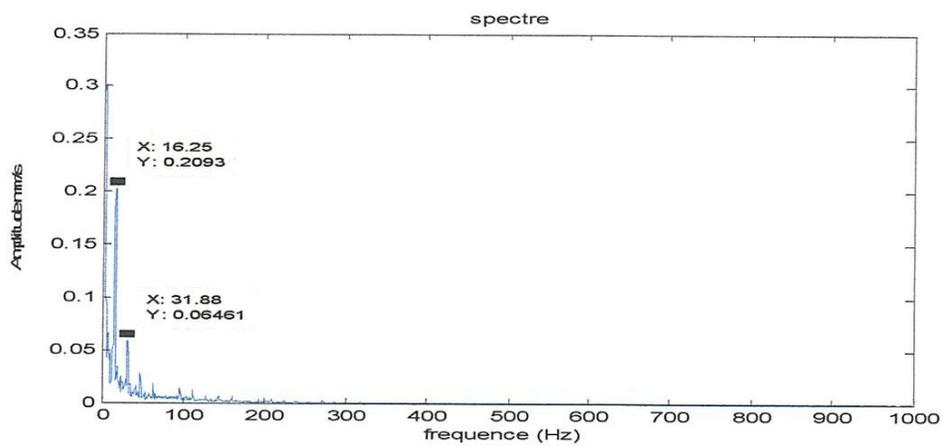


Fig. II.11 : Spectre de vitesse du palier 1, du M-17, direction verticale V1

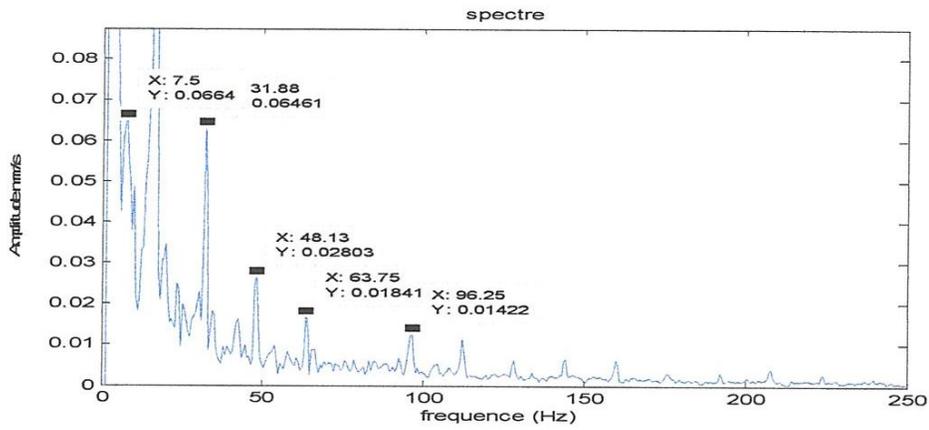


Fig. II.12 : Zoom du spectre de vitesse du palier 1 ,du M-17, direction verticale V1

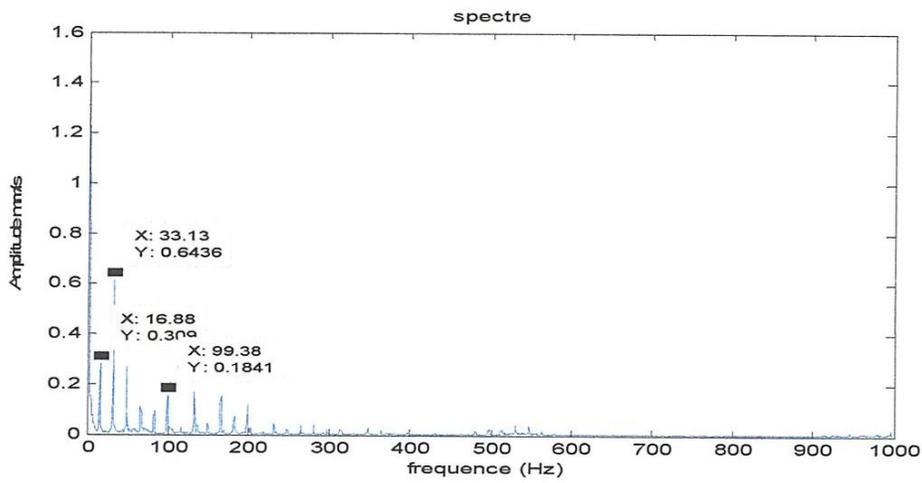


Fig. II.13 : Spectre de vitesse du palier 2, du M- 17, direction axiale A2

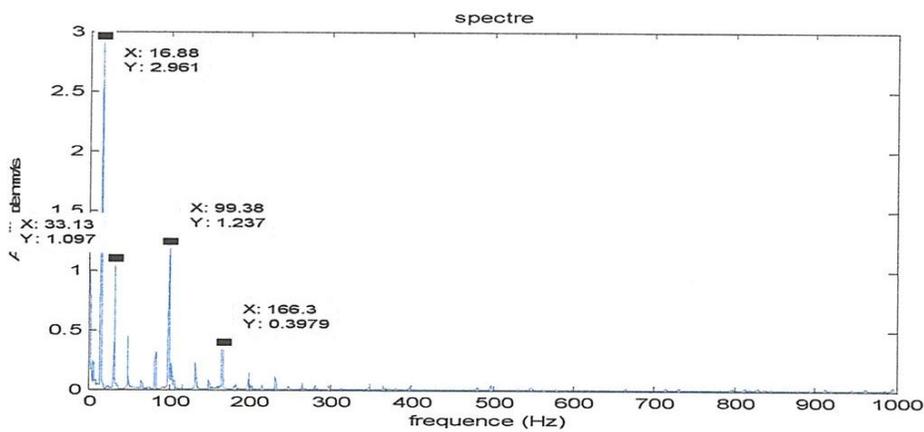


Fig. II.14 : Spectre de vitesse du palier 2, du M-17, direction horizontale H2

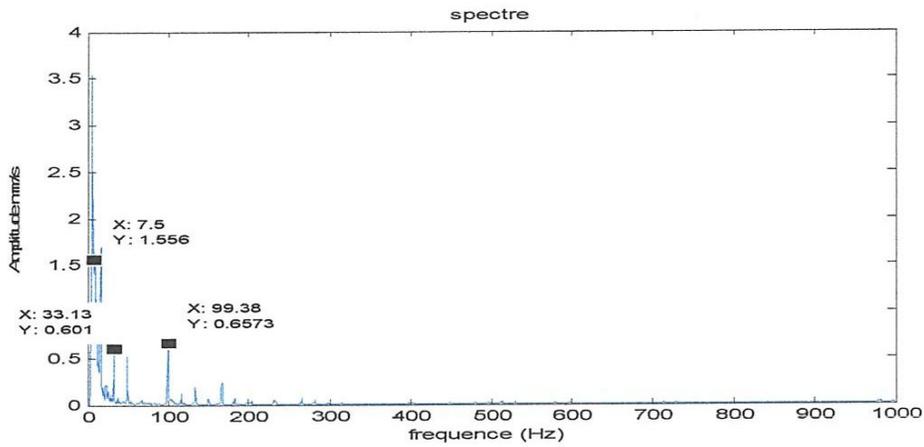


Fig. II.17 : Spectre de vitesse du palier 3, du K 17, direction horizontale H3

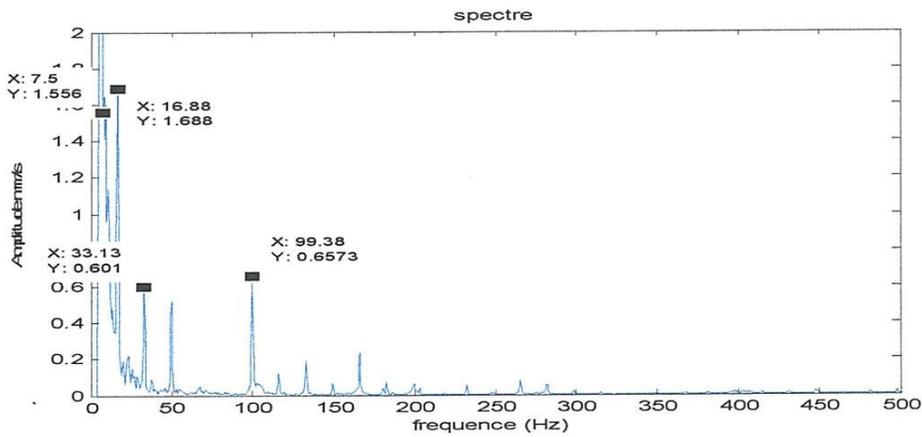


Fig. II.18 : Zoom spectre de vitesse du palier 3, du K-17, direction horizontale H3

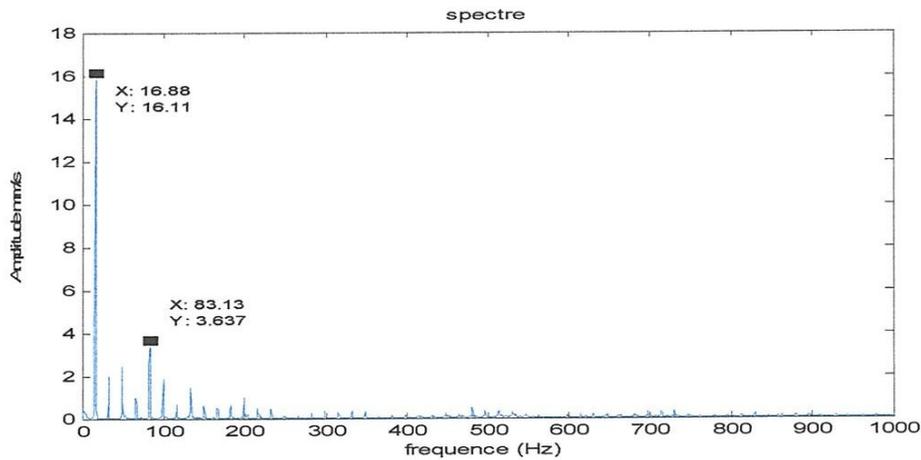


Fig. II.19 : Spectre de vitesse du palier 3, du K-17, direction verticale V3

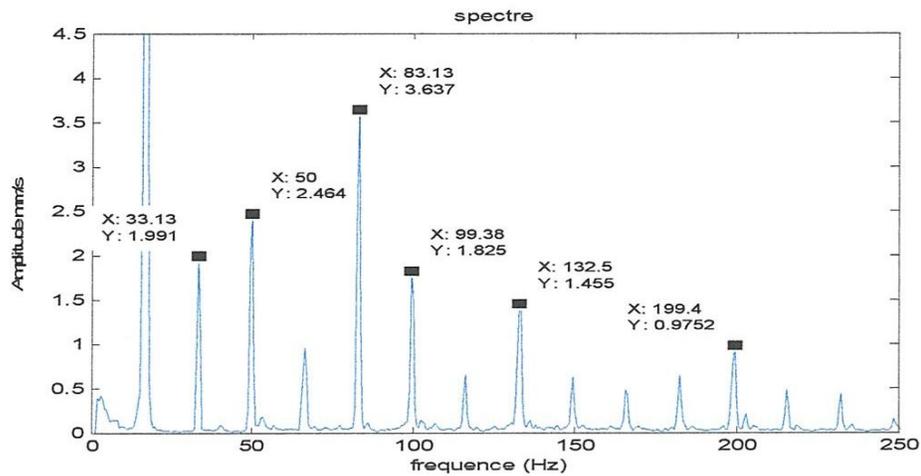


Fig. II.20 : Zoom du spectre de vitesse palier 3, du M-17, direction verticale V3

