

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Par :

IKHLEF SEYF

BOUKHIAR HOCINE

Thème

**Sélection des indicateurs de surveillance les plus pertinents en diagnostic des défauts
mécanique des machines tournantes**

Soutenu le 02/07/2023 devant le jury composé de :

Mr. Bensaid Nasreddine	Président
Mr. Harrouche Fateh	Rapporteur
Mr. Boutaani Said	Examineur

Année Universitaire 2022-2023

Remerciement

Remerciement

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté
d'entamer et de terminer ce mémoire

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurais pas pu avoir le jour
sans l'aide et l'encadrement de Mr HARROUCHE FATEH, on le remercie pour
la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa
disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent au membre de jury Mr BENSALIM
NASREDDINE Et Mr BOUTAANI SAID d'avoir accepté de participer à ce
jury

J'exprime également ma gratitude à tous enseignants qui ont collaboré à notre
formation depuis notre premier et deuxième cycle d'étude universitaire.

Nos très sincères remerciement s'adressent à nos familles, qui nous ont toujours
encouragé, et soutenu dans les moments difficiles.

En fin, on tient également à remercier toutes les personnes qui ont contribué de
près ou de loin à la réalisation de ce travail

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont les plus chers ;
À mes très chères parents qui m'ont encouragé au cours de
toute ma formation, et toute ma vie.*

*À mes très chères frères ainsi que toute leurs famille pour leurs
encouragements et soutient.*

À ma chère sœur et sa famille

À mon grand-père et à toute ma famille

À tous mes amis, tous mes collègues d'étude.

À la mémoire de ma grande mère

IKHLEF SEYF

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont les plus chers ;
À mes très chères parents qui m'ont encouragé au cours de
toute ma formation, et toute ma vie.*

À mon très chère frère ainsi pour son encouragement et soutien.

À mes chères sœurs et leurs familles

A toute ma famille

À tous mes amis, tous mes collègues d'étude.

BOUKHIAR HOCINE

Sommaire

Sommaire

Remerciement	I
Dédicace	II
Sommaire.....	III
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.....	IV
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes.

I. Introduction.....	3
II. Les différents défauts mécaniques.....	3
II.1. Notion de défaut.....	3
II.2. Statistiques des défauts mécaniques dans les machines tournantes.....	3
II.3. Types de défauts.....	4
II.3.1. Défauts des roulements.....	4
II.3.1.1. Eléments de roulements.....	4
II.3.1.2. Types de roulements.....	5
II.3.1.3. Types de défaut dans les roulements.....	5
II.3.1.4. Cause des défauts des roulements.....	7
II.3.1.5. Fréquences caractéristique d'un défaut de roulement.....	7
II.3.1.6. Signature vibratoire.....	9
II.3.2. Défauts des engrenages.....	10
II.3.2.1. Définition des engrenages.....	10
II.3.2.2. Types d'engrenages.....	10
II.3.2.3. Types de défaut dans les engrenages.....	11
II.3.2.4. Fréquence d'engrènement.....	13
II.3.2.5. Signatures vibratoires des défauts d'engrènement.....	14
II.3.3. Défauts liés aux arbres.....	16
II.3.3.1. Le Déséquilibre.....	16
II.3.3.2. Défaut d'alignement.....	17
II.3.4. Défaillances des courroies.....	19
III. Surveillance des défauts.....	19

Sommaire

IV. Conclusion	20
Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance	
I. Introduction.....	21
II. Méthodes d'analyse vibratoires.....	21
II.1.L'analyse spectrale.....	21
II.2.L'analyse d'enveloppe	22
II.3. Analyse Cepstrale.....	23
III. Types d'indicateurs.....	24
III.1.Indicateurs temporels.....	24
III.1.1. La valeur efficace ou valeur RMS.....	25
III.1.2. Kurtosis.....	25
III.1.3. valeur crête.....	26
III.1.4. Facteur crête.....	26
III.1.5.Le Skewness.....	27
III.2.Indicateurs fréquentiels.....	27
III. Choix des indicateurs en fonction du cas étudié.....	28
III.1.Le Kurtosis	28
III.2.La valeur crête V_c	28
III.3. RMS	29
IV. Méthodes de sélection des indicateurs et leurs applications	29
IV.1. L'analyse en composantes principales (ACP)	30
IV.2. L'Analyse en Composantes Indépendantes (ACI)... ..	32
IV.3.Critère de FISHER	32
V. Conclusion	33
Chapitre III : Démarche expérimentale.	
I. Introduction.....	34
II. Application de la méthode de sélection d'indicateurs de surveillance des défauts mécaniques des roulements.....	34
II.1. Prétraitement de données	34
II.1.1. Acquisition des signaux	35
II.1.2. décomposition des signaux	35
II.1.3.Filtrage passe bande autour d'une fréquence caractéristique de défaut	35
II.1.4.Calcul des indicateurs temporels	35
II.1.5. Calcul des bandes spectrales	35

Sommaire

II.1.6. Construction de la base de données	35
II.2.Sélection des paramètres selon leur pouvoir de séparation.....	36
III. Implémentation sous Matlab de la méthode de sélection d'indicateurs de surveillance des défauts mécaniques des roulements.....	36
III.1. Importation des signaux	36
III.2. Préparation des tranches de données.....	36
III.3. Calcul des indicateurs temporels	36
III.4. Calcul des indicateurs fréquentiels	36
III.4. 1. Calcul des bandes spectrales	36
III.4. 2. Calcul des paramètres fréquentiels	37
III.4.3. Construction de la base de données	37
III.5.la sélection des indicateurs par le critère de Fisher	37
IV. Banc d'essais de roulements étudié "bearing data center"	37
V. Conclusion	41

Chapitre IV : résultats et discussion

I. Introduction.....	42
II. Sélection d'indicateurs de surveillance pour le diagnostic des défauts roulements.....	42
II.1. Prétraitement	42
II.1.1. Division des signaux	42
II.1.2. calcul des indicateurs	43
II.1.2.1. Indicateurs temporels.....	44
II.1.2.2. Indicateurs fréquentiels	44
II.2.la sélection des indicateurs	44
II.2.1. Sélection visuelle	44
II.2.1.1.Discussion des résultats	47
II.2.2. Sélection par le critère de Fisher	48
II.3.1 Discussion des résultats	50
III. Conclusion	50
Conclusion générale.....	51

Reference bibliographiques.

Annexe.

Résumé.

Liste des figures

Liste des figures

Figure I-01 : les statistiques approximatives des défauts mécaniques dans une machine tournante.....	04
Figure I-02 : Eléments de roulement.....	05
Figure I-03 : Différents types de roulements.....	05
Figure I-04 : écaillage sur une bague intérieure d'un roulement à billes à contact oblique.....	06
Figure I-05 : Défaut de roulements- dentelure.....	07
Figure I-06 : Caractéristiques géométriques d'un roulement.....	08
Figure I-07 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur la bague extérieure.....	09
Figure I-08 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure.....	09
Figure I-09 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant.....	10
Figure I-10 : Différents types d'engrenage.....	11
Figure I-11 : Usure abrasive "Engrenages".....	11
Figure I-12 : Piquûre "Engrenages".....	12
Figure I-13 : Fissuration ou cracks "Engrenages".....	12
Figure I-14 : Écaillage "Engrenages".....	12
Figure I-15 : Le grippage "Engrenage".....	13
Figure I-16 :Image vibratoire d'un engrenage sain.....	14
Figure I-17 : image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée.....	14
Figure I-18 : Image vibratoire théorique d'une denture.....	15
Figure I-19 : Image théorique et spectre réel d'un engrènement en fond de denture sur un réducteur.....	15
Figure I-20 : Jeu de fond de denture trop grand.....	16
Figure I-21 : Tolérances d'usinage sur un rotor.....	16
Figure I-22 : exemples des défauts induisant un balourd.....	17
Figure I-23 : Défauts d'alignements.....	17
Figure I.24 : Signal temporel d'un défaut d'alignement.....	18

Liste des figures

Figure I.25- : Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial.....	18
Figure I-26 : Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire.....	18
Figure I-27 : Désalignement de paliers se traduisant par une flexion de l'arbre.....	19
Figure I-28 : Défaut de courroie.....	19
Figure II.1 : Spectre d'un roulement avec un défaut sur la bague extérieure.....	22
Figure II.2 : Analyse d'enveloppe du signal filtré.....	23
Figure II.3: Cepstre d'un roulement défectueux.....	24
Figure II.4 : Densité spectrale de puissance du signal vibratoire d'un roulement avec un défaut localisé sur la bague interne.....	28
Figure II.5 : Représentation graphique des 12 individus.....	31
Figure II.6 : Représentation du 1er axe de l'ACP.....	31
Figure II.7 : Représentation du 2eme axe de l'ACP.....	31
Figure III.1 : Banc d'essai de roulements.....	38
Figure III.2 : Représentation des signaux temporels pour différents diamètres du défaut sur la bague intérieure.....	40
Figure. IV.1 : Variation de l'indicateur (Ecart type).....	45
Figure. IV.2 : Variation de l'indicateur (Facteur crête).....	45
Figure. IV.3 : Variation de l'indicateur (Valeur crête à crête).....	45
Figure. IV.4 : Variation de l'indicateur (Facteur Skewness).....	45
Figure. IV.5 : Variation de l'indicateur (Kurtosis).....	46
Figure. IV.6 : Variation de l'indicateur (Energie de la bande totale).....	46
Figure. IV.7 : Variation de l'indicateur (Energie de la bande [0_1000HZ]).....	46
Figure. IV.8 : Variation de l'indicateur (Energie de la bande [1000_2000HZ]).....	46
Figure. IV.9 : Variation de l'indicateur (Energie de la bande [2000_3000HZ]).....	47
Figure. IV.10 : Variation de l'indicateur (Energie de la bande [3000_4000HZ]).....	47
Figure. IV.11 : Variation de l'indicateur (Energie de la bande [4000_5000HZ]).....	47
Figure IV.12 : Variation du critère de Fisher pour les 11 paramètres.....	49
Figure IV.13 : Critère de Fisher pour les différents indicateurs en ordre décroissant.....	49

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II. 1 : Seuils du Kurtosis : Cas d'un roulement.....	26
Tableau II.2 : récapitulatif des indicateurs.....	27
Tableau II.3 : les différents indicateurs.....	29
Tableau III.1 : Caractéristiques des défauts de roulements.....	39
Tableau III.2 : Caractéristiques des roulements et leurs Fréquences des défauts.....	39

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale

Les machines tournantes jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs industriels tels que l'industrie manufacturière, l'énergie, le transport, etc. Le bon fonctionnement de ces machines est crucial pour assurer une production efficace et fiable. Cependant, les défauts mécaniques, tels que les défaillances des roulements, peuvent entraîner des pannes coûteuses, des arrêts de production et même des situations dangereuses.

La surveillance des défauts mécaniques est donc essentielle pour garantir la fiabilité et la disponibilité des machines tournantes. Les indicateurs de surveillance jouent un rôle clé dans cette tâche, car ils permettent de détecter et d'anticiper les défauts avant qu'ils ne se transforment en défaillances majeures. Cependant, la sélection des indicateurs de surveillance appropriés est une tâche complexe qui nécessite une approche méthodologique rigoureuse.

Le présent mémoire se concentre sur l'étude de la sélection des indicateurs de surveillance des défauts mécaniques des roulements. Les roulements sont des composants essentiels dans de nombreuses machines tournantes, et leur défaillance est l'une des principales causes de pannes. La détection précoce des défauts de roulement peut permettre une maintenance proactive, réduisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts de réparation.

L'objectif de cette étude est de développer une méthodologie pour sélectionner les indicateurs de surveillance les plus efficaces pour détecter les défauts mécaniques des roulements. Nous cherchons à identifier les indicateurs les plus sensibles et spécifiques, capables de détecter différentes formes de défauts tels que l'usure, la corrosion, l'écaillage, la bavure, la dentelure, etc. De plus, nous souhaitons évaluer la performance de ces indicateurs par rapport à des mesures existantes.

Dans le premier chapitre, nous présentons une revue exhaustive des différents défauts mécaniques auxquels les machines tournantes sont sujettes. Nous examinons les principales causes de défaillances pour les différents organes mécaniques, telles que l'usure, la corrosion, la fatigue, les déséquilibres, les jeux excessifs, etc. Nous étudierons également les effets de ses défauts sur les performances et la durée de vie des machines tournantes. Ce chapitre servira de base pour comprendre l'importance de détecter et de diagnostiquer ces défauts.

Dans le deuxième chapitre, on a développé les différents types des indicateurs de surveillance utilisées dans le diagnostic des défauts mécaniques des machines tournantes, ainsi qu'au différentes méthodes de sélection des indicateurs, telles que la méthode de Fisher, l'analyse en composantes principales (ACP).

Introduction générale

Le troisième chapitre présente une démarche expérimentale, les étapes clés de la méthodologie proposée, telles que la collecte des données sur un banc d'essai dédié aux roulements, le prétraitement des données, le calcul des statistiques descriptives, l'application du critère de Fisher pour la sélection des indicateurs,

Le quatrième chapitre est consacré pour la présentation et la discussion des résultats fournis par cette étude, et à la sélection des indicateurs par leurs pouvoirs de détection des défauts mécaniques des machines tournantes.