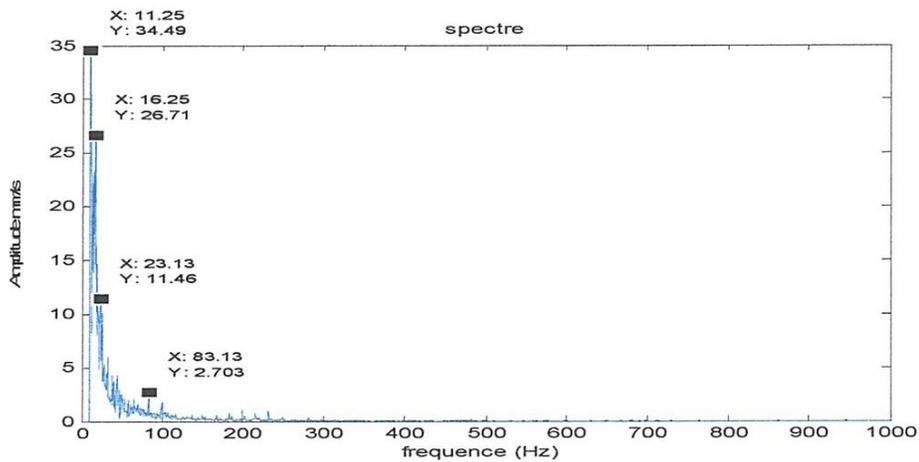


Fig. II.21 : Spectre de vitesse du palier 4, du K-17, direction axial A4

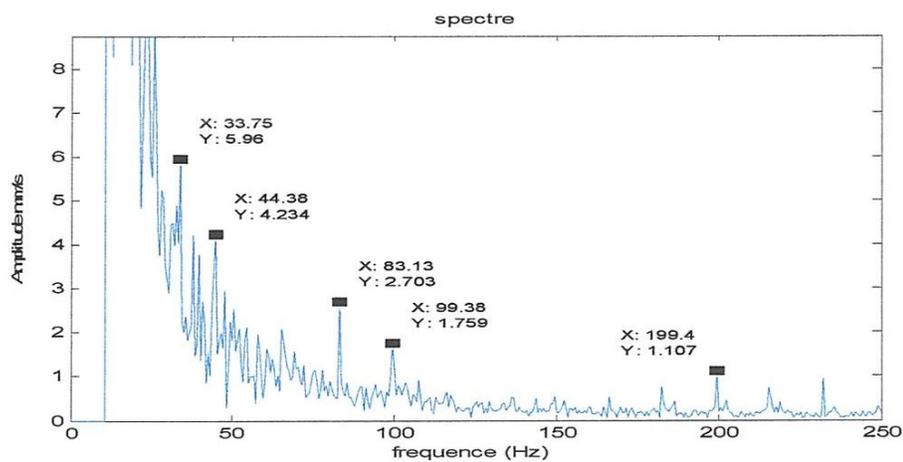


Fig. II.22 : Zoom du spectre de vitesse du palier 4, du K-17, direction axial A4

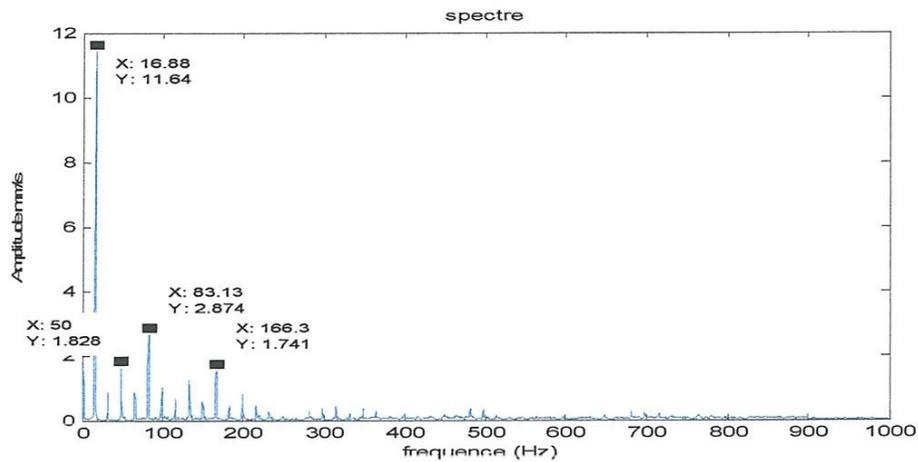


Fig. II.23 : Spectre de vitesse du palier 4, du K-17, direction axial H4

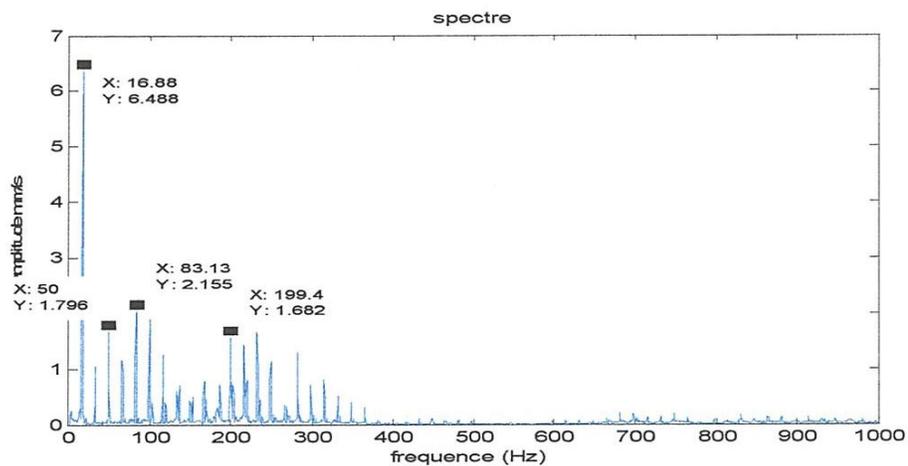


Fig. II.24 : Spectre de vitesse du palier 4, du K-17, direction verticale V4

#### II.4.2. Analyse des spectres de déplacements mesurés dans la bande [0-200HZ]

L'analyse des spectres de déplacements mesurés dans cette bande de fréquences dans les trois directions des paliers du moto-ventilateur MK 17, ne révèlent aucune anomalie, le niveau de déplacement reste raisonnable même sur le pic de RPM.

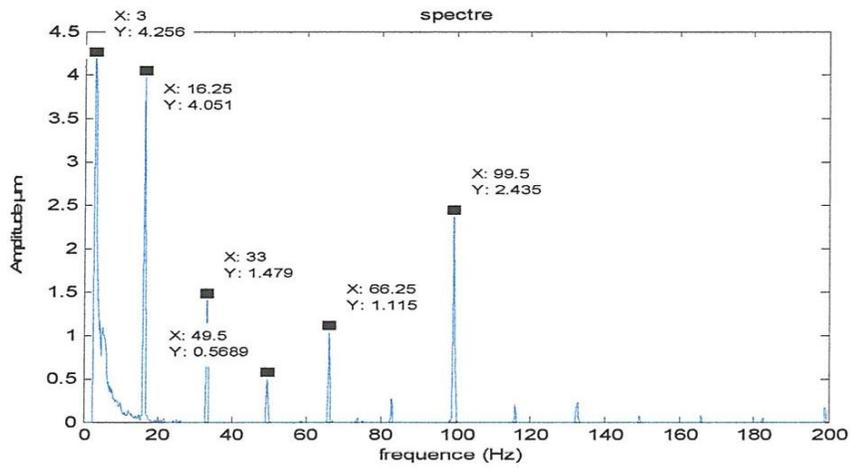


Fig. II.25 : Spectre de déplacement du palier 1, du M-17, direction axial A1

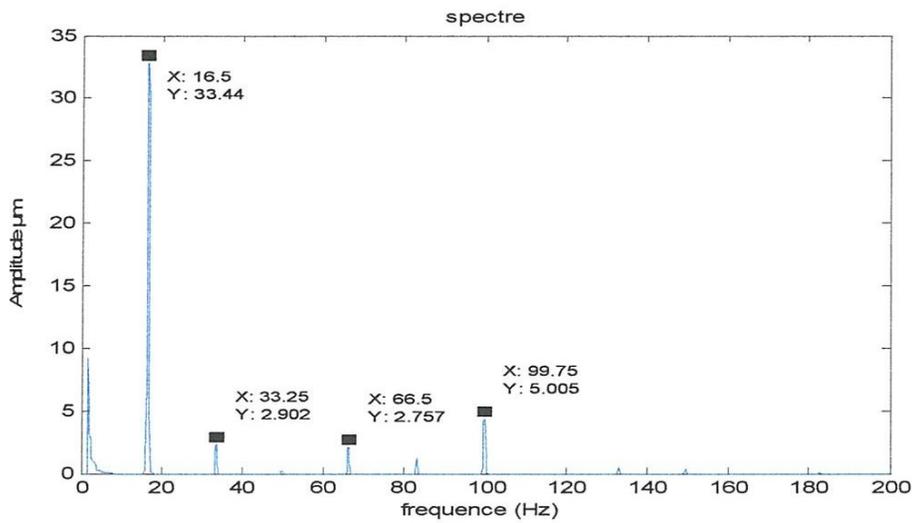


Fig. II.26 : Spectre de déplacement du palier 1, du M-17, direction horizontale H1

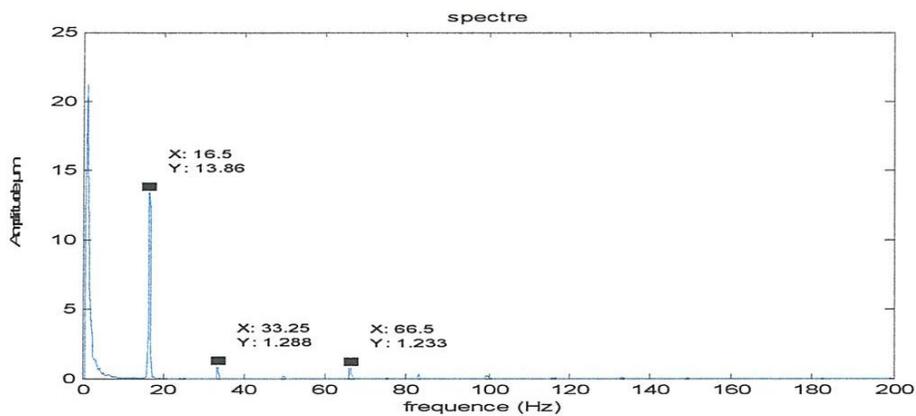


Fig. II.27 : Spectre de déplacement du palier 1, du M-17, direction verticale V1

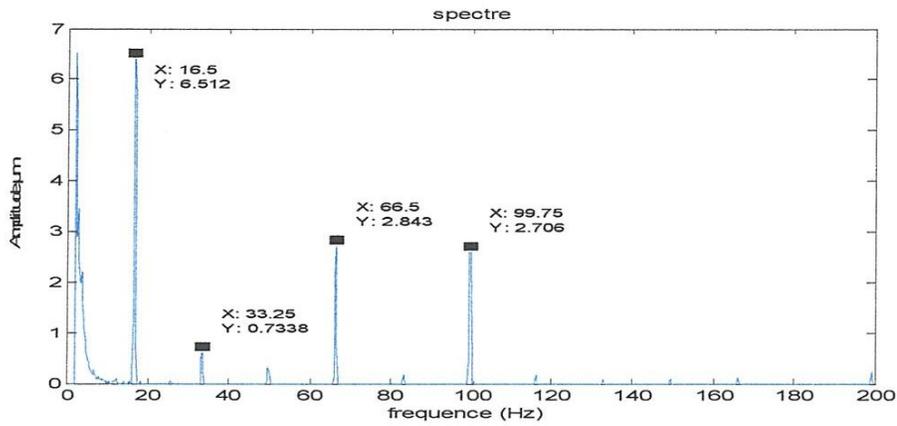


Fig. II.28 : Spectre de déplacement du palier 2, du M-17, direction axiale A2

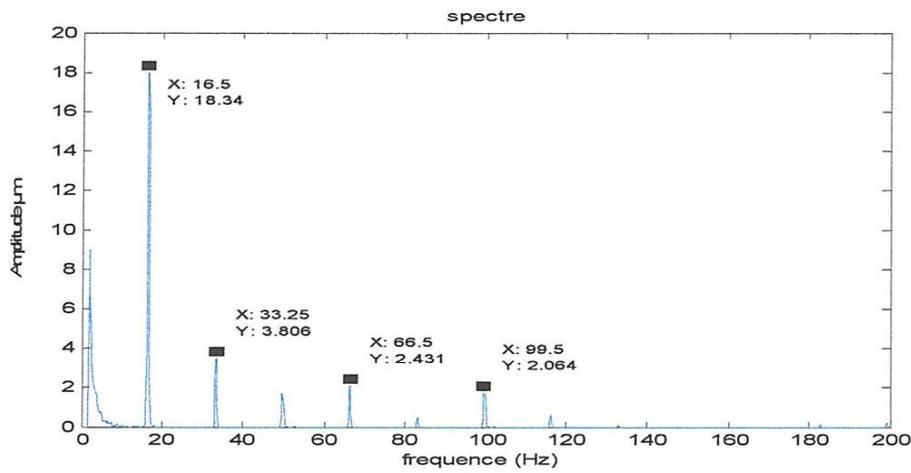


Fig. II.29 : Spectre de déplacement du palier 2, du M-17, direction horizontale H2

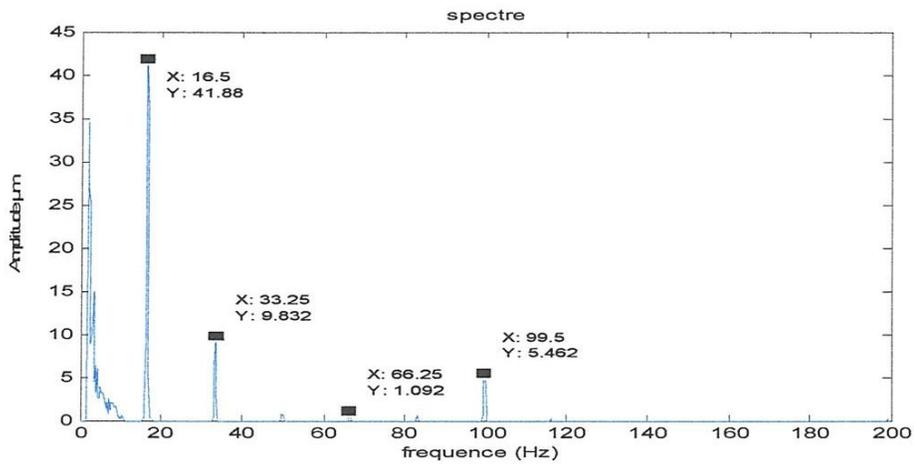


Fig. II.30 : Spectre de déplacement du palier 2, du M-17, direction verticale V2

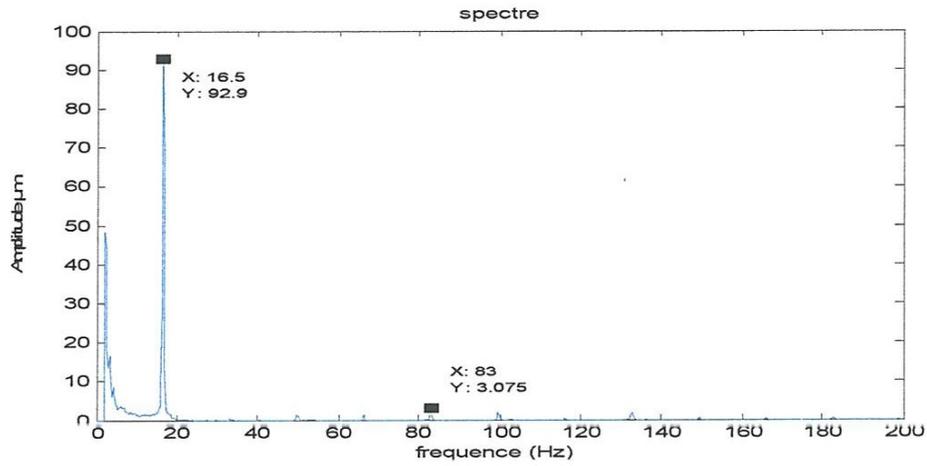


Fig. II.31 : Spectre de déplacement du palier 3, du K-17, direction axiale A3

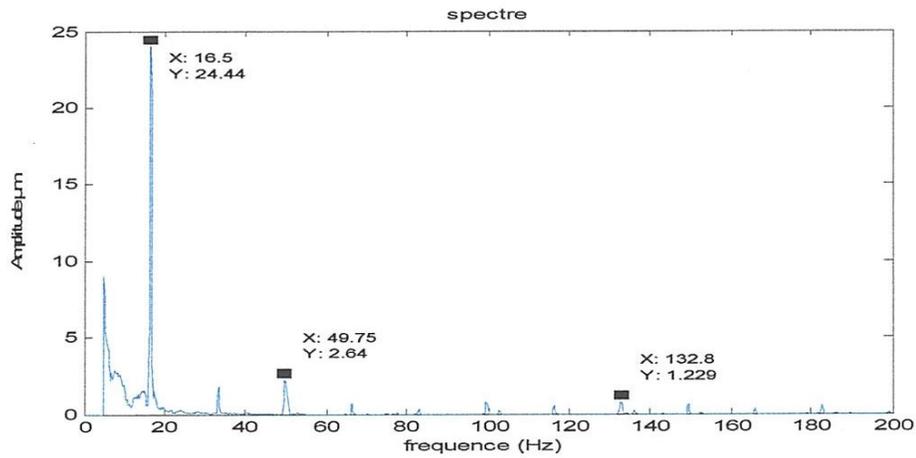


Fig. II.32 : Spectre de déplacement du palier 3, du K-17, direction horizontale H3

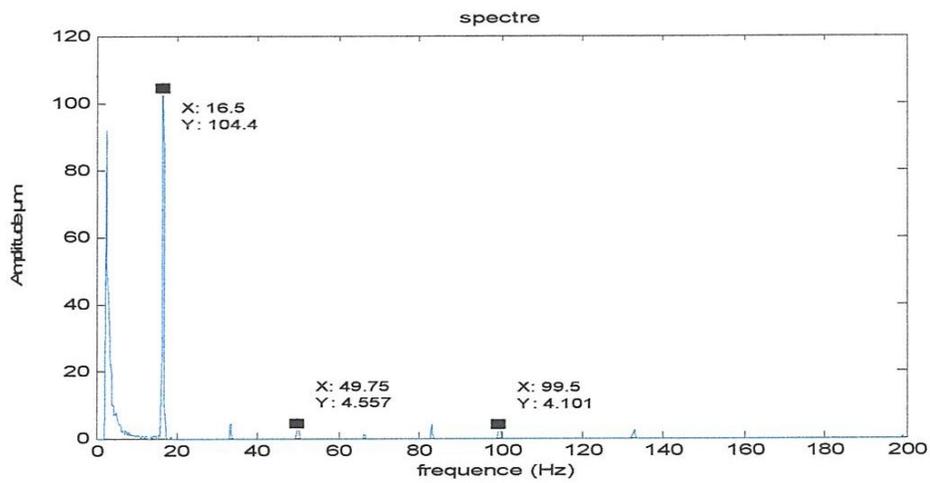


Fig. II.33 : Spectre de déplacement du palier 3, du K-17, direction verticale V3

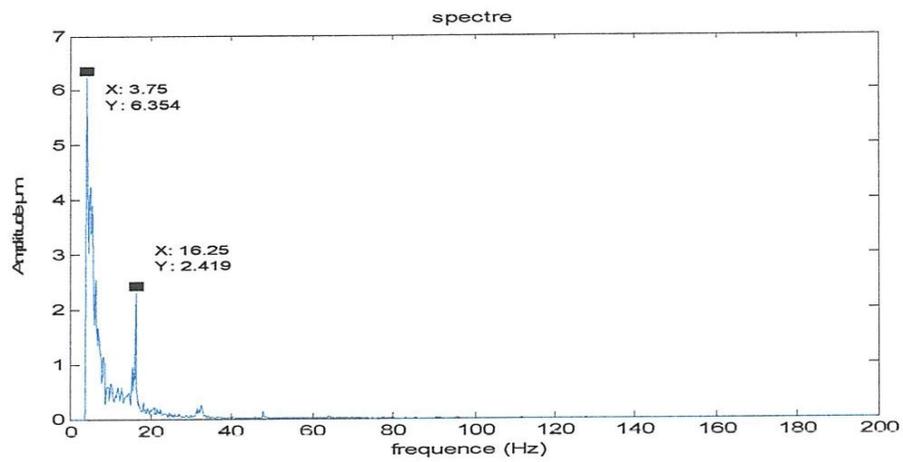


Fig. II.34 : Spectre de déplacement du palier 4, du K-17, direction axiale A4

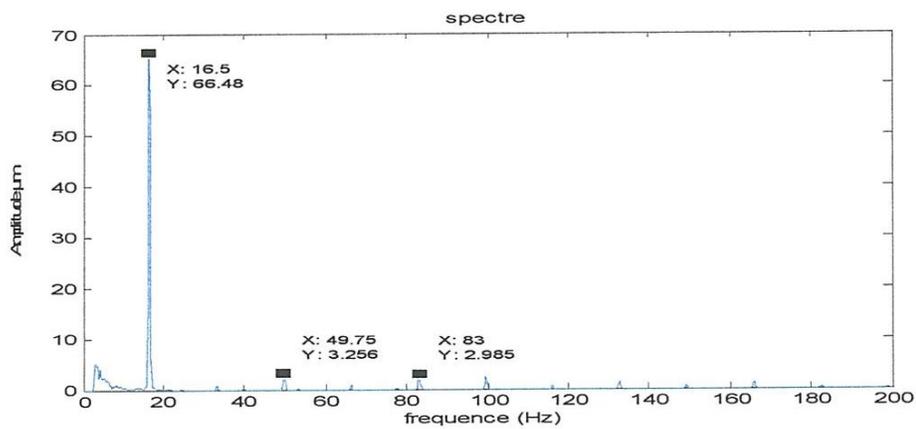


Fig. II.35 : Spectre de déplacement du palier 4, du K-17, direction horizontale H4

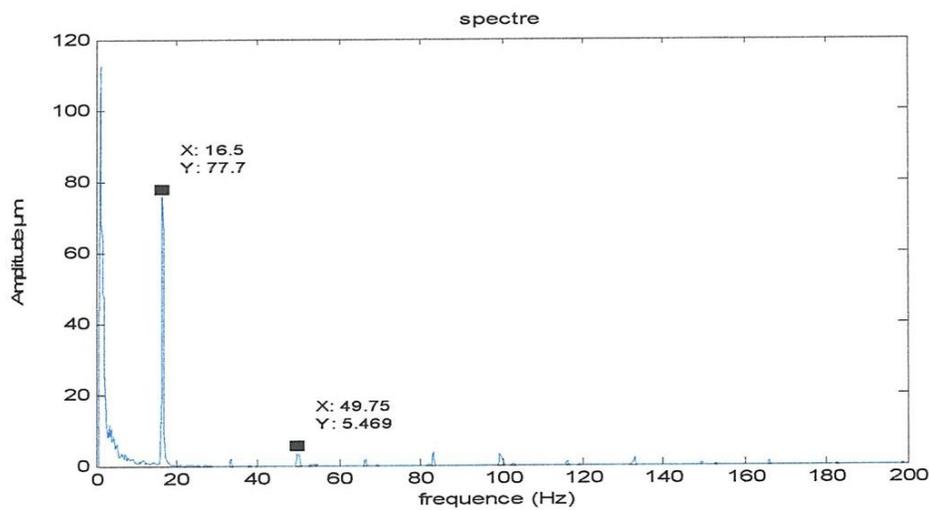


Fig. II.36 : Spectre de déplacement du palier 4, du K-17, direction verticale V4

**II.5 Conclusion**

L'analyse des spectres mesurés dans la bande de fréquences [0-1000Hz], montre clairement l'augmentation des amplitudes des harmoniques de la fréquence de rotation des paliers 1 et 2 du moteur M-17, par rapport à l'amplitude de RPM, donc présence de désalignement sur les paliers 1 et 2 dans la direction axiale. Les niveaux des vibrations élevés sur le pic de la fréquence de rotation sur les paliers 3 et 4 du ventilateur, dépassent le niveau d'alarme et le niveau de danger. Ces résultats montrent l'existence d'un important balourd dans le rotor du ventilateur K-17.

A decorative frame consisting of a thick blue oval border with four ornate floral motifs at the corners. Each motif features a green vine with yellow and red flowers. The text is centered within this frame.

# Chapitre III

Détection des défauts de roulement dans un moteur

asynchrone par analyse vibratoire

## **Chapitre III**

### **Détection des défauts de roulement dans un moteur asynchrone par analyse vibratoire**

#### **III.1.Introduction**

La surveillance vibratoire des machines est une des techniques qui se propage progressivement en industrie. Les vibrations d'une machine reflètent une image de leurs efforts internes. La capture des signatures vibratoires permet d'extraire des informations aidant à une surveillance de l'état de santé des machines. En cas de défaillance, l'analyse et l'interprétation des signaux permettent d'établir un diagnostic. Dans le cas des défauts naissants, les signaux vibratoires acquis doivent faire l'objet d'un traitement approprié, sans perte de l'information.

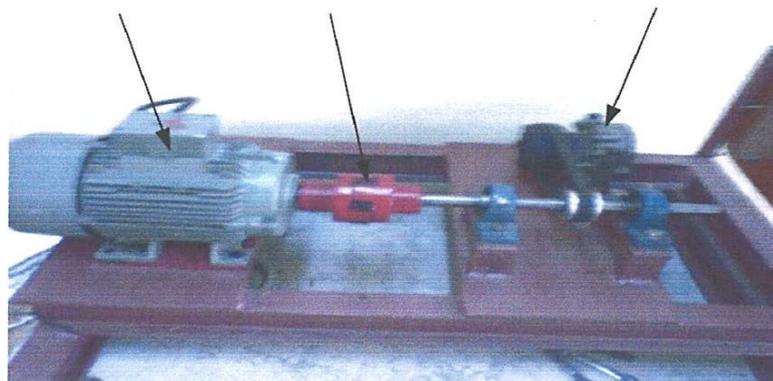
#### **III.2. Plan expérimentale et matériel utilisé**

Ce chapitre est consacré à la présentation du dispositif conçu par le laboratoire de mécanique et structures permettant la réalisation d'un plan d'expérience contenant des simulations pratique des défauts de roulements dans les moteurs asynchrone. Ce plan d'expérience est réalisé pour différentes vitesses de rotations et différentes bandes de fréquentielles.