Ainsi, ce mémoire contribuera à l'avancement des connaissances dans le domaine de la surveillance des machines tournantes en mettant l'accent sur la sélection des indicateurs de surveillance des défauts mécaniques des roulements.

CHAPITRE 01
LES DEFAUTS MECANIQUES
DANS LES MACHINES
TOURNANTES.

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes.

I. Introduction :

La machine tournante est une machine qui converti l'énergie mécanique en mouvement rotatif, cependant, ces machines sont soumissent a des contraintes mécaniques élevées qui peuvent entrainer des défauts telle que les fissures, les ruptures, les usures.

Ces défauts peuvent avoir des conséquences graves sur les machines tournantes. Afin d'éviter ses conséquences il est essentielle de surveiller la machine, les indicateurs de surveillance peuvent fournir des informations précieuses sur l'état de la machine, et pour détecter les défauts avant qu'ils ne deviennent catastrophiques.

II. Défauts mécaniques dans les machines tournantes :

II.1. Notion de défaut [01] :

La notion du défaut intervient souvent dans les techniques de surveillance des processus industriels. C'est un écart entre les caractéristiques observées sur le dispositif et sa caractéristique de référence, cet écart étant idéalement nul en absence de défaut.

Les défauts peuvent apparaitre au niveau des capteurs, des actionneurs ou au niveau du processus lui-même.

Il arrive souvent que le dispositif puisse très bien conserver son aptitude à assurer sa mission principale si les défauts affectant ses composants n'ont pas d'impacts significatifs sur la fonction qu'il est appelé à assurer.

Dans ce cas-là, aucune intervention de l'opérateur de contrôle n'est effectuée, mais un suivi accru et régulier est nécessaire pour éviter une aggravation de l'état de la machine, et notamment l'apparition d'une défaillance, voire même d'une panne.

II.2. Statistiques des défauts mécaniques dans les machines tournantes :

Les machines tournantes sont généralement des systèmes de transmission de puissance (par exemple, les engrenages, roulements, aubes, vilebrequins, ...) ou bien des systèmes de conversion de puissance (par exemple, les moteurs électriques, ...). Ces systèmes sont caractérisés par leur robustesse, leur fiabilité et leur maturité technologique et sont de plus en plus omniprésents dans de nombreuses applications industrielles. Dans la grande variété de ces applications, une demande croissante existe dans le but d'améliorer leur fiabilité et leur disponibilité [02]. Une panne dans une machine tournante n'est que la résultante d'une avarie ou d'une suite d'avarie sur l'un ou plusieurs de ses organes [03].ils

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

existent plusieurs types de défauts mécaniques que peuvent apparaître durant le fonctionnement des machines tournantes par exemple un défaut localisé sur une dent d'engrenage, un écaillage sur une bague d'un roulement, un balourd sur un arbre en rotation, Le défaut d'alignement et le défaut de courroies.

Les statistiques relatives aux défauts mécaniques des machines tournantes varient en fonction de chaque machine, en prenant en compte des facteurs tels que son utilisation, son entretien, son âge et sa maintenance.

La figure (I-01) montre les statistiques approximatives des défauts mécaniques dans une machine tournante.

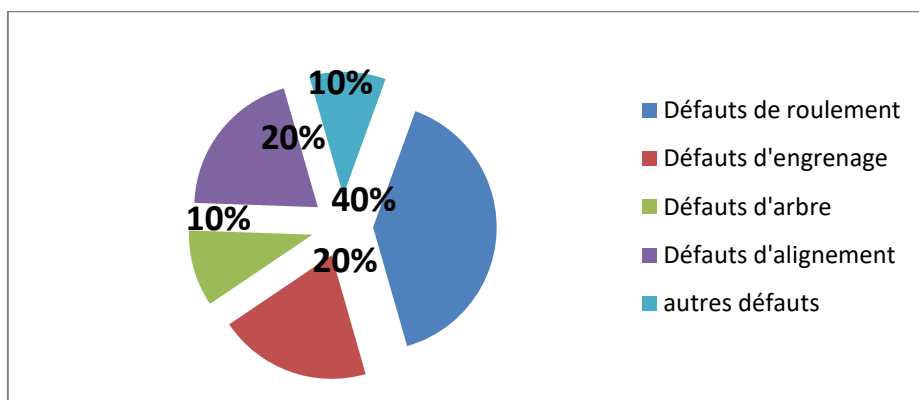


Figure I-01 : les statistiques approximatives des défauts mécaniques dans une machine tournante.

II.3. Types de défauts :

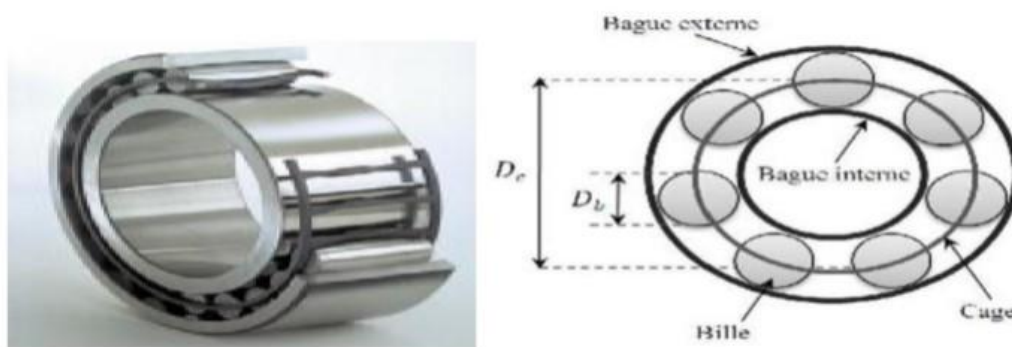
II.3.1. Défauts des roulements :

II.3.1.1. Éléments de roulements [04]:

Le roulement est composé des éléments suivants :

- Deux bagues concentriques, une bague intérieure et une bague extérieure, comportant des chemins de roulement;
- Des corps roulants, billes, rouleaux ou aiguilles, permettant la rotation des deux bagues avec un frottement minimal;
- Une cage séparant et guidant les éléments roulants. En pratique pour chaque application existe un roulement approprié.

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

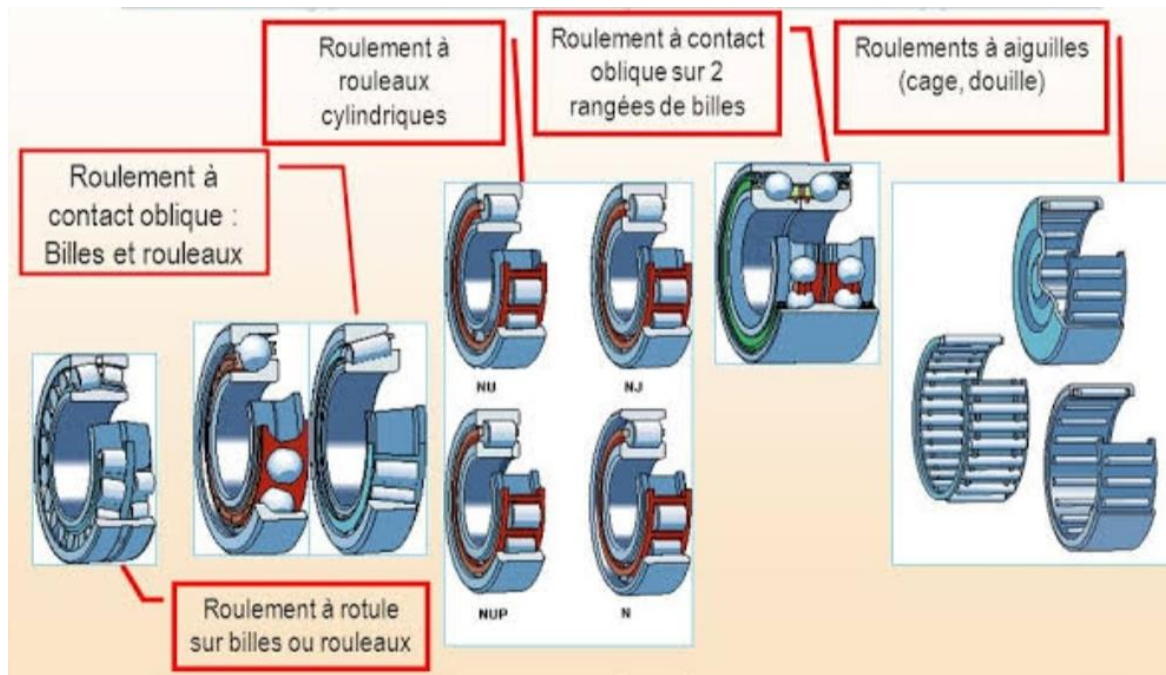


Le roulement à billes offre un faible frottement grâce au contact ponctuel mais n'est utilisé que pour des charges limitées. Le roulement à rouleaux offre une plus grande capacité de chargement grâce au contact linéaire provoquant aussi un frottement plus important.

II.3.1.2. Types de roulements

Les éléments roulants peuvent prendre différentes formes cylindriques, coniques ou sphériques. Les roulements à aiguilles sont quant à eux utilisés lorsqu'un rapport charge/encombrement important est requis.

Les principaux types de roulements sont illustrés dans la Figure (I-03)



Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

II.3.1.3. Types de défaut dans les roulements:

a. Usure [05]:

Usure par déformation : Il s'agit de la déformation plastique de la bague de roulement, causée par un fort impact ou des vibrations à haute fréquence. Est une usure sans perte de matière.

Usure abrasive : les éléments roulants glissant sur des chemins de roulement mal lubrifiés peuvent provoquer une usure qui peut faire briller les revêtements des roulements.

b. Corrosion [6]:

La présence d'humidité aux points de contact des éléments roulants avec les chemins de roulement peut provoquer une corrosion chimique. Surtout lorsque le roulement vient d'être nettoyé et qu'il est contaminé par la sueur des mains.

La corrosion par contact (fretting) provoque la formation d'une pâte brune par la rouille et les lubrifiants. Une corrosion profonde peut provoquer la rupture de l'anneau. En raison d'une mauvaise sélection de l'ajustement entre la bague et l'arbre.

c. Ecaillage [07]:

L'écaillage se produit lorsque de petites particules de matériau du roulement se détachent de la surface du chemin de roulement ou des éléments du roulement en raison de la fatigue par laminage, créant alors des zones à la texture grossière et rugueuse.



Figure I-04 : écaillage sur une bague intérieure d'un roulement à billes à contact oblique [07]

d. Bavure [08]:

Le phénomène de bavure apparaît sous forme d'un transfert de la matière d'une surface à une autre. Cela peut être causé par plusieurs facteurs: un manque de lubrification, pénétration du corps roulant dans la zone chargée, une charge légère par rapport à la vitesse de rotation et d'autres...Chaque cas doit être traité de façon à éliminer la cause. Le développement de la bavure conduit à une cassure totale de la bague ou du corps roulant.

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

e. Dentelure [09]:

La dentelure se produit généralement lorsque le roulement n'est pas monté correctement ou lorsqu'il est soumis à une grande charge.

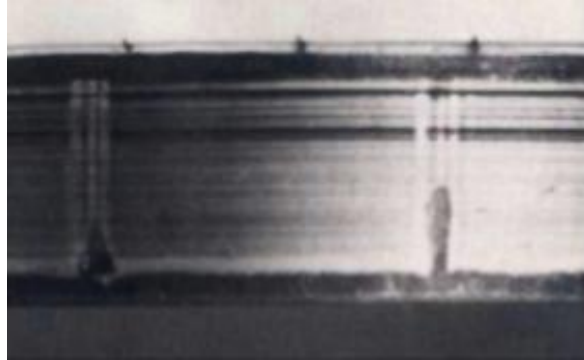


Figure I-05 : Défaut de roulements- dentelure [09]

f. Cassure [08]:

La cassure provient dans la plupart des cas d'une mauvaise manipulation du roulement, par exemple lui donner un coup de marteau au temps de montage. la cassure peut encore provenir d'une corrosion ou d'une bavure.

II.3.1.4. Causes des défauts des roulements [10]:

Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme:

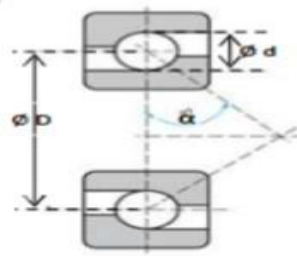
- ✓ contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable,
- ✓ corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides,
- ✓ lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement,
- ✓ mauvais alignement du rotor,
- ✓ courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques.

II.3.1.5. Fréquences caractéristique d'un défaut de roulement [11] [12] [13] [20] :

Dans la plupart des cas, la dégradation se traduit par un écaillage d'une des pistes ou d'un élément roulant du roulement, produisant un choc à chaque passage. Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues.

Pour chaque type de roulement et en fonction de ses côtes de fabrication. Figure (I-06)

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes



FigureI-06 : Caractéristiques géométriques d'un roulement.

On peut considérer les fréquences caractéristiques données par les formules ci-dessous :

- **Bague extérieure**

La fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague extérieure " Fb_{ext} " est donnée par l'équation suivante :

$$Fb_{ext} = 0,5 F_r n \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right] \quad (I. 01)$$

- **Bague intérieure**

La fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague intérieure, supposée montée sur l'arbre tournant, " Fb_{int} " est donnée par l'équation suivante :

$$Fb_{int} = 0,5 F_r n \left[1 + \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right] \quad (I. 02)$$

- **Billes**

La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau) sur la bague externe ou sur la bague interne " F_{bille} " est donnée par l'équation suivante:

$$F_{bille} = 0,5 F_r \frac{D}{d} \left[1 - \left(\frac{d \cos \alpha}{D} \right)^2 \right] \quad (I. 03)$$

- **Cage**

La fréquence de passage d'un défaut de cage " F_{cage} " , est donnée par l'équation suivante :

$$F_{cage} = 0,5 F_r \left[1 - \left(\frac{d \cos \alpha}{D} \right) \right] \quad (I. 04)$$

Avec :

- n : le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles),
- D : le diamètre primitif,
- d : le diamètre des éléments roulants,
- α : angle de contact,
- F_r : la fréquence de rotation de la bague interne (la bague externe étant supposée fixe)

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

Ces différentes informations caractéristiques du roulement peuvent être fournies par le constructeur.

II.3.1.6. Signature vibratoire :

La signature vibratoire théorique de ce type de défaut est représentée dans les figures suivantes :

a. Défaut de type écaillage affectant la bague externe :

Un défaut du type écaillage qui affecte la bague externe d'un roulement donne une image vibratoire un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence du défaut. À chaque composante de ce peigne, une paire de bandes latérales est associée et espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique élevées. Figure (I-07).

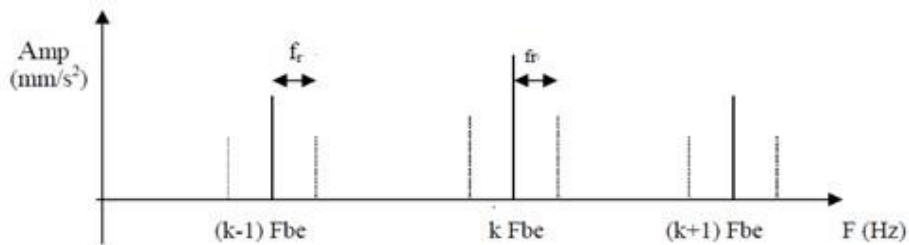


Figure I-07 [20]: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur la bague extérieure.

F_r : Fréquence de rotation.

F_{be} : Fréquence de passage d'un défaut dans la bague extérieure.

b. Défaut de type écaillage affectant la bague interne :

Un défaut de type écaillage qui affecte la bague interne de roulement a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation. Figure (I-08).

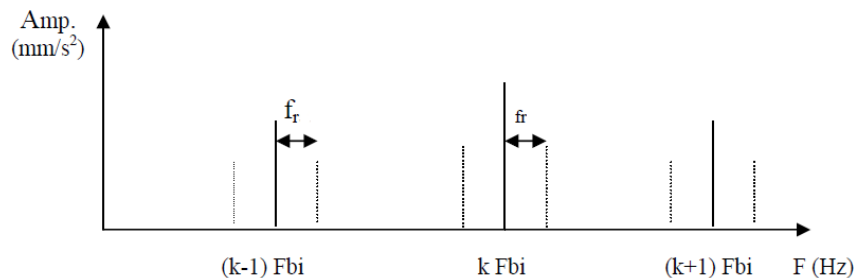


Figure I-08 [20]: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure.

F_{bi} : Fréquence de passage d'un défaut dans la bague intérieur.

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

c. Défaut de type écaillage sur un élément roulant :

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant, présente une image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante du peigne, plusieurs paires de bandes latérales sont associées et espacées de la fréquence de la cage. Figure (I-09).

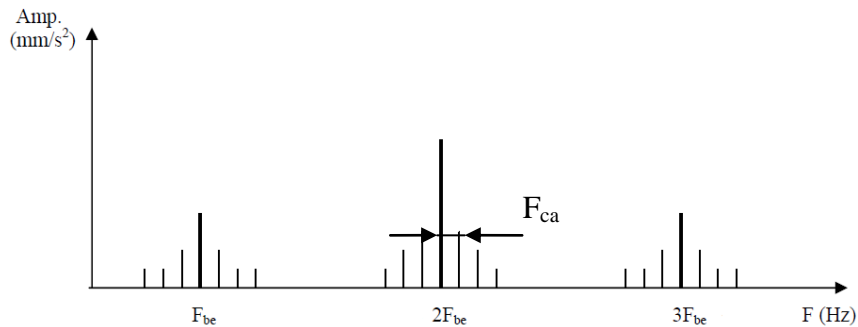


Figure I-09 [20]: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant.

F_{be} : Fréquence de passage d'un défaut de bille

F_{ca} : Fréquence de la cage.

II.3.2. Défauts des engrenages :

II.3.2.1. Définition des engrenages [04]:

Un engrenage est un mécanisme composé de deux roues dentées mobiles autour d'axes de position fixe et dont l'une entraîne l'autre par l'action de dents successivement en contact et on dit que les deux roues sont conjuguées.

II.3.2.2. Types d'engrenages [11]:

On distingue trois classes d'engrenages :

- les engrenages parallèles (les deux arbres sont parallèles) ;
- les engrenages concourant (les deux arbres sont tels que leurs prolongements se coupent) ;
- les engrenages gauches (les deux arbres occupent une position relative quelconque).



Figure I-10 : Différents types d'engrenage [11].

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

II.3.2.3. Types de défaut dans les engrenages :

Plusieurs types de défauts peuvent affecter les dentures d'engrenage, on peut citer les défauts répartis sur toutes les dents :

a. L'usure [18]:

Est un phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière dû au glissement de deux surfaces l'une contre l'autre. Le développement de l'usure est lié à la charge et à la vitesse de glissement en chaque point des surfaces de contact, ainsi qu'à la présence plus ou moins grande d'éléments abrasifs dans le lubrifiant. L'usure normale, progresse lentement, elle est inversement proportionnelle à la dureté superficielle de la denture. Une usure anormale se produit lorsque le lubrifiant est contaminé par des particules abrasives ou que le lubrifiant est corrosif, provoquant un dysfonctionnement ou même une défaillance des engrenages.



Figure I-11 : Usure abrasive "Engrenages". [15]

b. La piqûre [18]:

Il s'agit de trous peu profonds, qui affectent toutes les dents. La piqûre est une avarie qui se produit surtout sur des engrenages en acier de construction. Relativement peu dur. Il est moins à craindre si la viscosité du lubrifiant est élevée. L'apparition des piqûres est associée aussi à un rapport épaisseur de film lubrifiant sur rugosité composite insuffisant pour éviter des contacts entre aspérités.



Figure I-12 : Piqûre "Engrenages". [15]

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

Et, les défauts localisés sur des dentures particulières :

c. La fissuration [18]:

généralement par fatigue, elle progresse à chaque mise en charge, à partir d'un point initial situé presque toujours au pied de la dent, elle apparaît surtout sur des aciers fins, durcis par traitement thermique, qui sont très sensibles aux concentrations de contraintes, l'apparition de ces fissures est la conséquence d'une contrainte au pied de la dent qui dépasse la limite de fatigue du matériau, et est en général située du côté de la dent sollicitée en traction.

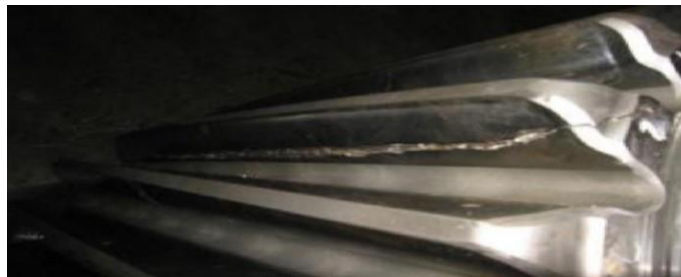


Figure I-13 : Fissuration ou cracks "Engrenages". [15]

d. L'écaillage [18] :

Il se manifeste aussi sous forme de trous, mais ceux-ci sont beaucoup moins nombreux, plus profonds et plus étendus que ceux des piquûres. L'écaillage se trouve dans les engrenages cémentés, qui sont les plus répandus à l'heure actuelle car ils permettent de passer des couples importants avec des dimensions faibles.



Figure I-14 : Écaillage "Engrenages". [15]

e. Grippage [18]:

Conséquence directe d'une destruction brutale du film d'huile, ou d'un frottement sous charge provoquant des hausses de températures, le grippage est favorisée essentiellement par des vitesses élevées, de gros modules, un faible nombre de dents en contact.

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

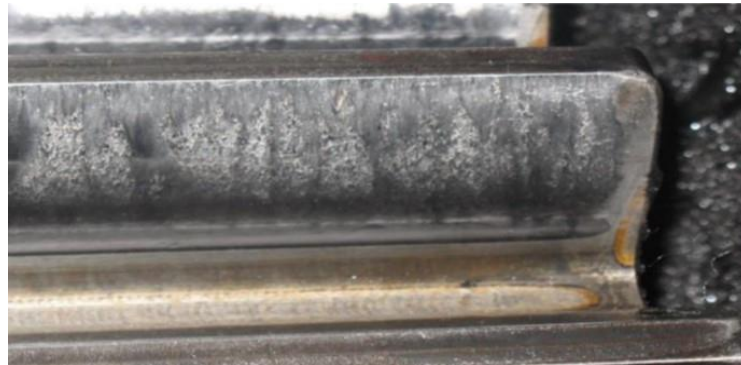


Figure I-15 : Le grippage "Engrenage". [15]

II.3.2.4. Fréquence d'engrènement [11] [13] [16] :

Observons un engrènement de deux roues dentées (1) et (2), ayant Z_1 et Z_2 pour nombre de dents et tournant à des fréquences F_1 et F_2 . A chaque fois qu'une dent de la roue menante s'engage dans la roue menée, il se produit une prise de charge périodique au rythme d'engagement des dents selon une fréquence d'engrènement F_e qui est égale à la fréquence de rotation de la roue multipliée par son nombre de dents.

On a :
$$F_e = F_1 Z_1 = F_2 Z_2 \quad (I.05)$$

Avec :

F_e : Fréquence d'engrènement.

F_1 et F_2 : Fréquences de rotations de la roue 1 et 2.

Z_1 et Z_2 : Nombre des dents des roues 1 et 2.

Si la denture est en bon état, le spectre de la figure (I-16), est constitué de composantes dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement ou à ses harmoniques.

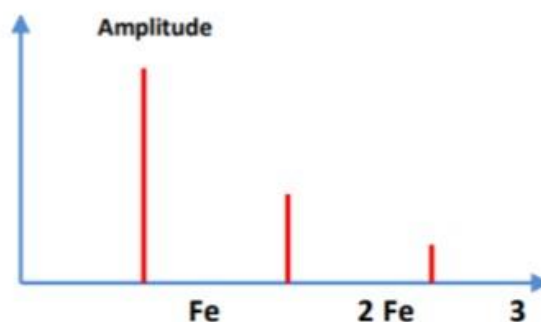


Figure I-16: Image vibratoire d'un engrenage sain

II.3.2.5. Signatures vibratoires des défauts d'engrènement

a. Détérioration d'une dent :

Quand l'une des roues présente une dent détériorée, il se produit alors un choc dur à chaque tour du pignon. Le spectre qui correspond figure (I-17) montre une forme qui

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

ressemble à un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de rotation du pignon détérioré s'étalant jusqu'aux hautes fréquences.

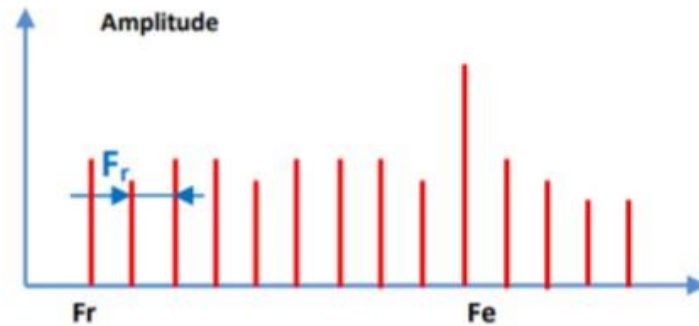


Figure I-17: image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée

b. Détérioration de deux dents sur les deux roues :

S'il y a une dent détériorée dans chacune des deux roues dentées, les chocs pourront alors être importants lorsque les deux défauts se rencontrent « coïncidence ».

La rencontre se fait à la fréquence F_{co} appelée fréquence de coïncidence telle que :

$$F_{co} = \frac{F_e}{PPCM(Z_1 Z_2)} \quad (I. 06)$$

Avec :

F_e : Fréquence d'engrènement.