##### **III.2.1 Banc d'essais et matériel de mesure**

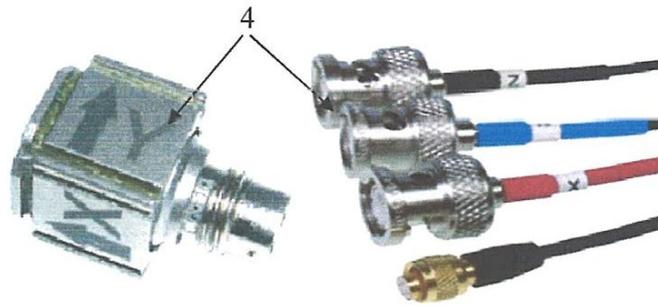
Le banc d'essais permet de simuler plusieurs défaillances sur le moteur asynchrone tels que les cassures de barres rotoriques, les défauts dans les roulements qui portent l'arbre moteur et autres. Ce banc d'essais est d'une conception très simple permettant le montage et le démontage rapide des rotors à testés. Les mesures ont été collectées sur le palier par un accéléromètre triaxial. Il est essentiellement composé d'un moteur asynchrone, un accouplement élastique, une transmission par courroie et un frein électromagnétique pour provoquer des charges sur le système mécanique, (voir Figure III.1):

- 1) Moteur asynchrone      3) Accouplement élastique      2) Frein électromagnétique

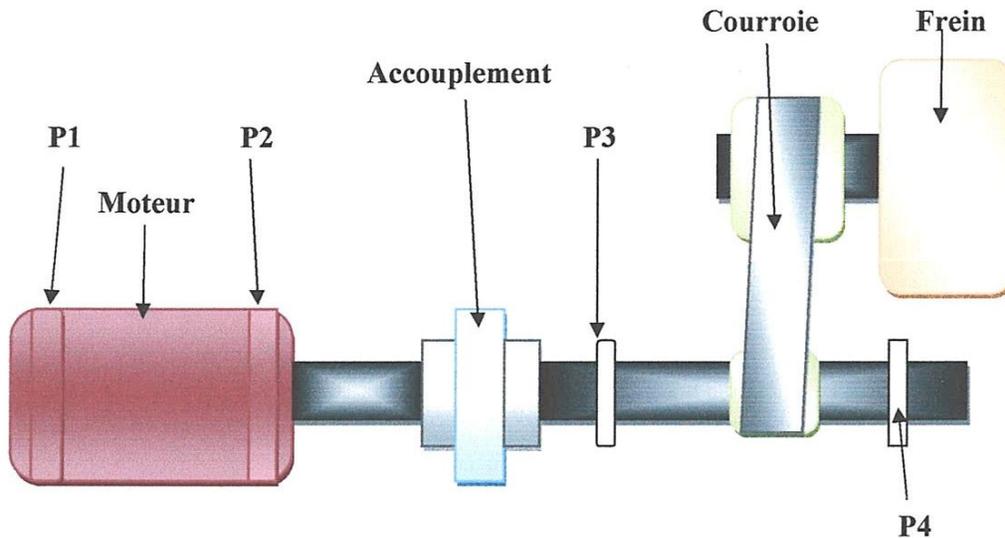


**Fig. III.1 : Banc d'essai**

1. Moteur asynchrone à cage
2. Frein électromagnétique
3. Accouplement élastique
4. Un accéléromètre triaxial piézo-électrique de type «4524-B-001» (Figure III.2), dont la fixation se fait par la cire d'abeilles sur les paliers de roulements.



**Fig. III.2 : Accéléromètre triaxial**

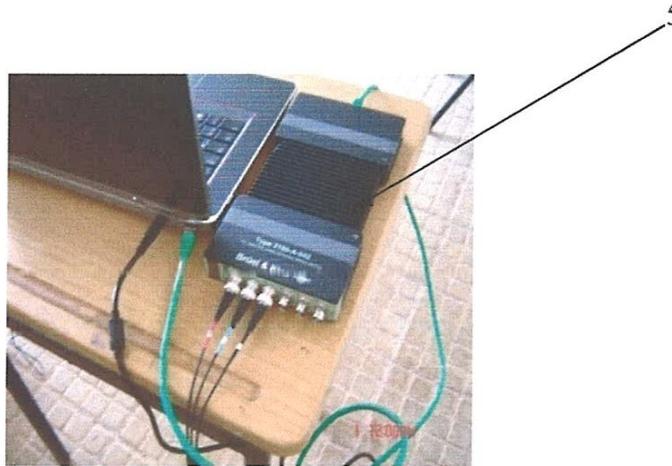


**Fig. III.3 : Schéma cinématique**

5. multi-analyses de PULSE, type (3160-A-042) qui permet d'analyser et d'enregistrer en temps réel le bruit et les vibrations.

L'analyseur PULSE multi-analyses permet d'effectuer des mesures FFT, 1/n d'octave (CPB), analyse d'ordre,...etc. et de faire un certaines analyses telles que l'analyse cepstrale l'analyse d'enveloppe, ...etc. Avec le PC et l'analyseur PULSE, on peut en toute liberté effectué des mesures sur le terrain et de traiter les données où on le veut. Le PULSE fait du PC un analyseur,

en misant sur la rapidité de développement, toujours croissante, des performances du processeur PC pour le traitement du signal en temps réel.



**Fig. III.4 : Multi-analyses de PULSE**

La flexibilité du PULSE, associée aux solutions spécifiques pour l'industrie, font de la plateforme d'analyse PULSE de Brüel & Kjaer, un best-seller. Le système PULSE est un leader dans un grand nombre de domaines industriels :

- L'Automobile
- L'électroacoustique et des télécommunications
- L'Aéronautique, le Spatial et la Défence
- Les Produits de consommation.

#### **III.2.2 Caractéristiques du moteur asynchrone:**

La machine asynchrone à cage d'écureuil utilisée pour les différents essais expérimentaux est une machine de 1,5KW accouplée à une charge (frein électromagnétique). Nous présentons à la Figure III.5 et III.6 respectivement le rotor sain et le roulement avec défaut.



Fig. III.5 : Défauts sur la bague extérieure



Fig. III.6: Rotor sain.

Tableau III.1 : Caractéristiques du moteur étudié (moteur asynchrone)

Type moteur	Moteur asynchrone a cage
Puissance (KW)	1.5
Vitesse de rotation (tr/min)	1420
Type de palier	Roulement
Roulement coté accouplement	roulement rigide à billes
Roulement coté arrière	roulement rigide à billes
Type huile	lubrification par graisse
Nombre de pair de pole	2
Fréquence d'alimentation	50 Hz
COSφ	0.78
Courant In (A)	3.75
tension Un (v)	380

### III.2.2.1 Caractéristique géométrique des roulements

Palier 01 roulement 6004 C3 (roulement rigide à bille) :

- diamètre extérieur du roulement :  $D_{ext} = 35\text{mm}$

- diamètre intérieur du roulement :  $D_{int} = 17\text{mm}$

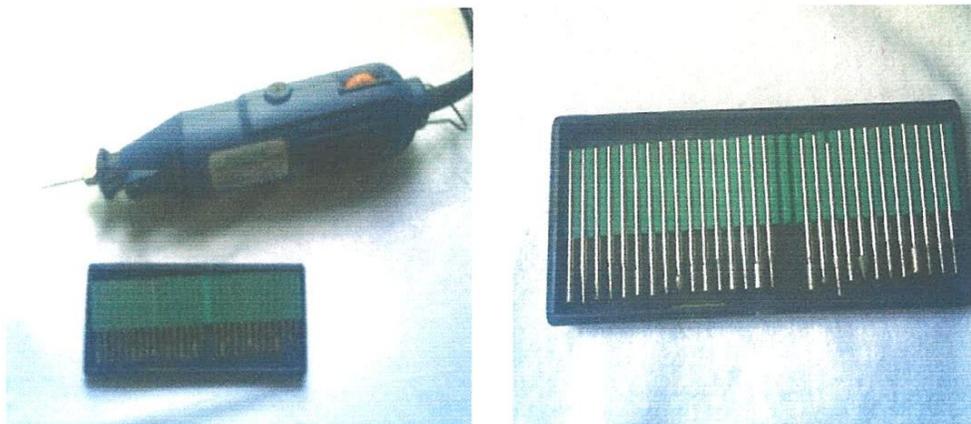
- diamètre moyen du roulement :  $D = 26\text{mm}$
- diamètre d'élément roulants :  $d = 4.76\text{mm}$
- nombre d'élément roulants :  $z = 10$
- nombre de rangées  $\text{nbr} = 1$

**Palier 02 roulement 6205 C3 (roulement rigide à billes) :**

- diamètre extérieur du roulement :  $D_{\text{ext}} = 52\text{mm}$
- diamètre intérieur du roulement :  $D_{\text{int}} = 25\text{mm}$
- diamètre moyen du roulement :  $D = 38,5\text{mm}$
- diamètre d'élément roulants :  $d = 7.94\text{mm}$
- nombre d'élément roulants :  $z = 9$
- nombre de rangées  $\text{nbr} = 1$

### III.2.2.2 Technique de création des défauts

Afin de cerner la majorité des défauts de roulements qui induisent des chocs, différentes gravités ont été réalisées sur la bague extérieure du roulement du palier 02 type 6205 C3. Les défauts ont été provoqués sur la largeur du roulement (chemin de roulement) par des outils en diamant tournant à très grande vitesse pouvant atteindre 50000 tr/min. L'épaisseur très faible de certains outils permet d'accéder aux pistes extérieures sans abîmer la cage. La figure III.7 montre une photo du matériel utilisé pour la création des défauts.



**Figure III. 7: Matériel utilisé pour la création des défauts**

**III.2.2.3 Calcule cinématique**

**Palier 1**

**Tableau III.2 : Les fréquences des défauts du roulement du palier 1**

La fréquence de courant	La fréquence de rotation	Les fréquences des défauts de roulement
F <sub>crt</sub> =25 HZ	F <sub>rot</sub> = F <sub>crt</sub> /2=12.5 HZ	Fréquence défaut bague intérieure : BPFI = 64.98 HZ Fréquence défaut bague extérieur : BPFO = 43.02 HZ Fréquence défaut d'élément roulant : BPF = 56.58 HZ
F <sub>crt</sub> =35 HZ	F <sub>rot</sub> = F <sub>crt</sub> /2=17.5 HZ	Fréquence défaut bague intérieure : BPFI = 92.17 HZ Fréquence défaut bague extérieur : BPFO = 60.83 HZ Fréquence défaut d'élément roulants : BPF = 79.51 HZ

**Palier 2**

**Tableau III. 3 : la fréquence des défauts de roulement du palier 2**

La fréquence de courant	La fréquence de rotation	Les fréquences des défauts de roulement
F <sub>crt</sub> =25 HZ	F <sub>rot</sub> = F <sub>crt</sub> /2=12.5 HZ	Fréquence défaut bague intérieure : BPFI = 65.05 HZ Fréquence défaut bague extérieur : BPFO = 42.94 HZ Fréquence défaut élément roulants : BPF = 52.12 HZ
F <sub>crt</sub> =35 HZ	F <sub>rot</sub> = F <sub>crt</sub> /2=17.5 HZ	Fréquence défaut bague intérieure : BPFI = 92.05 HZ Fréquence défaut bague extérieur : BPFO = 60.95 HZ Fréquence défaut élément roulants : BPF = 80.15 HZ

**III.2.3 Analyse des résultats**

**III.2.3.1 Moteur sain (sans défaut) :**

Sur les figures 8 à 11, sont présentés les signaux et les spectres de vibrations d'un moteur sain mesurés dans la bande de fréquence [0 – 400Hz], pour deux fréquences de rotation du moteur  $f_r=12.5\text{Hz}$  et  $f_r=17.5\text{Hz}$ .

**III.2.3.2 Spectres et signaux mesurés sans présence de défaut de roulement (12.5 Hz)**

Le spectre de la figure 9, montre l'apparition uniquement du pic de la fréquence de rotation à 12.5 Hz et ces harmoniques. On constate que les harmoniques ont des amplitudes supérieures à

celle de la fréquence de rotation, ce qui s'explique par la présence d'un désalignement. Une autre constatation sur le spectre c'est l'apparition des demi-harmoniques qui s'explique par la présence d'un défaut magnétique.

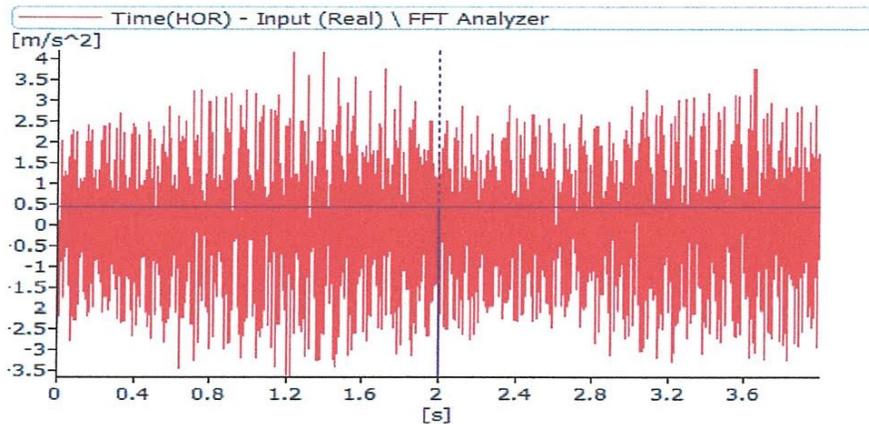


Fig. III.8: Signal sans défaut  $Fr=12.5$  Hz, Bande de fréquence [0-400Hz]

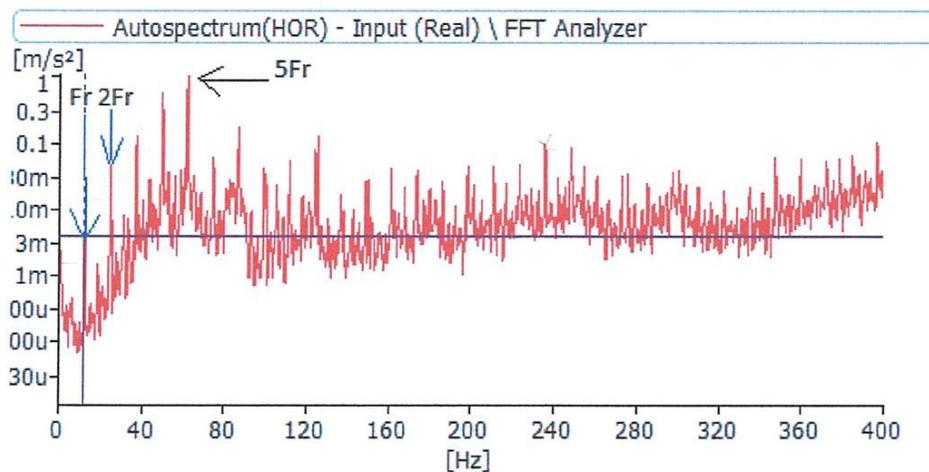


Fig. III.9: Spectre sans défaut pour  $Fr=12.5$  Hz, bande de fréquence [0-400 Hz]

### III.2.3.3 Spectres et signaux mesurés sans présence de défaut de roulement (17.5 Hz)

De la même façon, le spectre de la figure 11, montre l'apparition uniquement du pic de la fréquence de rotation à 17.5 Hz et ces harmoniques. On constate que les harmoniques ont des amplitudes supérieures à celle de la fréquence de rotation, ce qui s'explique par la présence d'un désalignement. Une autre constatation sur le spectre c'est l'apparition des demi-harmoniques qui s'explique par la présence d'un défaut magnétique.

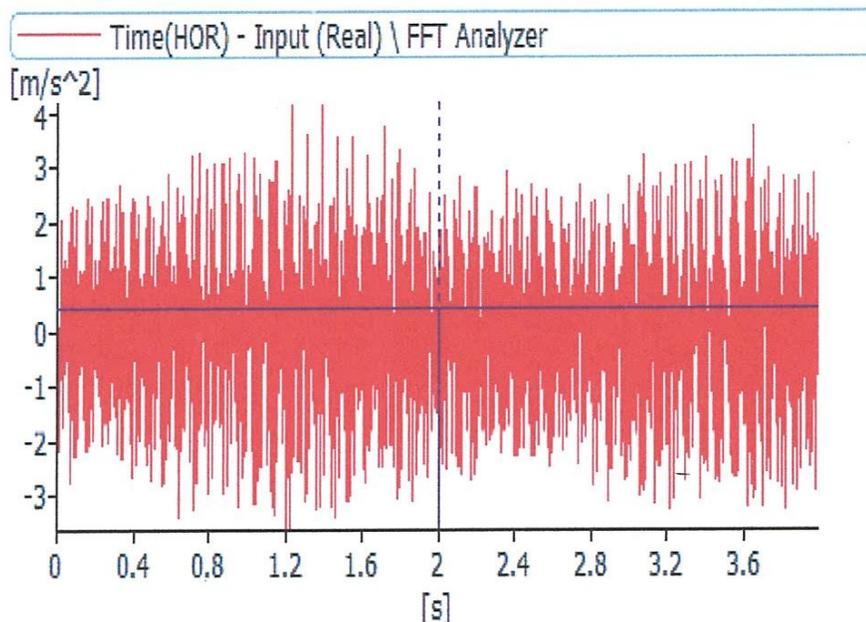


Fig. III.10: Signal sans défaut  $Fr = 17.5$  Hz, Bande  $[0-400Hz]$

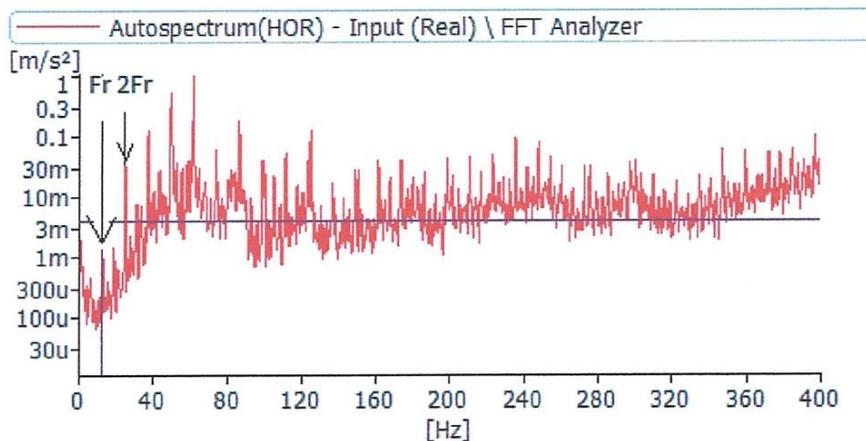


Fig. III.11: Spectre sans défaut  $Fr=17.5Hz$ , bande  $[0-400 Hz]$

#### III.2.3.4 Moteur défectueux

Sur les figures 12 à 32, sont présentés les signaux, les spectres et les cepstres des vibrations d'un moteur endommagé, mesurés dans quatre bandes de fréquences  $[0-400Hz]$  et  $[0-1600Hz]$ ,  $[0-12800 Hz]$  et  $[0-25600Hz]$ . Sur le roulement du moteur coté accouplement, on a provoqué volontairement un défaut sur la bague extérieure. Les mesures ont été prises pour deux vitesses de rotations 12.5 Hz et 17.5 Hz.

### III 2.3.5 Spectres, signaux et cepstres avec présence de défaut de roulement (12.5 Hz)

Pour la bande de fréquence [0:400Hz], basse fréquence, le signal de la figure 12, ne permet pas d'apparaître aucun choc dû au impact du défaut. Cependant, pour le spectre de la figure 13 et le cepstre de la figure 14, apparaît respectivement la présence du défaut sur la bague extérieure du roulement (BPFO=42.94 Hz) et la rhamonique.

Pour la bande de fréquence [0:1600Hz], moyenne fréquence, le signal de la figure 15, monte quelque impact des chocs du défaut, mais restent difficile à exploiter. Sur le spectre de la figure 16 et son zoom figure 17, apparaît le pic du défaut et son harmonique. Sur le cepstre de la figure 18 apparaît clairement la première et la deuxième rhamonique.

Pour les deux bandes de haut fréquence [0:12800Hz] et [0:25600Hz], figures 19 à 22, il est beaucoup plus facile d'utiliser le signal pour localiser la périodicité des chocs du défaut, qui apparaissent d'une manière très claire.

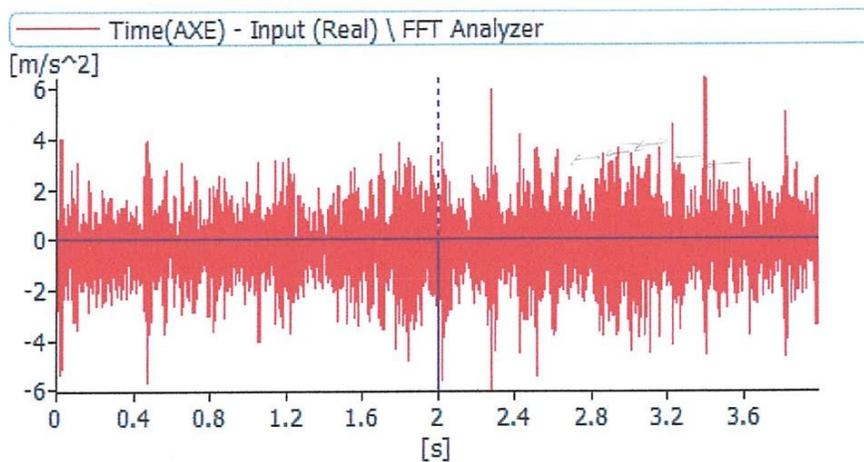


Fig. III. 12: Signal d'un défaut de BPFO pour  $F_r = 12.25$  Hz, Bande [0-400Hz]

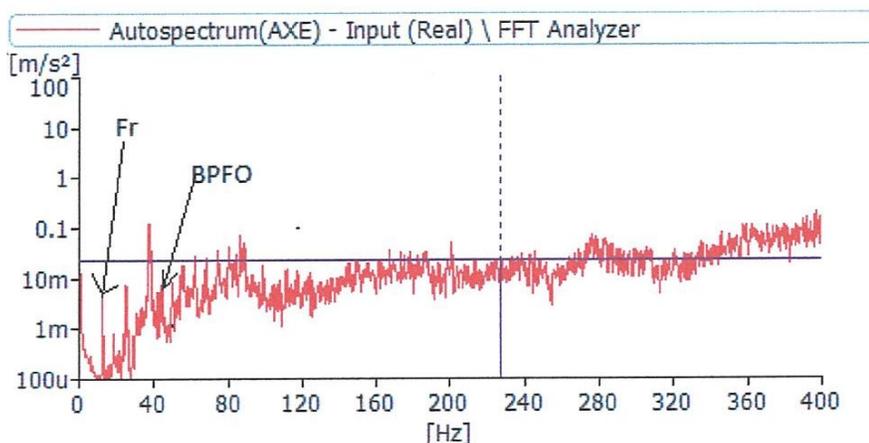


Fig.III. 13 : Spectre d'un défaut de BPFO pour  $F_r = 12.25$  Hz, Bande [0-400Hz]

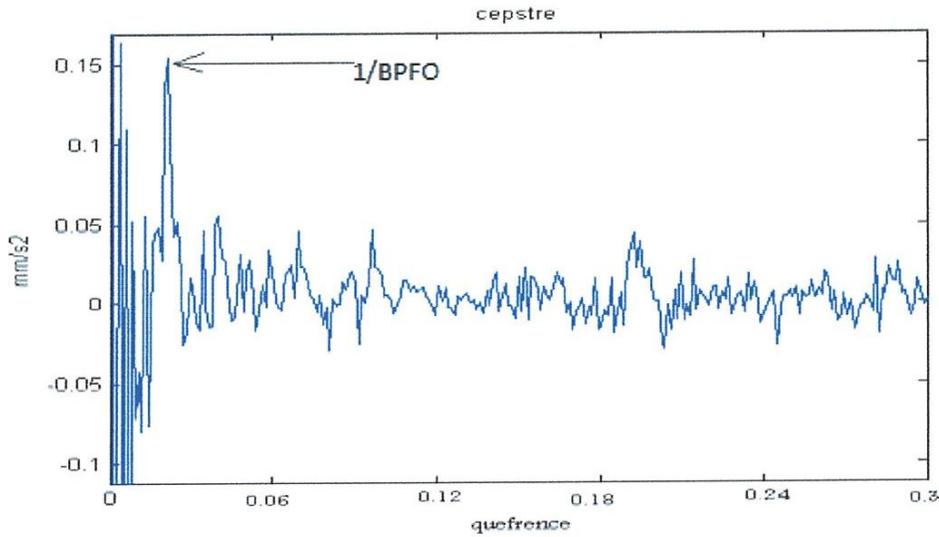


Fig. III. 14 : Cepstre d'un défaut de BPFO pour  $F_r = 12.25$  Hz, Bande [0-400Hz]

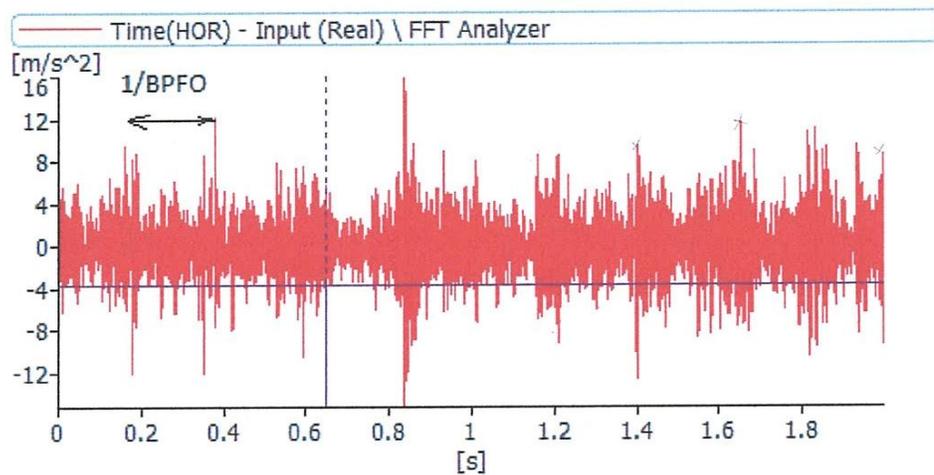


Fig. III. 15: Signal d'un défaut de BPFO pour  $F_r = 12.25$  Hz, Bande [0-1600Hz]