$PPCM$: Plus petit commun multiple de Z_1 et Z_2

c. Détérioration de l'ensemble de dentures :

Lorsque l'ensemble de la denture détériorée ou bien usée, les chocs se produisent au passage de chacune des dents. Le spectre est constitué d'un peigne de raies dont la fréquence correspond à la fréquence d'engrènement, mais cette fois avec une amplitude beaucoup plus élevée figure (I-18). Le spectre peut présenter alors des raies à la fréquence de rotation correspondant à des équilibrages imparfaits.

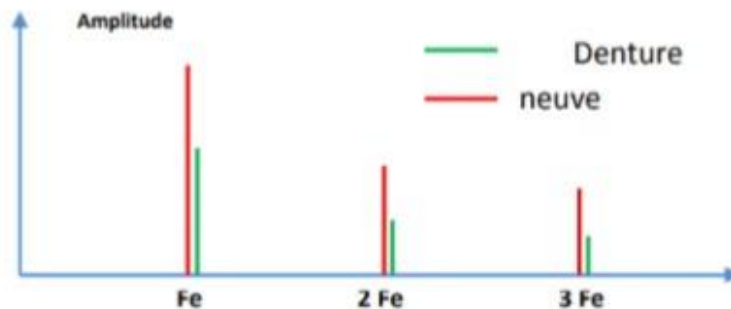


Figure I-18: Image vibratoire théorique d'une denture

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

d. Entraxe insuffisant (jeu insuffisant au fond de denture) :

Si l'entraxe des arbres qui porte les deux roues est insuffisant, il va se produire un engrènement en fond de denture. La dent menante force à l'engagement et au déengagement, c'est ce qui provoque une détérioration des deux côtés de la denture. En analyse spectrale ce phénomène se traduit par l'apparition d'une raie d'amplitude prépondérante à deux fois la fréquence d'engrènement F_e et la disparition partielle, voire totale de l'amplitude à cette fréquence.

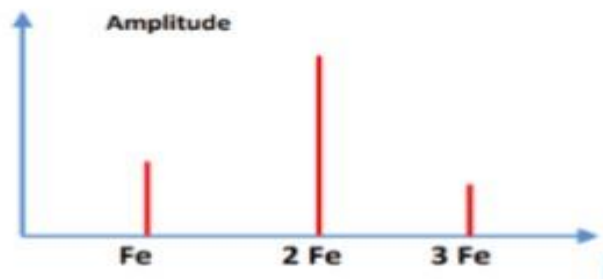


Figure I-19: Image théorique et spectre réel d'un engrènement en fond de denture sur un réducteur.

e. Jeu de fond de denture trop grand :

Ce défaut représente une conséquence d'un choc dur à chaque passage d'une dent à l'autre ("rattrapage" du jeu). On obtient donc un spectre de choc dur, périodique, à la fréquence d'engrènement Figure (I-20).

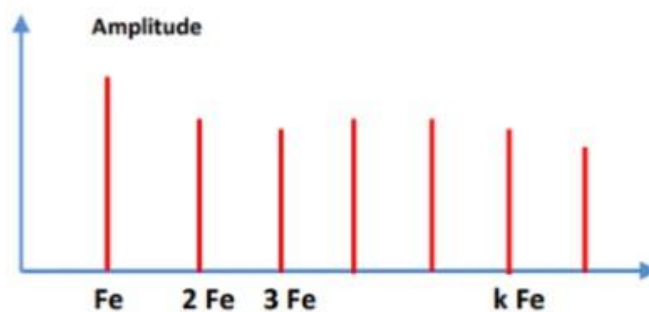


Figure I-20: Jeu de fond de denture trop grand

Ce jeu trop grand peut être :

- Une conséquence de l'usure de la surface de denture, le spectre est alors une "suite logique".
- Dû au montage, le spectre apparaît dès l'origine.

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

II.3.3. Défauts liés aux arbres :

L'arbre d'une machine tournante est un organe qui assure le mouvement de rotation supporté par un ou plusieurs paliers selon la configuration de la ligne d'arbre.

II.3.3.1. Le Déséquilibre (défaut de balourd) [19] :

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor figure (I-21).

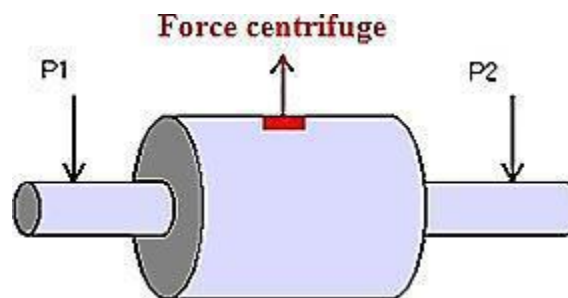


Figure I-21: Tolérances d'usinage sur un rotor. [19]

Le balourd est un défaut qui se rencontre en présence du déséquilibre de l'arbre d'une machine tournante. Ce phénomène se produit à la vitesse de rotation et est causé par une mauvaise répartition spatiale des masses dans la structure, entraînant un déplacement du centre de gravité en dehors de l'axe géométrique du rotor de la machine tournante [20].

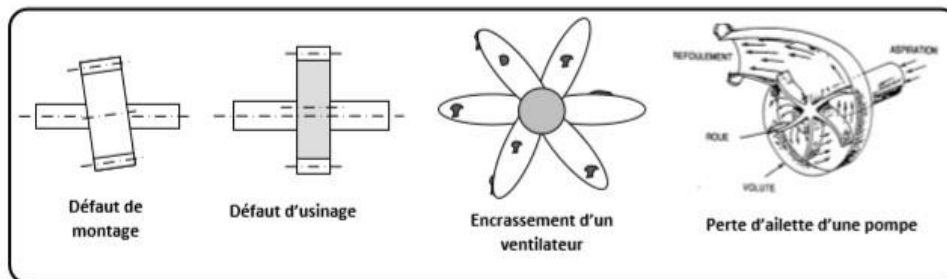


Figure I-22 : exemples de défauts induisant un balourd. [11]

II.3.3.2. Défaut d'alignement [11]:

a. Définition :

Parmi les défauts les plus courants dans les machines tournantes, et l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe.

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

b. Désalignement d'arbres accouplés :

Les axes des deux rotors peuvent présenter un désalignement angulaire au niveau de l'accouplement ou un désalignement radial (défaut de concentricité) ou la combinaison des deux figures (I-23).

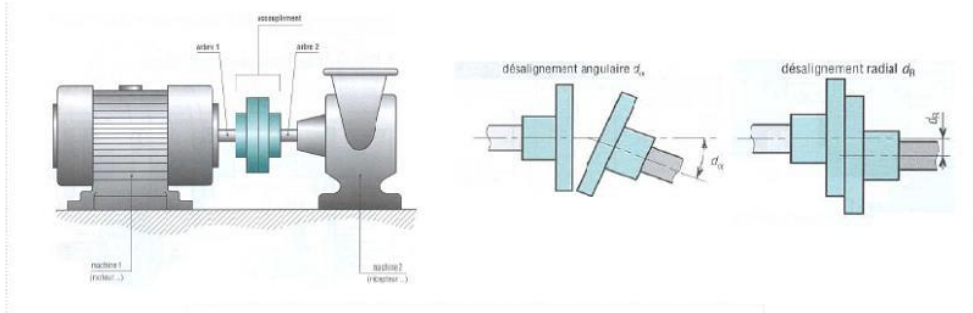


Figure I-23: Défauts d'alignements [4].

• Désalignement radial :

Le signal temporel d'un défaut de désalignement à l'allure de la figure I-24. On retrouve un phénomène périodique à la fréquence de rotation (période = 1 tour), mais également des phénomènes se répétant chaque 1/2 tour et 1/3 tour. Cela se traduira le plus souvent par la présence des composantes de l'ordre 2, 3 ou même 4 fois la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles de la composante d'ordre 1.

Un défaut d'alignement est révélé par un pic d'amplitude prépondérante à, généralement, 2 fois la fréquence de rotation (parfois 3 ou 4 fois). Il apparaît une vibration dans la direction radiale de composante d'ordre 2 de la fréquence de rotation (rarement d'ordre 3, voire exceptionnellement d'ordre 4), avec des amplitudes supérieures aux composantes d'ordre 1 figure (I-25).

Le même phénomène se manifeste dans la direction axiale.

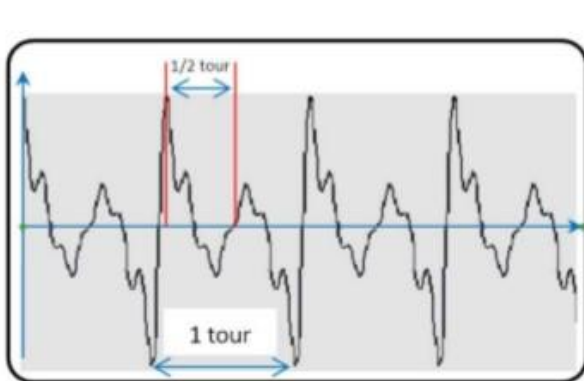


Figure I.24 : Signal temporel d'un défaut d'alignement

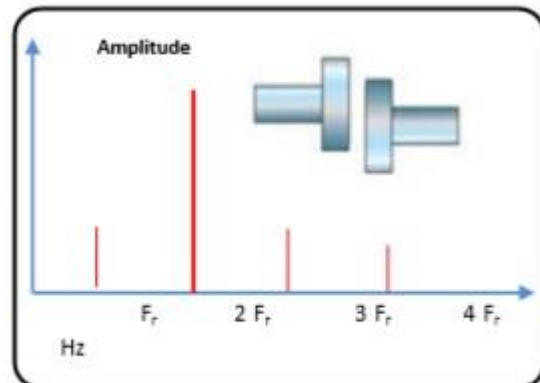


Figure I.25- : Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

- **Désalignement angulaire :**

Il apparaît une vibration axiale de composante d'ordre 1, 2, 3 ou 4 de la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles des composantes radiales correspondantes figure (I-26).

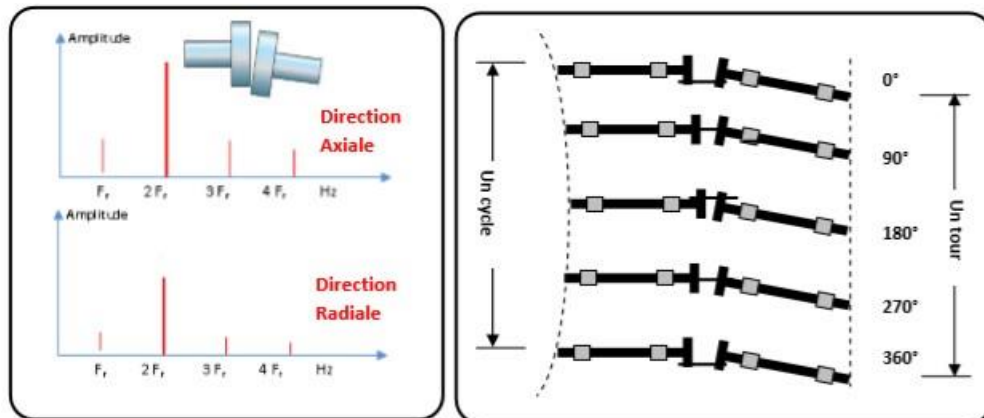


Figure I-26 : Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire

- c. **Désalignement des paliers**

Les axes des deux paliers d'un même corps de machine ne sont pas concentriques (figure I-28). Cette anomalie peut être la conséquence d'un défaut de montage d'un palier, mais également d'un mauvais calage des pattes de fixation ou d'une déformation de châssis (par exemple à la suite de contraintes thermiques), qui se traduit par une flexion de l'arbre du rotor.

La manifestation spectrale de ce type de désalignement est identique à celle du désalignement angulaire.

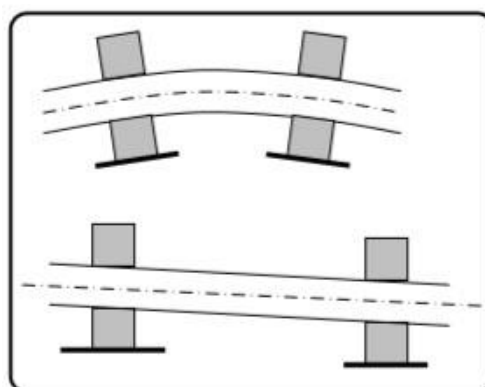


Figure I-27 : Désalignement de paliers se traduisant par une flexion de l'arbre.

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

II.3.4. Défaillances des courroies [14] :

La courroie est un organe de transmission d'un arbre moteur à un arbre récepteur, bien que leur utilisation présente certains avantages par rapport à une transmission à engrenages « moins de bruits et une usure moins importante », la transmission par courroies peut être cible d'une multitude de défaillances tels que ; une détérioration localisée (partie arrachée, défaut de jointure), des courroies trop détendues, un mauvais alignement des poulies ou bien une poulie excentrée.