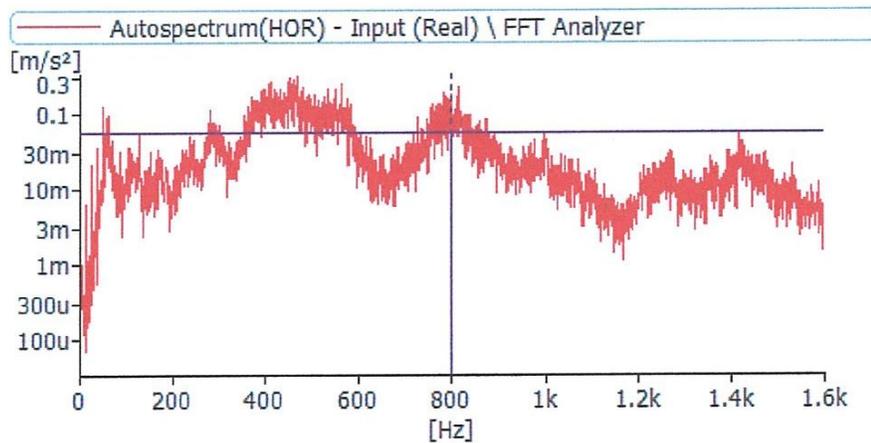


Fig. III. 16: Spectre d'un défaut de BPFO pour  $F_r = 12.25$  Hz, Bande [0-1600Hz]

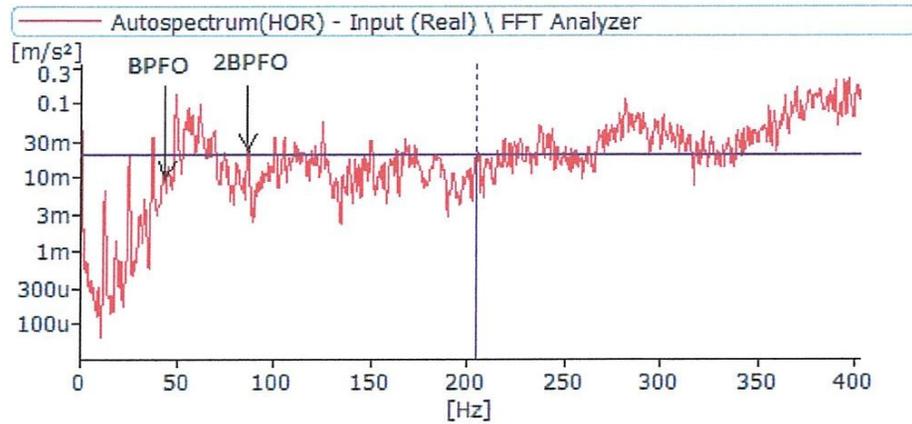


Fig. III. 17: Zoom spectre d'un défaut de BPFO pour  $Fr = 12.25$  Hz, Bande [0-1600Hz]

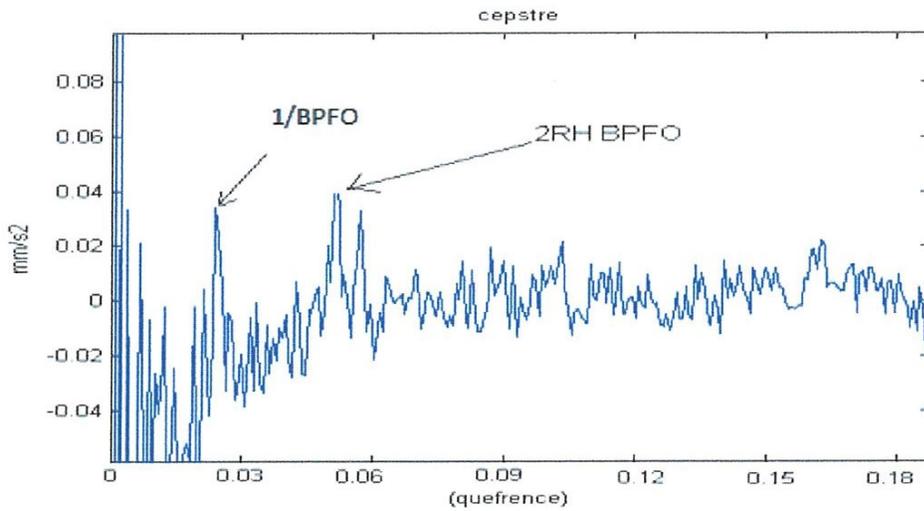


Fig. III. 18: Cepstre d'un défaut de BPFO pour  $Fr = 12.25$  Hz, Bande [0-1600Hz]

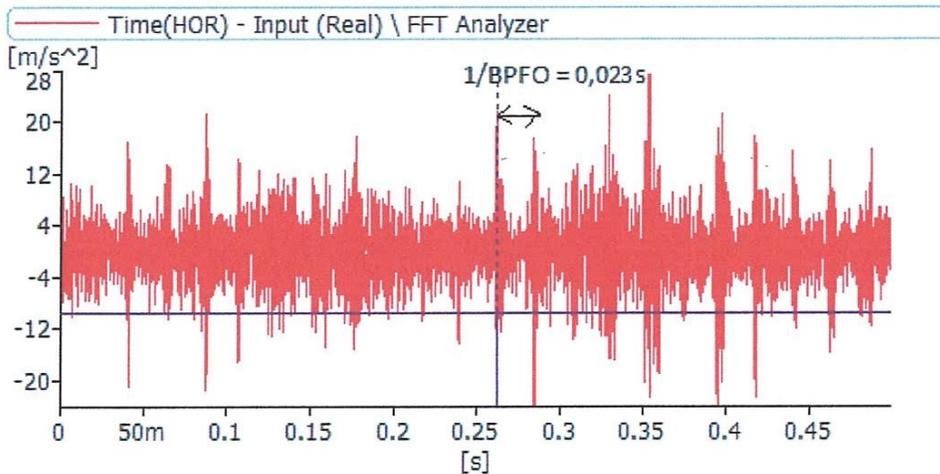


Fig. III. 19: Signal d'un défaut de BPFO pour  $Fr = 12.25$  Hz, Bande [0-12800Hz]

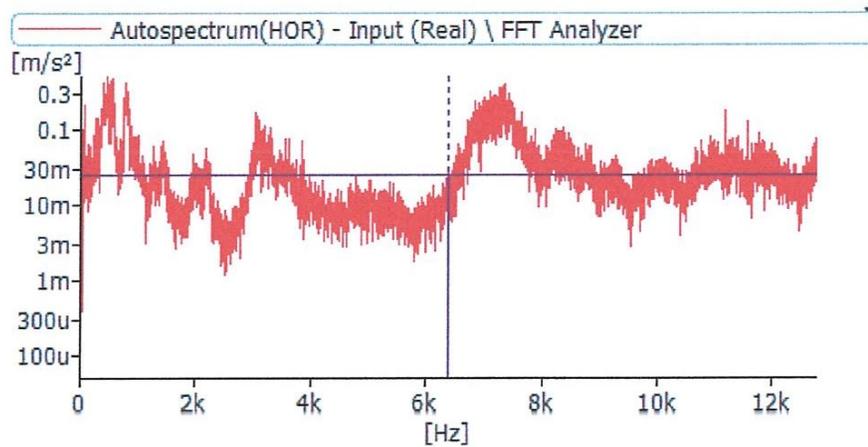


Fig. III. 20: spectre d'un défaut de BPFO pour  $F_r = 12.25$  Hz, Bande [0-12800Hz]

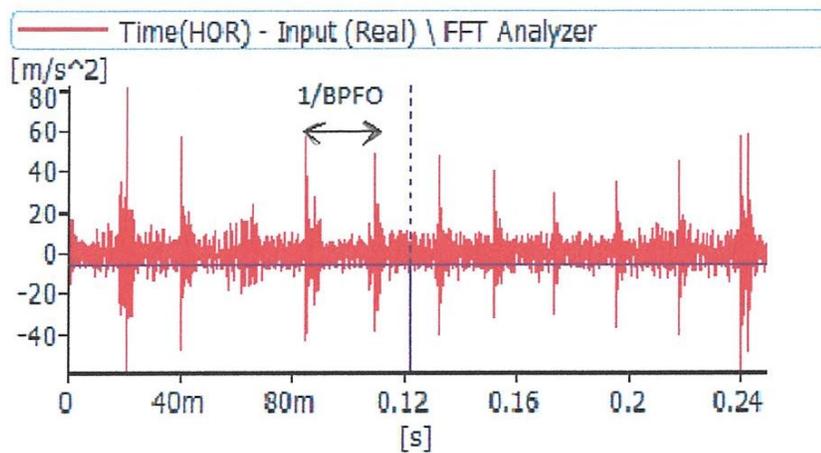


Fig. III. 21 : Signal d'un défaut de BPFO pour  $F_r = 12.25$  Hz, Bande [0-25600Hz]

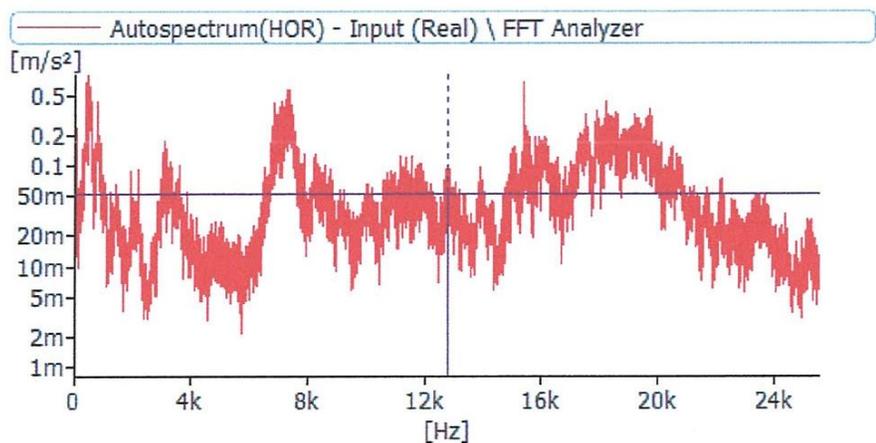


Fig.III. 22 : Spectre d'un défaut de BPFO pour  $F_r = 12.25$  Hz, Bande [0-25600Hz]

III 2.3.6 Spectres et signaux mesurés avec présence de défaut de roulement (17.5 Hz)

De la même façon, les analyses des spectres, signaux et cepstres des figures 23 à 32, montrent clairement la facilité de détection du défaut par l'analyse des signaux dans les hautes fréquences et par analyse spectral dans les basses fréquences.

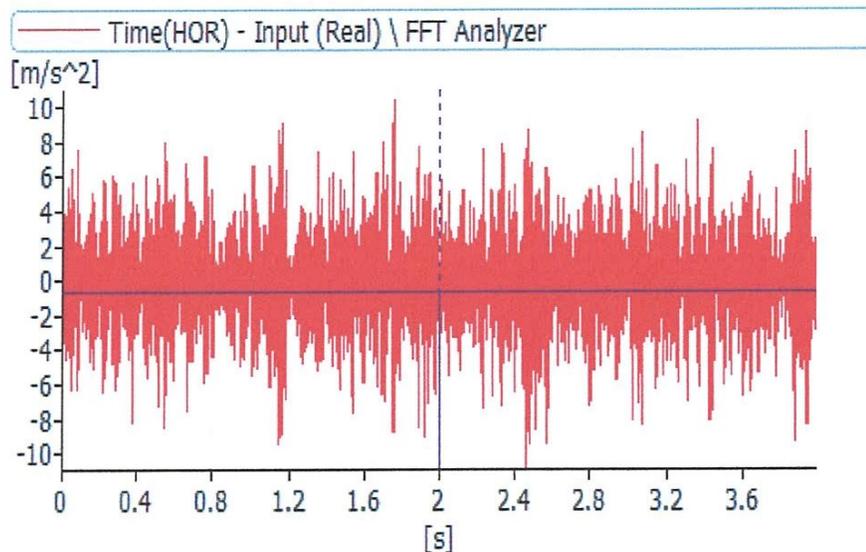


Fig. III. 23 : Signal d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-400Hz]