FigureI-28 : Défaut de courroie. [14]

III. Surveillance des défauts (indicateurs de surveillances) [01]:

Un indicateur est un quantificateur issu d'une grandeur dont l'acquisition est le plus souvent possible en fonctionnement. Il caractérise un ou plusieurs aspects de l'état ou de la performance de l'équipement surveillé.

Son évolution dans le temps doit être significative de l'apparition ou de l'aggravation d'une dégradation ou d'un dysfonctionnement.

La surveillance d'une installation doit reposer sur le suivi d'évolution d'un grand nombre d'indicateurs de sensibilité adaptée à la nature physique des phénomènes dynamiques induits par les défauts dont on veut détecter l'apparition.

Le choix d'un indicateur doit être guidé par une analyse approfondie de l'ensemble des modes de défaillance de l'installation, de leur probabilité d'apparition, de leur rapidité d'évolution et nécessite la connaissance des symptômes ou images vibratoires associées à chaque mode de défaillance.

Parmi ces indicateurs on trouve d'après [17] :

- ✓ Les indicateurs scalaires dérivant de la puissance et de l'amplitude crête du signal vibratoire (valeur efficace « RMS », valeur crête, facteur de crête, Kurtosis) ;
- ✓ Les indicateurs spectraux permettant le suivi de l'évolution de la signature vibratoire (spectre à résolution constante, spectre à pourcentage de bandes constant) ;

Chapitre I : Les défauts mécaniques dans les machines tournantes

- ✓ Les indicateurs spécifiques associant à la détection précoce d'un défaut particulier (amplitude d'une raie spectrale, amplitudes des harmoniques spectraux).

L'évolution de ses indicateurs permet un déclenchement d'alerte d'une dégradation des fonctionnements, sans pour autant désigner les éléments défectueux.

IV. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous nous sommes intéressés à distinguer les différents défauts mécaniques des machines tournantes, nous avons traité essentiellement des généralités et des définitions fondamentales sur les différents défauts mécaniques des machines tournantes, ainsi qu'aux méthodes de surveillance et de la détection de ses défauts, essentiellement des indicateurs de surveillances qui ont une importance capitale dans la maintenance industrielle, dont l'objectif est de mieux gérer les interventions, en fonction de l'état réel des organes, d'une machine, de leur usure ou dégradation.

CHAPITRE 02

ETAT D'ART SUR LA SELECTION DES INDICATEURS DE SURVEILLANCE

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

I. Introduction :

L'indicateur de surveillance des défauts mécaniques des machines tournantes est un paramètre mesuré régulièrement pour évaluer l'état de fonctionnement et pour détecter les signes précurseurs de défaillance de ces machines.

Les indicateurs de surveillance peuvent détecter des défauts mécaniques tels que le déséquilibre, les défauts des roulements, des engrenages et d'autres problèmes mécaniques.

Il existe plusieurs types d'indicateurs de surveillance : indicateurs statistiques, fréquentiels et composés. Pour sélectionner les indicateurs les plus pertinents on utilise des méthodes de sélection telles que l'analyse en composantes principales et le critère de Fisher.

II. Méthodes d'analyse vibratoires :

II.1.L'analyse spectrale (L'analyse en fréquence) :

L'analyse spectrale est une technique bien définie et utile qui permet de décomposer des signaux complexes et difficiles à interpréter en un certain nombre de composantes fondamentales définies par la fréquence et l'amplitude..Le principe de l'analyse spectrale consiste à décomposer l'énergie du signal à analyser sur des bandes de fréquences [21].

Elle s'appuie sur la transformée de Fourier, qui permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître le contenu spectral d'énergie ou de puissance, présent dans le signal à la fréquence f , et donc de détecter la présence d'un défaut générant un choc périodique à une fréquence de défaut. La comparaison de cette fréquence avec celle des défauts théoriques potentiels (fréquences caractéristiques) sur le roulement permet sa localisation dans la pratique.

On utilise la transformée de Fourier discrète rapide (FFT) sur des signaux numérisés [22].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{II. 1})$$

Ou :

$X(f)$ est la transformée de Fourier

t est la variable temps.

f est la variable fréquence

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

$$X(k\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nt_e) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \quad (\text{II.2})$$

Ou :

$X(k\Delta f)$: la transformée de Fourier discrète rapide.

t_e : la période d'échantillonnage du signal temporel.

n : le numéro de l'échantillon.

k : le numéro de la ligne fréquentielle.

Δf : le pas d'échantillon.

N : est le nombre d'échantillons prélevés.

Pour illustrer l'approche fréquentielle de la détection des défauts de roulements, nous présentons sur la figure (II.1) le spectre d'un roulement défectueux.

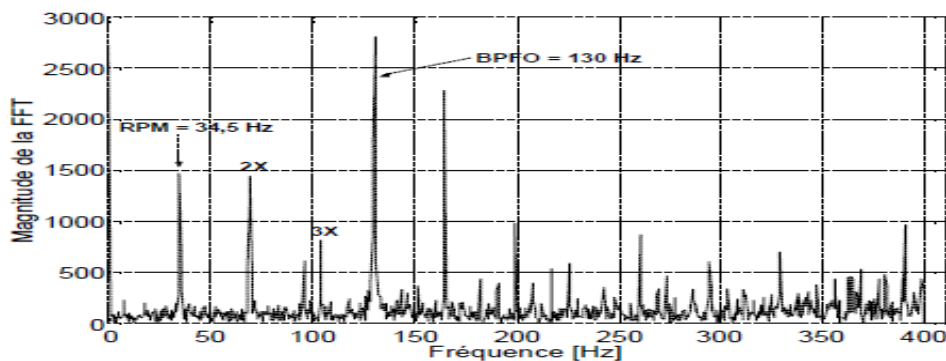


Figure II.1 : Spectre d'un roulement avec un défaut sur la bague extérieure [23].

Sur le spectre apparaît, en plus des composantes fréquentielles du système (vitesse de rotation 34.5 Hz et ses harmoniques), un pic correspondant à environ 130 Hz qui n'est pas une harmonique de la vitesse de rotation mais une fréquence typique d'un défaut sur la bague extérieure [23].

II.2.L'analyse d'enveloppe :

L'analyse d'enveloppe est une technique de détection précoce des défauts de type choc, l'analyse d'enveloppe est relativement facile à mettre en œuvre. Elle est appliquée pour la surveillance et le diagnostic des machines tournantes dont les signaux sont typiquement non-stationnaires. Elle permet l'étude des phénomènes de modulations. Son principe consiste à filtrer le signal mesuré par un filtre passe-bas autour des fréquences de résonances identifiées généralement par la transformée de Fourier. Ensuite, la transformé de Hilbert est appliquée afin d'extraire l'enveloppe du signal. Dans certains cas, l'analyse d'enveloppe est suivie d'une analyse de Fourier appelée spectre d'enveloppe qui permet de révéler les éventuelles structures périodiques de l'enveloppe et d'extraire des informations basses

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

fréquences difficiles à détecter sur une porteuse haute fréquence. Ceci est très intéressant dans l'analyse des systèmes mécatroniques ayant une différence dans l'évolution dynamique. Par exemple, une analyse d'enveloppe d'un signal électrique peut caractériser la présence des défauts mécaniques dans le système [21].

La figure (II.2) montre l'exemple d'une analyse d'enveloppe d'un signal mesuré sur un roulement défectueux. Le roulement, du type 6200, est monté sur un banc d'essais et tourne à 50 Hz [23].

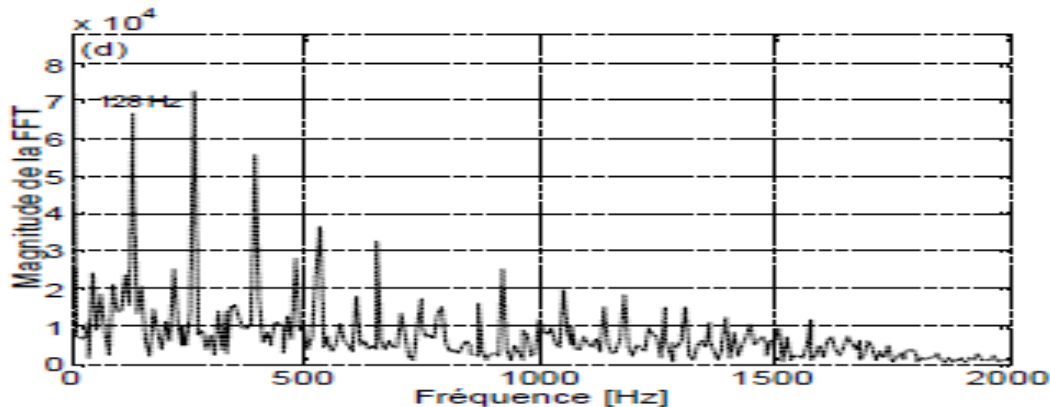


Figure II.2 : Analyse d'enveloppe du signal filtré [23].

Le spectre d'enveloppe issu de la transformée de Hilbert met en évidence la fréquence d'un défaut sur la bague extérieure (128 Hz) ainsi que certaines de ses harmoniques [23].

II.3. Analyse cepstrale :

Le Cepstre se définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier :

$$C[s(t)] = TF^{-1} \log |TF[s(t)]|^2 \quad (\text{II.3})$$

Il a pour but d'identifier et de quantifier toutes les structures périodiques contenues dans le spectre. Il permet de définir des indicateurs adaptés à la détection précoce des défauts induisant à des stades plus ou moins avancés, des énergies vibratoires que les indicateurs issus de techniques traditionnelles mettraient difficilement en évidence. Le cepstre et ses dérivées représentent les amplitudes des composantes dont les quéfrenes correspondent aux périodes de répétition des chocs induits par les défauts de la machine surveillée. Il est largement utilisé pour la détection de défauts d'engrenage et dans une moindre mesure pour les défauts de roulements [24].

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

La figure (II.3) suivante représente le cepstre calculé à partir d'un signal mesuré sur un roulement du type 6200 monté sur un banc d'essais et tournant à 50 Hz.

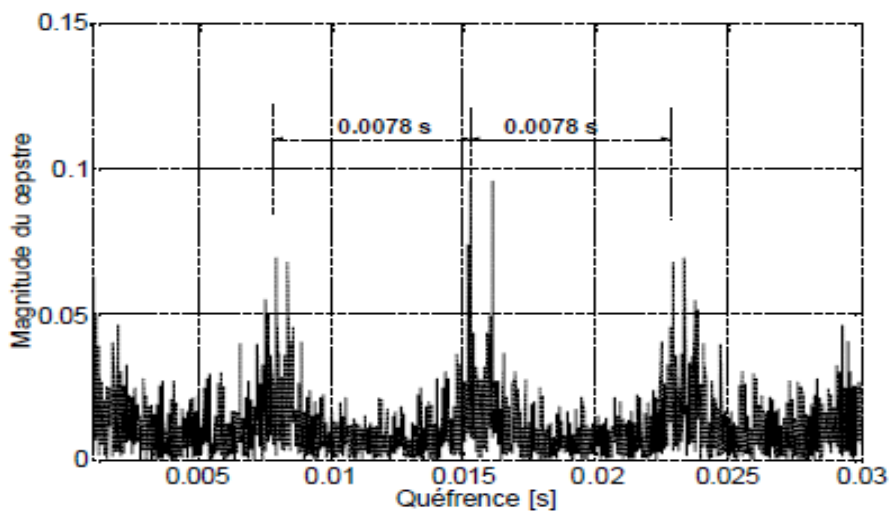


Figure II.3: Cepstre d'un roulement défectueux. [23]

Sur ce cepstre apparaissent des pics dont l'espacement des fréquences correspond à une période égale à 0.0078 s, soit une fréquence d'environ 128 Hz, qui est en effet celle d'un défaut sur la bague extérieure [23].

III. Types d'indicateurs :

Les indicateurs de surveillance jouent un rôle essentiel dans le diagnostic des machines tournantes. Ils permettent de détecter, quantifier et analyser les signes précurseurs de défaillance dans ces machines. En fournissant des informations sur l'état de santé et les performances des machines, ces indicateurs contribuent à une maintenance préventive efficace et à une réduction des coûts liés aux arrêts non planifiés.

Ces indicateurs peuvent être classés en plusieurs types en fonction de la nature des informations qu'ils fournissent. Voici quelques-unes des types courantes :

III.1. Indicateurs temporels :

Les indicateurs temporels sont des outils statistiques appliqués à un signal temporel puis traités afin d'aider à l'analyse des vibrations. Ils permettent de suivre l'évolution d'une grandeur décrivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal. Sa valeur peut ne pas avoir de signification intrinsèque, c'est son évolution dans le temps qui est significative du défaut. Il existe de nombreux indicateurs dans la littérature qui ont été employés pour le diagnostic vibratoire automatisé, et certains sont le résultat de la combinaison de plusieurs d'entre eux. Zhang a proposé un ensemble d'indicateurs pour le diagnostic automatisé des défauts de roulements [25].

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

Il s'agit des indicateurs statistiques suivants:

III.1.1. La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square) :

Le RMS, nommée aussi valeur efficace ou moyenne quadratique d'un signal, est la racine carrée du moment d'ordre deux et est calculé comme montré par l'équation (II.4) [25]

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [s(t)]^2} \quad (\text{II. 4})$$

$s(t)$: La valeur du signal à chaque point d'échantillonnage.

N_e : Le nombre d'échantillons dans le signal $s(t)$.

Le RMS est un des premiers indicateurs utilisés en industrie, dû notamment à sa simplicité et à sa rapidité d'exécution. Une variation excessive du niveau RMS signifie en général un changement de l'état de fonctionnement et donc une défaillance. L'un des principaux inconvénients du RMS est qu'il donne souvent une alerte tardive, surtout pour les défauts de roulements, où la variation du signal due à l'apparition du défaut est masquée par d'autres composantes d'amplitudes plus élevées [26].

III.1.2. Kurtosis :

Le Kurtosis, donnée par :

$$Ku = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{(x_i - \bar{x})^4}{\sigma_x^4} = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_1^N (x_i - \bar{x})^4}{[\frac{1}{N} \sum_1^N (x_i - \bar{x})^2]^2} \quad (\text{II. 5})$$

Où:

x_i : L'amplitude de l'échantillon du signal i .

\bar{x} : La valeur moyenne des amplitudes.

N : Nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

σ_x : L'écart type.

M_4 : Le moment statistique d'ordre 4.

M_2 : Le moment statistique d'ordre 2

C'est un indicateur adimensionnel permettant de quantifier la platitude d'une distribution d'un signal vibratoire. Il a l'avantage de ne pas être affecté par les changements des vitesses de rotation et des charges de la machine.

Un roulement en bon état produit un signal vibratoire qui suit une distribution gaussienne avec un Kurtosis proche de 3 compris entre (2.8 – 3.2). Par contre, la présence

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

d'un défaut précoce engendre un signal transitoire et périodique qui modifie l'allure de la distribution avec un Kurtosis plus élevé. Le Kurtosis est le paramètre le plus sensible pour mesurer ce changement de distribution [27]

Kurtosis	Etat
2.8 à 3.2	Bon
3.2 à 4	Moyen
> 4	Critique

Tableau II. 1 : Seuils du Kurtosis : Cas d'un roulement [27]

III.1.3. valeur crête :

La valeur crête, qui représente la valeur maximale du signal, est très utilisée dans le suivi vibratoire des machines tournantes, car une augmentation de cette grandeur, donc de l'énergie vibratoire, est signe d'une éventuelle dégradation. La valeur crête est donnée par [28]:

$$A_C = \sup_{1 \leq i \leq N} |x_i| \quad (\text{II. 6})$$

III.1.4. Facteur crête:

Le facteur crête FC est un indicateur plus spécifique, qui permet d'observer de plus près le signal vibratoire. Le suivi du facteur crête permet une détection plus précoce des défauts en mesurant le rapport entre la valeur maximale du module du signal (valeur crête) sur la valeur efficace, comme montré par l'équation (II.7).

$$FC = \frac{\text{Valeur crête}}{RMS} = \frac{\text{Sup}|s(t)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [s(t)]^2}} \quad (\text{II. 7})$$

Le facteur crête FC est un indicateur plus pertinent, qui permet d'étudier plus précisément le signal vibratoire. Le suivi du facteur crête permet une localisation plus rapide des pannes en mesurant le rapport entre la valeur maximale du module du signal (valeur crête) sur la valeur efficace. D'autres indicateurs ont été conçus sur la base du facteur crête, tels que le facteur K, en multipliant la valeur crête par la valeur efficace ou la valeur crête à crête, mesurant l'écart entre les amplitudes des pics supérieur et inférieur. [3]

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

Quelques valeurs caractéristiques du facteur de crête sont résumées par le tableau suivant:

Nature de vibration	$F_C = \frac{V_C}{RMS}$	Causes possibles
Périodique de type sinusoidal.	1.5 à 2.5	Balourd Désalignement.
Aléatoire de type impulsional.	3 à 4	Roulement en bon état.
Périodique de type impulsional.	>4	Roulement écaillé.

Tableau II.2 : récapitulatif des indicateurs [29].

III.1.5. Le Skewness [28]:

Le skewness (skew) est basé sur le moment d'ordre 3, cet indicateur donne une mesure de l'asymétrie du signal par rapport à sa valeur moyenne, d'où son efficacité pour la détection de tout changement de cette caractéristique. S'exprime par :

$$Skew = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((x_i - \bar{x})^3)}{[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (II.8)$$

III.2. Indicateurs fréquentiels [30]:

Pour des machines tournantes, on sait qu'il est intéressant de transformer les données temporelles sous la forme d'une représentation fréquentielle (densité spectrale de puissance (DSP)) qui donne directement la part d'énergie présente pour la composante spectrale recherchée. Les indicateurs sont alors le calcul de l'énergie " e " par bande spectrale "i", dont les bornes fréquentielles sont choisies au vue des évolutions de cette énergie en fonction des états de la machine (bon état, peu dégradé, fortement dégradé, etc.).

$$e_i = \sum_{n=K_i}^{K_i+l} DSP[n] \quad \begin{cases} i = 1, \dots, p \\ n = [K_1, \dots, K_1 + l], [K_2, \dots, K_2 + l], \dots \end{cases} \quad (II.9)$$

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

On obtient ainsi " p " valeurs qui représentent les parts d'énergies totales présentes dans les " p " zones de la DSP.

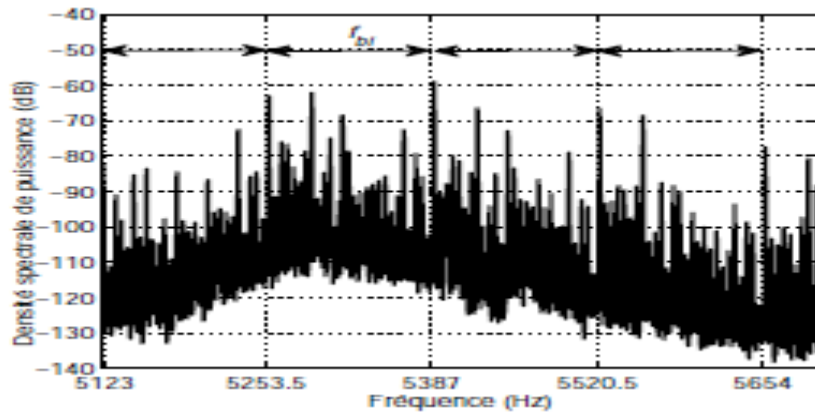


Figure II.4 : Densité spectrale de puissance du signal vibratoire d'un roulement avec un défaut localisé sur la bague interne [31].

IV. Choix des indicateurs en fonction du cas étudié [32]:

Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts, on établit une courbe d'évolution de l'indicateur au cours du temps. Sur cette courbe, on définit différents seuils correspondant à un niveau d'alerte, à une alarme, à un niveau de défaillance, ces niveaux sont établis soit par expérience soit en appliquant une norme (pour les roulements, on utilise des abaques de sévérité vibratoire pour définir les différents seuils).

IV.1. Le kurtosis [3]:

Plus spécifique au dépistage des défauts de roulements, le kurtosis est une grandeur statistique permettant d'analyser le caractère « pointu » ou « plat » d'une distribution, et donc d'observer la forme du signal. Dérivé du moment statistique d'ordre quatre, il est défini comme le rapport de la valeur moyenne du signal élevée à la puissance 4 sur le carré de son énergie.

IV.2. La valeur crête [33]: VC

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

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

IV.3. RMS :

Ce paramètre est le plus couramment utilisé en analyse vibratoire, mais il est beaucoup imprécis dans le cas des roulements, car il ne varie de façon significative que lorsque le défaut devient très sévères, il est encore utilisable mais pas tout seul. Donc il convient de lui associer un autre indicateur par exemple le skew pour en savoir plus de l'état d'un roulement avec une certaine certitude. [33]

Le choix de ou des indicateurs (Tableau I.2) [29] les mieux appropriées est fonction de:

- l'organe à surveiller (roulement, engrenage, palier, ...),
- la nature des vibrations (sinusoïdale, impulsionnel, ...),

Ces indicateurs doivent permettre une surveillance d'anomalies à un stade précoce, déterminant la nature et les états de dégradation Selon donc les défauts redoutés, on choisira le ou les indicateurs les mieux appropriés en s'aidant du tableau suivant [Felkaoui]:

		Indicateurs
Quelques exemples d'organes Surveillés	Roulements	Facteur Crête Kurtosis Démodulation d'amplitude, Cepstre
	Engrenage	Kurtosis, Démodulation d'amplitude, Cepstre Bispectre, bicorrélation, bispectre
Nature des vibrations générées	Vibration de type impulsionnel	Facteur Crête, Kurtosis, Démodulation d'amplitude, Cepstre

Tableau II.3: les différents indicateurs [Felkaoui][29]

V. Méthodes de sélection des indicateurs et leurs applications :

Les méthodes d'extraction de paramètres permettent de construire un sous-espace de dimension inférieure à partir de l'espace initial pour entre autres décrire et visualiser l'ensemble d'apprentissage. Seulement cette procédure ne permet pas de réduire le nombre de paramètres à calculer pour chaque observation (étant donné que les composantes des vecteurs projetés sont des combinaisons linéaires des composantes des vecteurs initiaux). Or réduire le nombre de paramètres en ne sélectionnant que les plus discriminants offre plusieurs avantages: [34]

- le temps de calcul est réduit non seulement pour l'extraction de paramètres, mais aussi pour la décision concernant toute nouvelle observation.

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

- les performances de la classification sont améliorées.

V.1. L'analyse en composantes principales (ACP) [35]:

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique statistique multivariée. Les techniques statistiques multivariées sont des outils puissants, capables de compresser des données et de réduire leur dimensionnalité de sorte que l'information essentielle soit maintenue et plus facile à analyser que dans l'ensemble original des données. Ces techniques peuvent également manipuler le bruit et la corrélation pour extraire efficacement l'information. La fonction principale de ce type de techniques est, par le biais d'une procédure mathématique, de transformer un certain nombre de variables corrélées en un ensemble plus petit de variables non corrélées.

L'ACP est essentiellement basé sur une décomposition orthogonale de la matrice de covariance des variables du processus le long des directions qui expliquent la variation maximale des données, c'est-à-dire que cette méthode recherche une projection des observations sur des axes orthogonaux. De ce fait, le premier axe contient la plus grande variation. Le deuxième axe contiendra la seconde plus grande variation orthogonale au premier.

Le but principal de l'ACP est donc de trouver un ensemble de facteurs (composantes) qui ait une dimension inférieure à celle de l'ensemble original de données et qui puisse décrire correctement les tendances principales. L'ACP est une procédure qui ne prend en compte que les variables du processus.

Exemple d'application d'ACP [36]:

Pour comprendre l'idée derrière l'Analyse en Composantes Principales nous allons utiliser un exemple très simple en 2 dimensions. On prend 12 individus pour lesquels on connaît l'âge et le salaire et on les représente sur un graphique. Evidemment avec 2 variables c'est très simple mais on garde en tête que l'objectif d'une ACP c'est de simplifier les informations avec bien plus de variables.

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

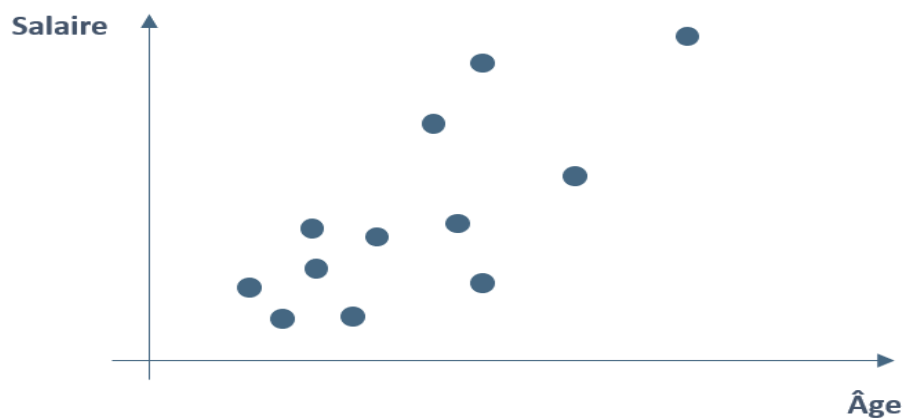


Figure II.5 : Représentation graphique des 12 individus [36].