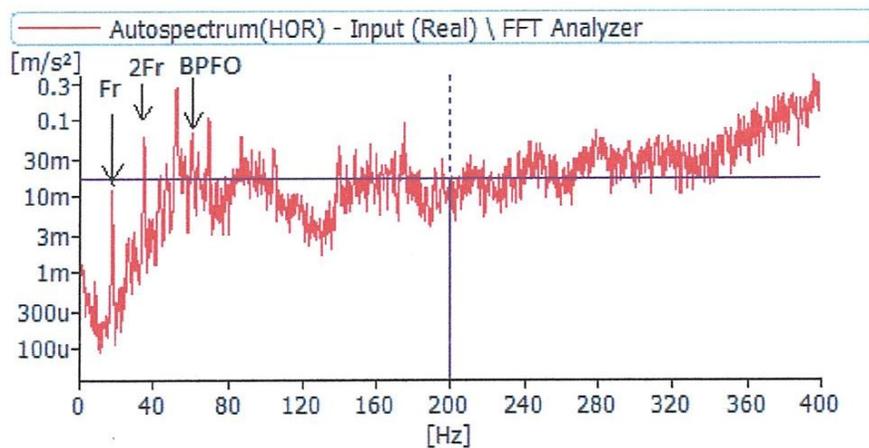


Fig. III 24 : Spectre d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-400Hz]

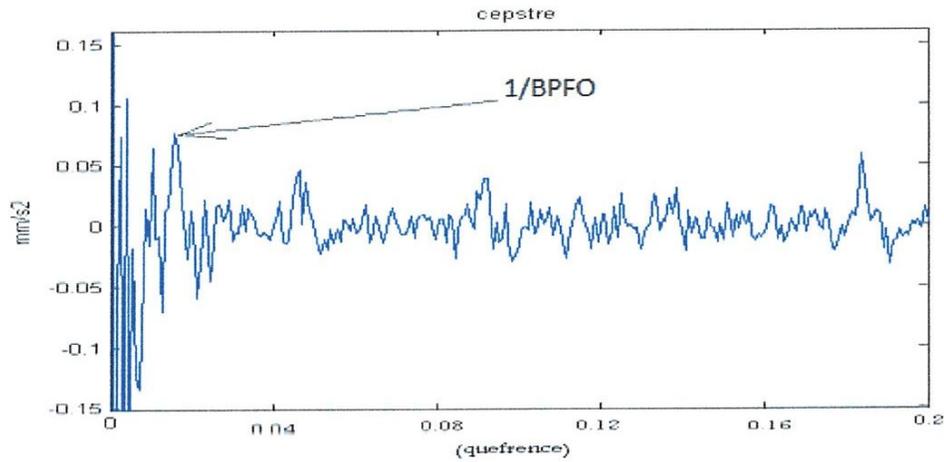


Fig. III 25 : Cepstre d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-400Hz]

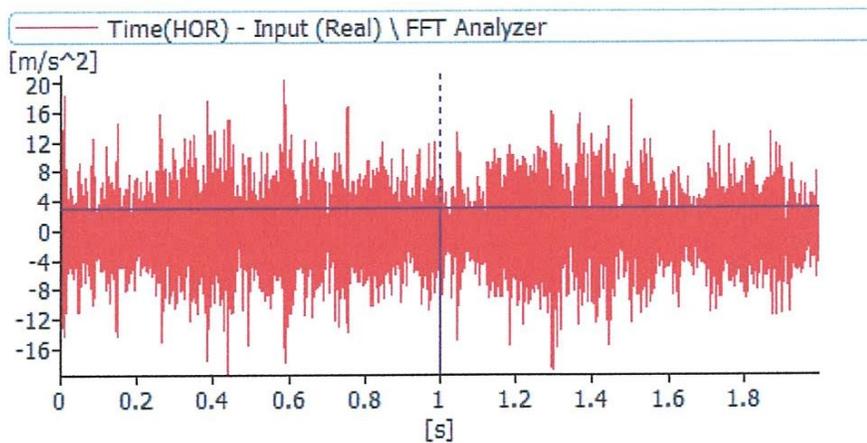


Fig. III 26 : Signal d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-1600Hz]

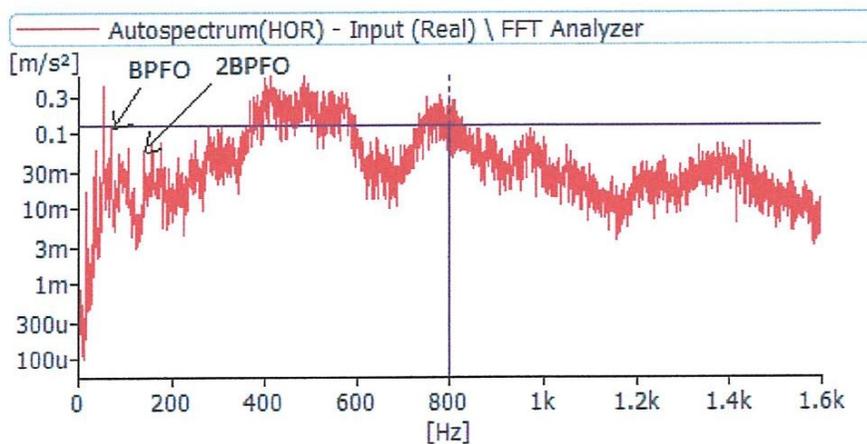


Fig. III 27 : Spectre d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-1600Hz]

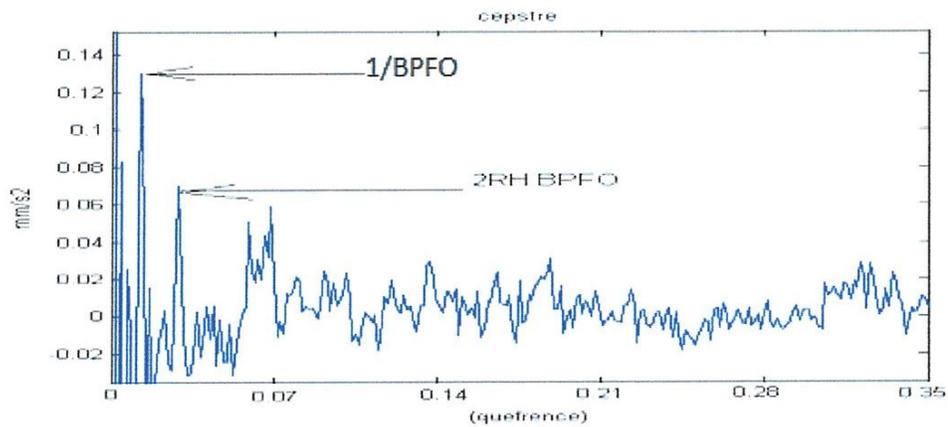


Fig. III 28 : Cepstre d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-1600H

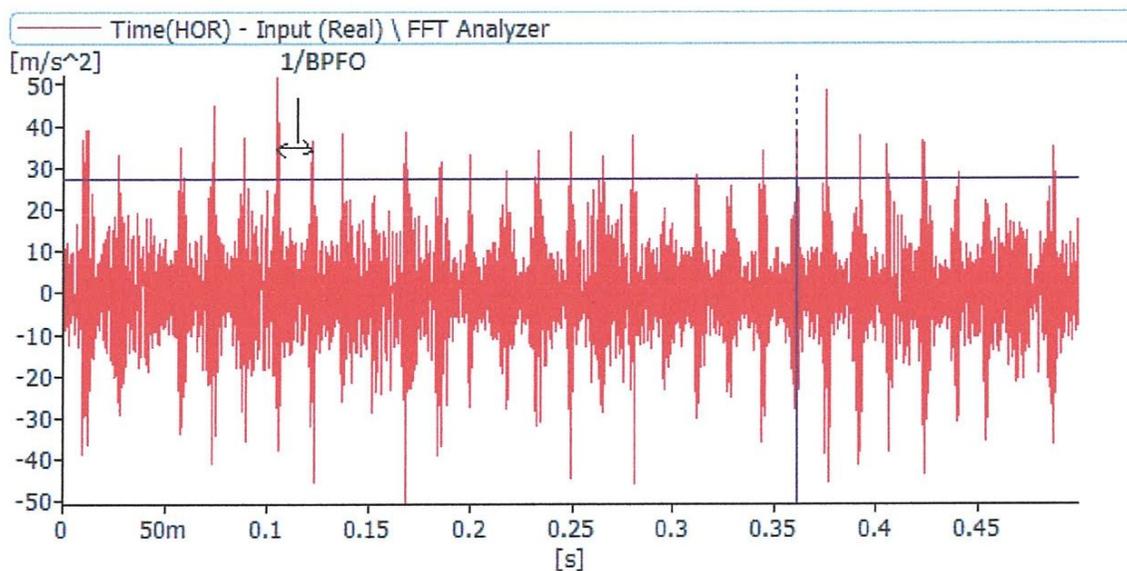


Fig.III. 29 : Signale d'un défaut de BPFO pour Fr = 17.25 Hz, Bande [0-12800Hz]

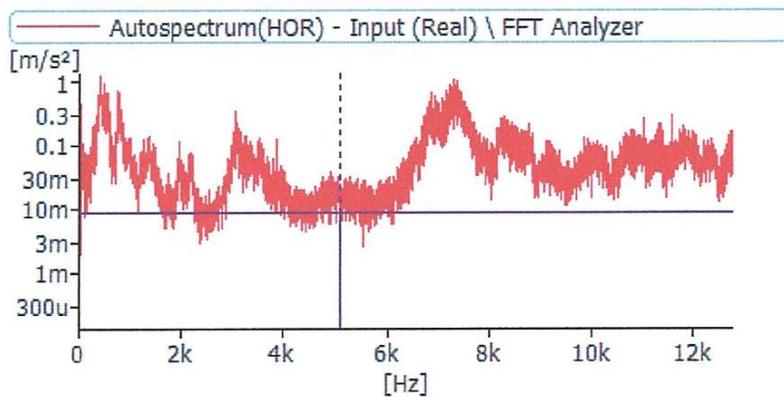


Fig. III. 30 : Spectre d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-12800Hz]

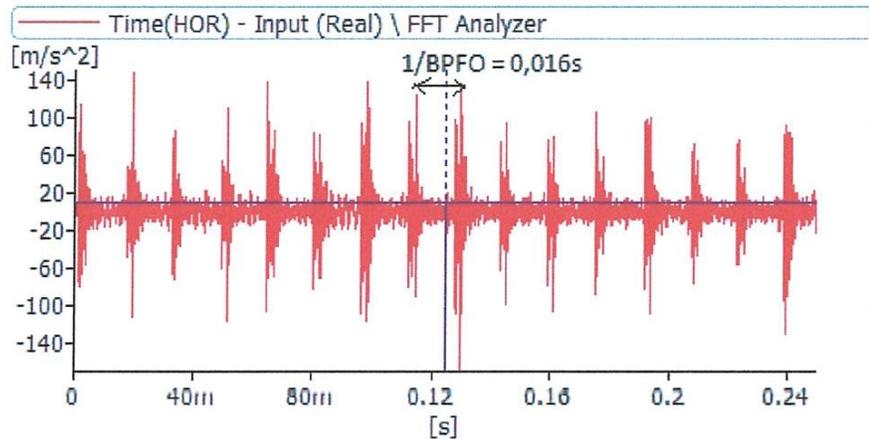


Fig. III. 31: Signal d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-25600Hz]

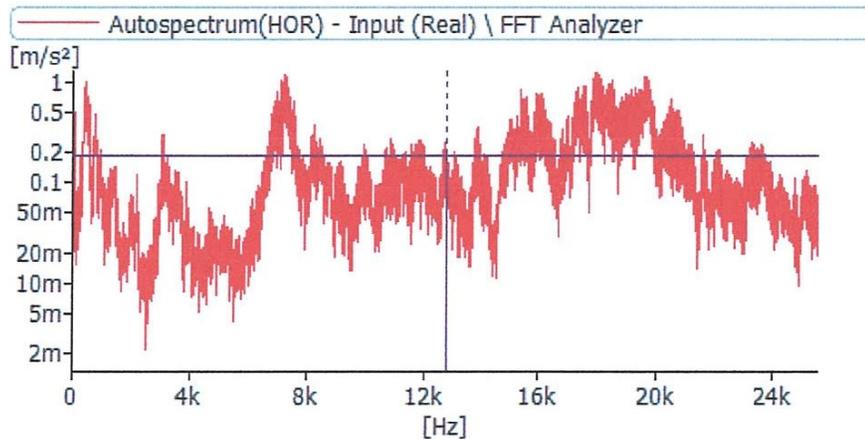


Fig. III. 32 : Spectre d'un défaut de BPFO, Bande de fréquence [0-25600Hz]

### III. 3 Suivi de l'évolution du défaut par le kurtosis

Le kurtosis vient du mot grec *kyrtosis* qui veut dire aplatissement ou *convexity* en anglais [23]. Pour un roulement sain la distribution des amplitudes du signal est Gaussienne, le kurtosis est voisin de trois. Pour un roulement dégradé, présentant des écaillages, des indentations ou des jeux importants, l'allure de la distribution de l'amplitude du signal est modifiée et le kurtosis est supérieur ou égal à 3.

$$Kurtosis = \frac{M_4 S(t)}{M_2^2 S(t)} = \frac{\frac{1}{Ne} \sum_{k=1}^{Ne} (S_k - \tilde{S})^4}{\left( \frac{1}{Ne} \sum_{k=1}^{Ne} (S_k - \tilde{S})^2 \right)^2}$$

Où M4 et M2 sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2 et S est la valeur moyenne des amplitudes.

Dans la pratique, on détermine le kurtosis sur plusieurs bandes de fréquences puisqu'en fonction de l'évolution de la dégradation, le défaut va exciter des modes de résonance dont les fréquences se situent dans des plages de fréquences différentes. Il est bon de noter que dans le cas d'une forte détérioration du roulement, l'allure de la distribution de l'amplitude redevient gaussienne avec le kurtosis voisin de 3, mais aussi une augmentation importante de l'amplitude efficace.

### III 3.1 Valeur du Kurtosis pour différents bandes de fréquences

**Pour la fréquence de rotation fr=12.5 Hz**

**Tableau III.4 : Résultats obtenus**

Bandes de fréquences	Kirtosis (sans défaut)	Kirtosis (petit défaut)	Kirtosis (moyen défaut)	Kirtosis (grand défaut)
[0-400]	0.2898	3.2001	3.2039	3.8756
[0-1600]	1.5771	3.4144	3.7381	4.7667
[0-6400]	2.6924	3.5744	4.4797	5.1304
[0-12800]	3.7033	3.8536	4.9015	5.4425

**Pour une fréquence de rotation fr=17.5 Hz**

**Tableau III.5: Résultats obtenus**

Bandes de fréquences	Kirtosis (sans défaut)	Kirtosis (petit défaut)	Kirtosis (moyen défaut)	Kirtosis (grand défaut)
[0-400]	2.4261	3.2039	3.4651	3.3863
[0-1600]	2.5803	3.5531	3.4968	3.6694
[0-6400]	2.8326	3.7381	4.4340	4.9037
[0-12800]	3.4507	3.9867	5.0015	7.0303

III. 3.2 Présentation des Kurtosis sous forme d’histogramme

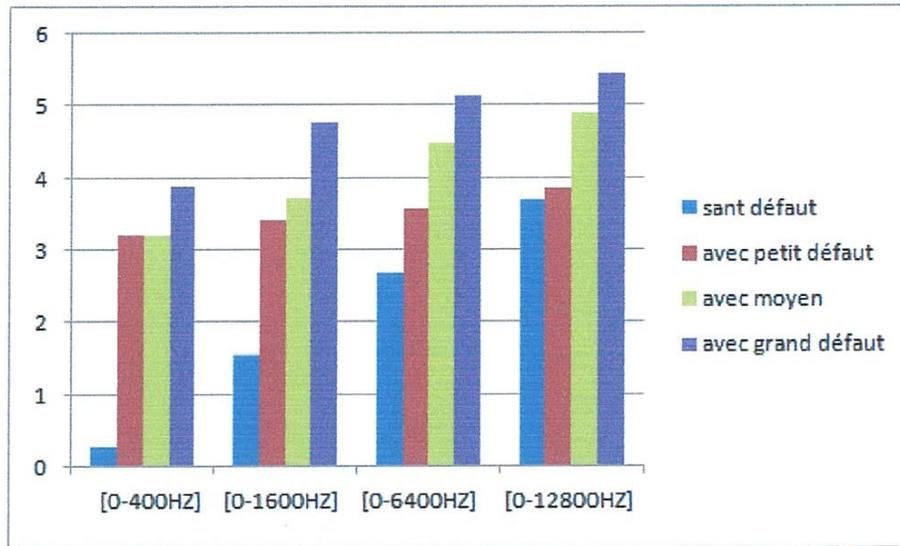


Fig. III. 33: Résultats obtenus pour  $f_r=12.5$  HZ

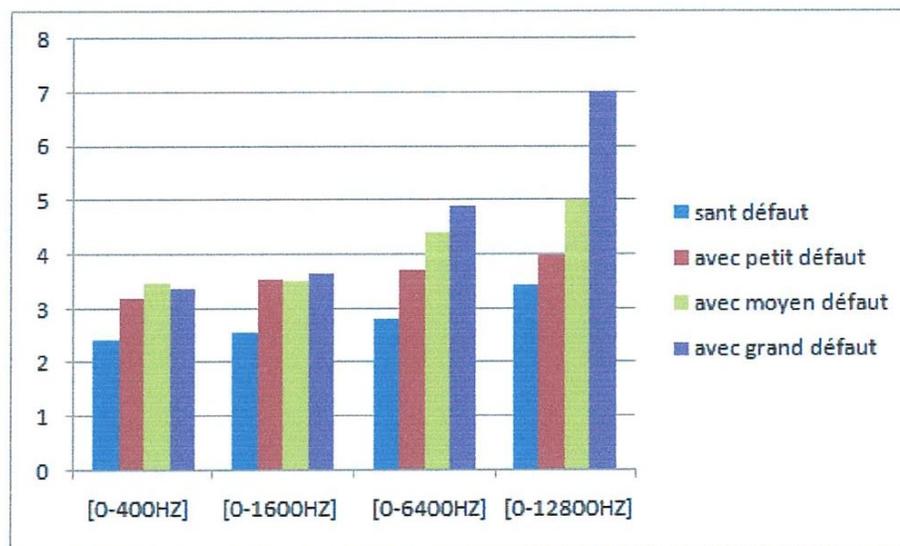


Fig. III.34: Résultats obtenus pour  $f_r=17.5$  HZ

Les deux figures (33 et 34) montrent les valeurs du kurtosis pour les quatre bandes de fréquences et pour deux vitesses de rotation différentes, dans le cas d’un moteur sans défaut et avec un défaut de roulement sur la bague extérieure (petit, moyen, grand).

Dans le cas sans défaut, les valeurs des Kurtosis restent en dessous du seuil significatif. Dans le cas de présence de défaut, les valeurs du Kurtosis, augmentent avec l’augmentation de la taille

du défaut et avec l'augmentation de la bande de fréquence. La vitesse de rotation n'a pas une influence significative sur les valeurs des Kurtosis, vue que les deux vitesses choisies sont proches.

#### **III. 4 Conclusion**

L'étude a été effectuée sur un moteur asynchrone au niveau du laboratoire de mécanique et structure au sein de l'université. Elle a porté sur la mesure de la vibration à l'aide du dispositif PULSE sur deux types d'états de moteur : sain et défectueux au niveau de la bague extérieure de roulement.

Les analyses des spectres, signaux et cepstres, montrent clairement la facilité de détection du défaut de roulement par l'analyse des signaux dans les hautes fréquences et par analyse spectral dans les basses fréquences.

Les valeurs du kurtosis pour les quatre bandes de fréquences et pour deux vitesses de rotation différentes, dans le cas d'un moteur sans défaut et avec défaut de roulement sur la bague extérieure (petit, moyen, grand), augmentent avec l'augmentation de la taille du défaut et avec l'augmentation de la bande de fréquence.



# Conclusion générale

L'utilisation des machines asynchrones dans l'industrie devient, à nos jours, très fréquente, donc la détection précoce des défauts dans ces machines est devenue un enjeu économique très important.

Des études et des recherches ont été menées sur les méthodes et les techniques qui permet de détecter, une défaillance dont le but d'améliorer la fiabilité du moteur asynchrone, donc augmenter sa durée de vie.

Ce travail porte sur la détection des défauts de roulements dans les moteurs asynchrone par l'analyse vibratoire. Les essais sont effectués à l'usine de FERTIAL situé à Annaba ainsi qu'au niveau du hall de technologie à l'université de Guelma.

Les mesures obtenues à l'usine de FERTIAL montre clairement que l'augmentation de l'amplitudes des harmoniques de la fréquence de rotation sur les paliers 1 et 2 du moteur M-17, donc, on note un désalignement sur les paliers 1 et 2 dans la direction axiale, et montre des niveaux de vibrations élevés sur le pic de la fréquence de rotation sur les paliers 3 et 4 dépassent le niveau d'alarme et le niveau de danger. Ces résultats montrent l'existence d'un important balourd dans le rotor du ventilateur K-17.

De l'autre côté nous avons effectuée une étude sur un moteur asynchrone au niveau du laboratoire de mécanique et structure au sein de l'université de Guelma. Elle a portée sur la mesure de la vibration à l'aide du dispositif PULSE sur deux types d'états de moteur, les analyses des spectres, signaux et cepstres, montrent clairement la facilité de détection du défaut de roulement par l'analyse des signaux dans les hautes fréquences et par analyse spectral dans les basses fréquences.

Les valeurs du kurtosis pour les quatre bandes de fréquences et pour deux vitesses de rotation différentes, dans le cas d'un moteur sans défaut et avec défaut de roulement sur la bague extérieure (petit, moyen, grand), augmentent avec l'augmentation de la taille du défaut et avec l'augmentation de la bande de fréquence.

Cette étude, loin d'être achevée, ouvre la voie de futures recherches, aussi bien dans le domaine des sciences appliquée que fondamentales, en vue d'amélioration du procédé de détection des défauts par l'analyse vibratoire.



Référence bibliographique

- [1] Abla bouguerne, diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones. Mémoire de magister, université mentouri – constantine, 2009, 106p.
- [2] P. O'Donnell, "Report of large reliability survey of industrial and commercial installations, Part 1", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA 21, N° 4, july/august 1985 pp 853 – 864
- [3] Présentation des avaries. Machines électriques tournantes" cahier des préventions. CP2, Allianz, 1988
- [4] O. V. Thorsen, M. Dalva, "A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.31, no.5, pp.1186-1196, September 1995
- [5] A. H. Bonnett, "Cause and analysis of Anti-Friction Bearing Failures in A.C Induction Motors" IEEE Transactions on Industry Application, pp 14 - 23, Sept/Oct 1993
- [6] L. Cohen: Time-Frequency Analysis. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1995, 1995
- [7] N. Tandon et A. Choudhury, A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. Tribology International, (1999) 23, 469-480.
- [8] A. Djebala, Application de la transformée par ondelettes à l'étude et l'analyse vibratoire des systèmes mécaniques, Thèse U.B Mokhtar- Annaba. Algérie, 2008.
- [9] T. Kebabsa et A ; Khaizouri, Surveillances des machines tournantes. Mémoire de master Université de Guelma 2010.
- [10] L. Zamponi , E. Mermoz , J.M. Linares , J.M. Sprauel, Impact of geometrical defects on bearing assemblies with integrated raceways in aeronautical gearboxes. Mechanism and machine theory 44(2009), pp.1108-1120
- [11] Tomasz Barszcz Robert B. Randall, application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine. Mechanical system and signal processing 23(2009), pp.1352-1365.
- [12] Jian-Da Wu, Jian-Ji Chan, Faulted gear identification of rotating machinery based on wavelet transform and artificial neural network. Expert systems with applications 36 (2009) 8862–8875
- [13] N.Saravanan, S.Cholairajan, K.I.Ramachandran, vibration-based fault diagnosis of super bevel gear box using fuzzy technique. expert systems with application 36(2009), pp.3119-3135
- [14] Issam Moumene. Identification des défauts mixtes d'engrenage et de roulement par l'analyse vibratoire. mémoire de magister, université de 08 mai 1945 Guelma , 2007 , 75p.

- [15] mamadou lamine et abdoulaye traoré modélisation et simulation d'une machine asynchrone à cage à l'aide du logiciel matlab/simulink. Thème scientifique, Montréal Canada 2002
- [16] Abdelkader Mellakhi, Noureddine Benouzza, Azzedine Bendiabdellah. Analyse spectrale du courant statorique pour détecter les cassures de barres dans les moteurs asynchrones triphasés à cage en tenant compte des harmoniques d'espace. Thème scientifique, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2010.
- [17] M. Sahraoui, S. E. Zouzou, A. Menacer, A. Aboubou et A. Derghal. Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. Courrier du Savoir – N°05, Juin 2004, pp. 57-61
- [18] N.Sawalhi,R.B.Randall,Simulating gear and bearing interactions in the presence of faults part I.The combined gear bearing dynamic model and de simultion of localised bearing faults. Mechanical system and signal processing 22(2008),pp.1924-1951
- [19] Yaguo Lei, Ming J. Zuo, Zhengjia He, Yanyang Zi,A multidimensional hybrid intelligent method for gear fault diagnosis. Expert Systems with applications 37(2010)1419-1430.
- [20] Abdelhakim Idir et Ali Belmehdi et Djamel Chikouche, Recherche de Signatures de Défaut de la Machine à Induction en Vue de Diagnostic. 03-04 November 2007.
- [21] Sajid Hussain,Hossam A. Gabbar, A novel method for real time gear fault detection based on pulse shape analysis. Mechanical systems and signal processing (2010).
- [22] A. Djebala, N. Ouelaa et N. Hamzaoui, Detection of bearing defects using discrete wavelet analysis, Meccanica (2008) 43:339 - 348.
- [23] E. Seier et D. Bonett, Two families of kurtosis measures, Metrika, (2003) 58, 59-70