Au lieu d'utiliser le salaire et l'âge, l'ACP va chercher à construire de nouvelles variables (combinaison linéaires des variables initiales) qui permettent d'expliquer plus d'informations

1er axe de l'ACP :

On cherche une première variable (figure II.6) qui permettra de résumer le plus possible le salaire et l'âge. C'est à dire un axe pour lequel la variance des projections des points sur cet axe est maximale. On part du centre de gravité du nuage de point et on cherche donc l'axe qui explique mieux les données. Ça donne :

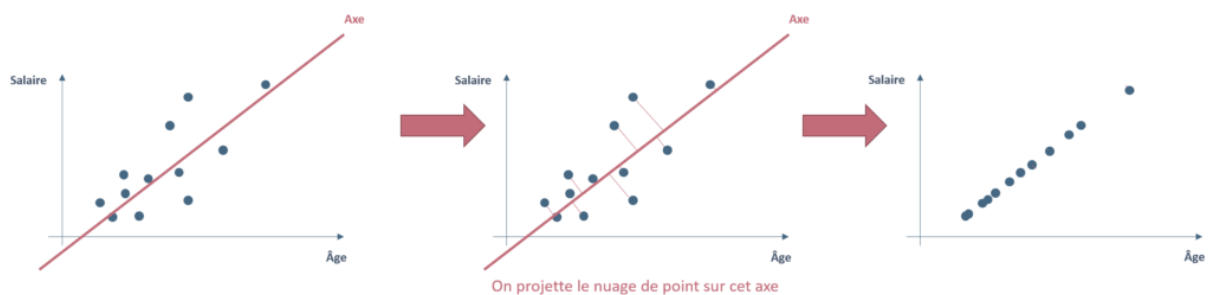


Figure II.6 : Représentation du 1er axe de l'ACP [36].

Avec le deuxième axe, on résume moins d'information. Notamment pour les premiers points, on voit qu'il est plus difficile de les différencier. Puisque la variance des projections est plus élevée, le 1er axe est celui qui serait retenu.

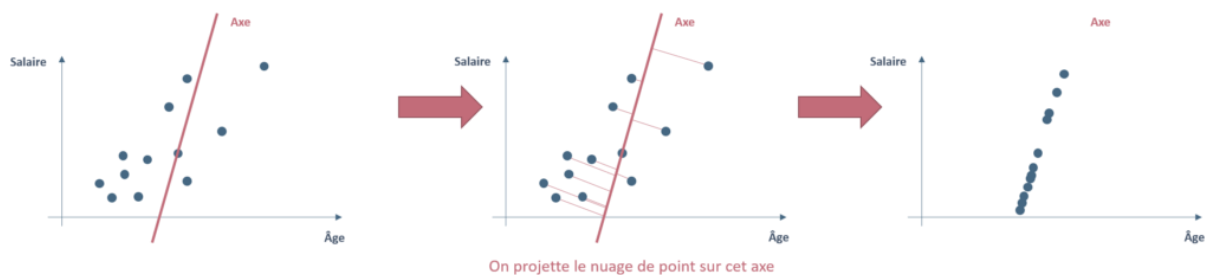


Figure II.7 : Représentation du 2eme axe de l'ACP [36].

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

V.2. L'Analyse en Composantes Indépendantes (ACI) [3]:

Parallèlement à l'ACP, l'Analyse en Composantes Indépendantes (ACI) a été initialement développée pour la séparation aveugle des sources, mais nous pouvons lui trouver dans la littérature une multitude d'applications : la compression de données, la localisation de sources, et comme dans ces travaux l'extraction et la transformation d'indicateurs.

Par opposition à l'ACP, L'ACI utilise des statistiques d'ordres supérieurs, et cherche à expliquer un vecteur aléatoire n -dimensionnel x , par la dentition de composantes qui soient linéairement et statistiquement indépendantes (l'indépendance implique la dé-corrélation, l'inverse n'est pas forcément vrai), sans être nécessairement orthogonales. Il existe un grand nombre de méthodes pour mesurer l'indépendance, scindées en deux principales familles : celle basée sur le maximum de vraisemblance, et celle basée sur la non-gaussianité. La méthode choisie détermine le principe de l'algorithme d'ACI.

L'approche utilisée dans ces travaux, s'appuie sur l'algorithme FastICA, adoptant des mesures de «non gaussianité», pour maximiser l'indépendance entre les composantes.

V.3. Critere de FISHER [30]:

L'analyse de Fisher est une technique d'analyse factorielle discriminante, qui permet la projection de la base de données sur une surface informative de dimension réduite. Contrairement à l'ACP, il ne s'agit plus d'extraire les paramètres les plus représentatifs de la base de données, mais les paramètres les plus discriminants, vis-à-vis des classes représentées dans la base de données : le problème est donc la détermination d'un sous ensemble d'axes discriminants.

L'objectif est d'augmenter la séparabilité des classes : la détermination des axes discriminants est effectuée de manière à ce que la variation interclasses soit maximisée (dispersion des classes entre elles) au regard de la variation intra classes (dispersion à l'intérieur d'une classe).

D'une manière générale, pour M classes et pour un paramètre α , le critère de Fisher $J(\alpha)$ s'écrit :

$$J(\alpha) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{M-1} \frac{(m_i(\alpha) - m_j(\alpha))^2}{N_i \sigma_i^2(\alpha) + N_j \sigma_j^2(\alpha)} \quad (\text{II. 10})$$

Avec m_i : centre de gravité de la classe ω_i .

σ_i^2 : Variance de la classe ω_i .

N_i : Nombre de vecteurs dans la classe ω_i

Chapitre II : Etat d'art sur la sélection des indicateurs de surveillance

Dans le domaine du diagnostic des défauts des roulements, le critère de Fisher peut être utilisé pour sélectionner les indicateurs de surveillance les plus pertinents afin de discriminer efficacement les différentes conditions de fonctionnement des roulements, y compris les défauts.

Il est important de noter que la sélection des indicateurs de surveillance dépendra du contexte spécifique, du type de défauts de roulement que vous souhaitez détecter et des données disponibles. Il est également recommandé de compléter l'utilisation du critère de Fisher avec d'autres techniques d'analyse de données et de diagnostic des défauts pour obtenir une évaluation complète de l'état des roulements.

VI. Conclusion :

La sélection des indicateurs de surveillance des machines tournantes est cruciale pour assurer une maintenance efficace et préventive. L'analyse en composantes principales et le critère de Fisher sont parmi les méthodes de sélection des indicateurs de surveillance des machines tournantes qui jouent un rôle essentiel dans le maintien de la fiabilité et de la performance de ces équipements. En tenant compte des caractéristiques spécifiques de chaque machine, de l'importance des paramètres mesurés et de leur capacité à détecter les défaillances potentielles. Une sélection judicieuse des indicateurs garantit une surveillance fiable et permet d'éviter les pannes coûteuses et les temps d'arrêt imprévus.

CHAPITRE 03
DEMARCHE EXPERIMENTALE

Chapitre III : démarche expérimentale.

Chapitre III : démarche expérimentale.

I. Introduction :

L'identification d'indicateurs de surveillance les plus pertinents est essentielle pour assurer la surveillance efficace des machines tournantes. Ces indicateurs permettent de détecter les signes précurseurs de défauts et de prendre des mesures préventives pour éviter les pannes coûteuses et les temps d'arrêt imprévus.

Dans le cadre de notre étude sur la sélection des indicateurs de surveillance des machines tournantes, nous avons effectué une recherche bibliographique approfondie pour recueillir des informations sur les différents paramètres et mesures utilisés dans ce domaine.

Le deuxième chapitre de notre travail présente une synthèse des méthodes et des techniques les plus couramment utilisées pour sélectionner les indicateurs de surveillance appropriés.

La structure de ce chapitre se compose de trois parties distinctes. Dans la première partie, nous introduisons le banc d'essai des roulements étudié ainsi que les signaux vibratoires prélevés pour mener notre étude expérimentale. La deuxième partie décrit les différentes étapes de mise en œuvre du processus de sélection des indicateurs à l'aide du critère de Fisher. Enfin, la troisième partie est dédiée à l'implémentation de ces méthodes dans l'environnement MATLAB.

ce chapitre vise à fournir une vision claire et complète des différentes méthodes disponibles pour la sélection des indicateurs de surveillance des machines tournantes, afin d'aider les professionnels de la maintenance à prendre des décisions, et à mettre en place des stratégies de surveillance efficaces.

II. Application de la méthode de sélection d'indicateurs de surveillance des défauts mécaniques des roulements:

La méthodologie choisie pour la sélection des indicateurs de surveillance des défauts d'une machine tournante est présentée dans ce qui suit :

II.1. Prétraitement de données :

En pratique, il existe un ensemble d'étapes principales dans la mise en œuvre de cette méthode avant d'obtenir le résultat. Ces étapes sont décrites dans ce qui suit :

Chapitre III : démarche expérimentale.

II.1.1. Acquisition des signaux :

Dans cette étape, nous enregistrons les signaux vibratoires correspondant aux différents états de fonctionnement du dispositif étudié. Cette étape est effectuée à l'aide d'une chaîne de mesure (capteur, conditionneur, convertisseur, système numérique de calcul...etc.).

II.1.2. décomposition des signaux :

Pour avoir suffisamment de données, on a devisé la base de données initiale qui contient quatre signaux dont un est sans défaut et trois avec défauts, chaque signal est devisé en 28 tranches, pour avoir un nombre total de tranches égale à 112 tranches.

II.1.3. Filtrage passe bande autour d'une fréquence caractéristique de défaut :

Lorsqu'un défaut de roulement se produit, la machine fonctionne de manière anormale. Pour détecter ce type de défaut, nous utilisons un filtre qui permet de ne conserver que la partie du signal contenant l'information pertinente. Ce filtre, appelé filtre passe-bande, est centré autour des fréquences caractéristiques des défauts et permet de réduire les composantes indésirables du signal. Ainsi, le filtre passe-bande joue un rôle important dans l'isolation et la mise en évidence des caractéristiques spécifiques liées aux défauts de roulement.

II.1.4. Calcul des indicateurs temporels :

Lors de cette étape, nous choisissons une série d'indicateurs statistiques fiables à partir de différentes mesures et analyses afin de diagnostiquer la présence d'un défaut. Ces indicateurs nous fournissent des informations sur l'état de la machine, et nous calculons et comparons leurs valeurs pour déterminer si un défaut est présent ou non. Ainsi, ces indicateurs jouent un rôle essentiel dans le processus de diagnostic.

II.1.5. Calcul des indicateurs fréquentiels :

Dans cette étape, nous calculons les indicateurs fréquentiels dans différentes bandes spectrales. L'un de ces indicateurs est la puissance de Welch, qui représente l'énergie du signal. L'objectif est de combiner les indicateurs temporels et fréquentiels afin d'obtenir une analyse complète du signal. Ainsi, cette étape nous permet d'exploiter les différentes caractéristiques du signal pour un diagnostic précis.

II.1.6. Construction de la base de données :

Les étapes précédentes consistent à former une base de données, qui représente les observations sous forme d'une matrice de dimensions $(N \times M)$, où N est le nombre d'observations et M est le nombre de paramètres sélectionnés.

Chapitre III : démarche expérimentale.

II.2. Sélection des paramètres selon leur pouvoir de séparation (critère de Fisher) :

Après avoir sélectionné visuellement ces indicateurs, le critère de Fisher permet une sélection automatique des paramètres calculés en fonction de leur capacité à distinguer les différentes classes de défauts. Pour cette tâche, la méthode du critère de Fisher a été choisie. Les paramètres sont ensuite classés en fonction de leur pouvoir discriminant, du plus élevé au plus faible.

III. Implémentation sous Matlab de la méthode de sélection d'indicateurs de surveillance des défauts mécaniques des roulements :

III.1. Importation des signaux :

Les quatre signaux provenant de la bague intérieure du roulement sont importés et affichés dans l'espace de travail. Le script débute en supprimant toutes les variables et les textes présents grâce aux commandes **clear all** et **clc**. Ensuite, la commande **Load** ('nom du fichier') est utilisée pour charger chaque signal individuellement.

III.2. Préparation des tranches de données :

Dans cette étape chaque signal est divisé en un ensemble de tranches, dont la variable **Nt** représente le nombre de tranches souhaitées (dans ce cas, 28). Une matrice **Noy** est créée pour stocker les tranches de données. Chaque ligne de la matrice représente une tranche et chaque colonne représente un échantillon de la tranche.

III.3. Calcul des indicateurs temporels :

Le sous-programme présent dans **l'annexe 3.1** effectue les étapes suivantes : tout d'abord, il centre le signal. Ensuite, il applique un filtre passe-bande afin de faciliter la recherche des défauts en isolant des bandes fréquentielles spécifiques. Le filtrage électronique est réalisé à l'aide des commandes **fir1** et **filter**. Pour chaque signal, il y a 4 bandes fréquentielles obtenues après le filtrage. Après filtrage, les cinq indicateurs temporels l'écart-type (ET), le facteur de crête (F_c), la valeur crête-crête (A_{cc}), le facteur dissymétrie (skewness (K_s)), et le facteur d'aplatissement (kurtosis (K_u)) ont été calculés pour chaque bande (1-1500) Hz, (1500-3000) Hz, (3000-4500) Hz, (4500-6000) Hz, plus la bande totale (1-6000) Hz.

III.4. Calcul des indicateurs fréquentiels :

III.4. 1. Calcul des bandes spectrales :

Les indicateurs fréquentiels sont calculés sur le spectre d'enveloppe et cela dans la bande totale et en 5 bandes fréquentielles de largeur de 1000HZ : la bande totale [0-6000HZ], la bande 1 [0-1000HZ], la bande 2 [1000-2000HZ], la bande 3 [2000-3000HZ], la bande 4

Chapitre III : démarche expérimentale.

[3000-4000HZ], et la bande 5 [4000-5000HZ]. Pour calculer le spectre d'enveloppe, un sous-programme a été conçu (**annexe 3.1**).

III.4. 2. Calcul des indicateurs fréquentiels :

Le sous-programme (**annexe 3.1**) permet de calculer les indicateurs fréquentiels qui sont des énergies issues du spectre d'enveloppe des différentes tranches calculés dans la bande totale et en 5 bandes fréquentielles de largeur de 1000HZ. Les indicateurs fréquentiels sont : EBT (énergie calculée dans la bande totale [0-6000HZ]), E_{B1} (énergie dans la bande 1 [0-1000HZ]), E_{B2} (énergie dans la bande 2 [1000-2000HZ]), E_{B3} (énergie dans la bande 3 [2000-3000HZ]), E_{B4} (énergie dans la bande 4 [3000-4000HZ]) et E_{B5} (énergie dans la bande 5 [4000-5000HZ]).

III.4.3. Construction de la base de donnée :

Les indicateurs temporels et fréquentiels sont regroupés dans une matrice appelée BD1 (**annexe 3.1**). Cette matrice peut servir de base de données pour l'analyse ultérieure ou l'apprentissage de modèles de diagnostic des défauts.

Le problème qui se pose maintenant après l'exécution du programme précédent (**annexe 3.1**), c'est que les indicateurs calculés ne sont pas tous valables pour le diagnostic c'est-à-dire ne donnent pas de bons résultats sur l'état réel du banc d'essai. Donc on fait recours à une méthode de sélection de paramètres pour classer ces derniers selon leurs pouvoirs de discrimination ou de séparation des différentes classes de défauts.

III.5. la sélection des indicateurs par le critère de Fisher :

Le programme (**annexe 3.2**) a été développé pour mettre en œuvre la méthode de sélection par le critère de Fisher. Ce programme permet de sélectionner les indicateurs de la base de données en fonction de leur pouvoir de séparation entre les différentes classes. Une fois le programme exécuté, les indicateurs sont classés du plus grand pouvoir de séparation au plus faible.

IV. Banc d'essais de roulements étudié "bearing data center" : [37]

Ce site Web " www.eecs.cwru.edu/laboratory/bearing/welcome_overview.htm ⁽¹⁾ ; permet d'accéder à la base de données des essais de roulements à billes, normaux ou défectueux du centre de données de roulements de l'université (the case western Reserve). Cette base de données a été utilisée dans plusieurs études pour valider l'efficacité des nouveaux algorithmes de diagnostic des défauts de roulements (Gryllias et Antoniadis, 2012); (Harrouche et Felkaoui, 2014) ; (Zhang et al, 2013); (Shen et al, 2013) ; (Fedala, 2005); (Loparo, 2013)

(1): The Case Western Reserve University - Bearing Data Center. Cleveland, Ohio. USA

Chapitre III : démarche expérimentale.

La configuration du banc d'essai, illustrée dans la Figure (III.1), comprend les éléments suivants : un moteur "2HP"⁽²⁾ à gauche de l'image, un accouplement transducteur/encodeur au centre et un dynamomètre à droite de l'image. Ces composants principaux sont accompagnés de circuits de commande qui ne sont pas visibles dans l'image. Ensemble, ils permettent de simuler les conditions de fonctionnement des machines tournantes et de collecter des mesures telles que les vibrations et les forces générées, essentielles pour notre étude.

(2) HP: horsepower, 1hp = 745, 69987 wat

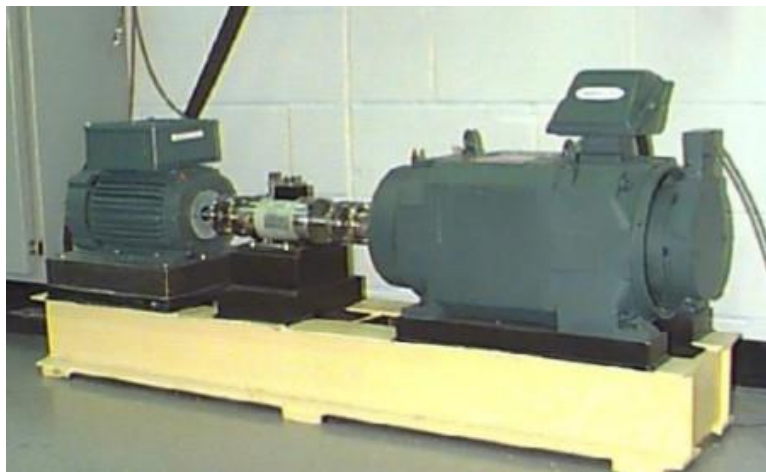


Figure III.1 : Banc d'essai de roulements [38]

Les roulements examinés sont montés de chaque côté de l'arbre du moteur, à la fois du côté entraînement et du côté ventilateur. Dans le cadre de notre étude, nous avons introduit délibérément des défauts ponctuels sur les roulements d'essai en utilisant une technique d'usinage électro-décharge. Ces défauts créés de manière contrôlée nous permettent d'analyser et d'évaluer les effets de ces anomalies sur les signaux vibratoires et de développer des méthodes de diagnostic efficaces pour détecter ces types de défauts dans des conditions réelles de fonctionnement des machines tournantes.

Le Tableau (III.1) représente les cinq classes de fonctionnement définies par les différents états de défaut sur la bague intérieure du roulement.

Chapitre III : démarche expérimentale.

Position du roulement	Emplacement du défaut	Diamètre [inches] ¹	profondeur [inches]	Marque du roulement
coté entraînement	bague Intérieur	0.007	0.011	SKF
		0.014		
		0.021		
		0.028		
	bague extérieur	0.007	0.011	SKF
		0.014		
		0.021		
		0.028		
	Bille	0.007	0.011	SKF
		0.014		
		0.021		
		0.028		
coté ventilateur	bague Intérieur	0.007	0.011	SKF
		0.014		
		0.021		
	bague extérieur	0.007		
		0.014		
		0.021		
	Bille	0.007		
		0.014		
		0.021		

Tableau III.1 : Caractéristiques des défauts de roulements [38]

Des roulements de la marque SKF ont été utilisés pour simuler des défauts de diamètre de 0,007 pouce, 0,014 pouce et 0,021 pouce. Des roulements équivalents de la marque NTN ont été utilisés pour simuler des défauts de diamètre de 0,028 pouce et 0,05 pouce.

$$[\text{inches}]^{(1)} = \text{pouces} = 25,4\text{mm}$$

Les caractéristiques des roulements des deux côtés (accouplement et ventilateur), y compris les fréquences des défauts et la géométrie du roulement sont énumérées dans le tableau (III.2) ci-dessous :

Caractéristique du roulement coté accouplement:6205-2RS JEM SKF, roulement à Billes de cannelure profonde. Taille: (inches)				
Diamètre Intérieur	Diamètre Extérieur	Épaisseur	Diamètre de Bille	Diamètre primitif
0.9843	2.0472	0.5906	0.3126	1.537
Fréquences du défaut: (multiple de vitesse courante en Hz)				
Bague Intérieur	Bague Externe	Cage	Élément Roulant	
5.4152	3.5848	0.39828	4.7135	
Caractéristique du roulement coté ventilateur:6203-2RS JEM SKF, roulement à billes de cannelure profonde. Taille: (inches)				
Diamètre Intérieur	Diamètre Extérieur	Épaisseur	Diamètre de bille	Diamètre primitif
0.6693	1.5748	0.4724	0.2656	1.122
Fréquences du défaut: (multiple de vitesse courante en Hz)				
Bague Intérieur	Bague extérieur	Cage	Élément Roulant	
4.9469	3.0530	0.3817	3.9874	

Tableau III.2 : Caractéristiques des roulements et leurs Fréquences des défauts [38]

Chapitre III : démarche expérimentale.

Les signaux ont été enregistrés à l'aide d'accéléromètres fixés à la cage du moteur par des aimants. Ces capteurs ont été positionnés à 12 heures (verticalement) des deux côtés (accouplement et ventilateur) de la cage du moteur. Pour évaluer l'impact du placement des défauts de la bague externe sur la réponse vibratoire du système moteur/roulement, des essais ont été réalisés des deux côtés avec des défauts de bague situés à 3 heures (dans la zone de charge), à 6 heures (orthogonal à la zone de charge) et à 12 heures.

Les données ont été enregistrées pour :

- Les roulements sans défauts.
- Les défauts seulement sur le côté accouplement (12.000 et 48.000 points/seconde)
- Les défauts seulement sur le côté ventilateur (12.000 points/seconde).

La vitesse (tr/min) et la puissance (HP) de chaque essai ont été enregistrées manuellement à l'aide d'un couple transducteur/encodeur. Les fichiers de données sont au format MATLAB (*.mat) et contiennent les signaux de vibration des deux côtés ainsi que la vitesse de rotation du moteur. Pour notre étude, nous avons uniquement pris en compte les signaux du côté accouplement.

La Figure (III.2) illustre les signaux temporels recueillis du côté de l'accouplement pour différents diamètres de défauts sur la bague intérieure, avec un couple moteur de 3 HP (Horse Power).

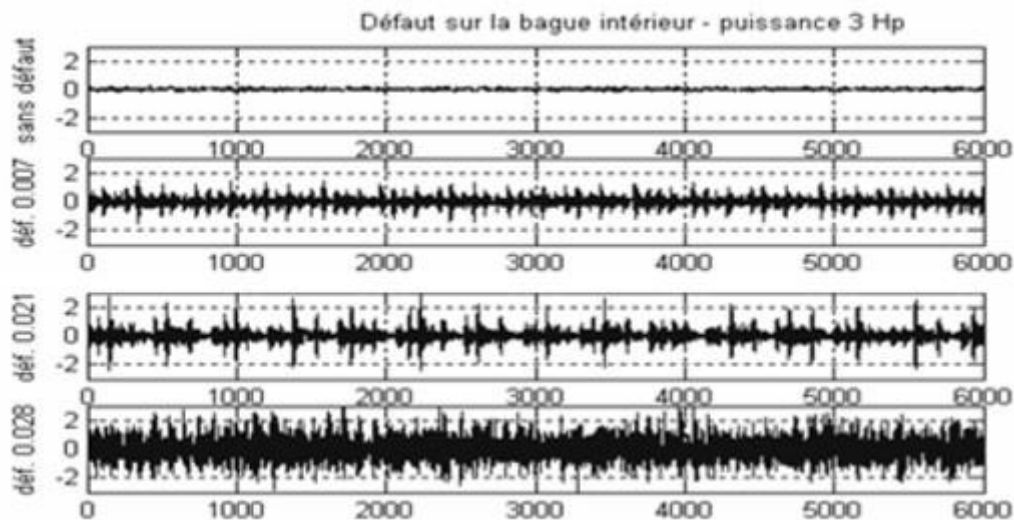


Figure III.2 : Représentation des signaux temporels pour différents diamètres du défaut sur la bague intérieure.

Chapitre III : démarche expérimentale.

V. Conclusion :

Ce chapitre a abordé la démarche expérimentale utilisée pour diagnostiquer les défauts mécaniques des machines tournantes (roulements), et pour la sélection des indicateurs de surveillances les plus pertinents pour la surveillance de ses défauts en classant les différents signaux correspondant à leurs états. Nous avons décrit le banc d'essais de roulements et les signaux collectés. L'exploitation de ces signaux était essentielle pour réaliser une analyse temporelle et fréquentielle valide, ainsi qu'à l'utilisation du critère de Fisher pour la sélection de ses indicateurs. Ensuite, nous avons expliqué les étapes qui ont permis d'enregistrer les résultats qui seront discutés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 04
RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre IV : résultats et discussion

Chapitre IV : résultats et discussion

I. Introduction :

La surveillance des défauts mécaniques des machines tournantes nécessite une sélection des indicateurs appropriés, cette étape repose sur des méthodes de sélection tels que le critère de Fisher, cette technique nécessite un prétraitement des données sous l'environnement Matlab. En raison de la variété et de la diversité de ces indicateurs, ainsi que de la difficulté de leur sélection, il est crucial d'accorder une attention particulière à cette étape.

Dans ce chapitre Nous discuterons une démarche pratique de la sélection des indicateurs de surveillance pour des défauts des roulements par la méthode visuelle et la méthode automatique (critère de Fisher), montrons la différence entre ces deux méthodes après une interprétation des résultats de sélection.

Ce chapitre met en évidence l'importance de la sélection des indicateurs de surveillances pour la détection des défaillances mécaniques dans les machines tournantes avant qu'elles deviennent catastrophiques sur ces machines.

II. Sélection d'indicateurs de surveillance pour le diagnostic des défauts des roulements :

Les signaux utilisés dans cette section sont des signaux prélevés à partir du banc d'essai du data centre bearing, qui présentent des défauts de roulement. Ces signaux ont été mentionnés précédemment dans la section (VI) du chapitre précédent. Les enregistrements des signaux étudiés ont été réalisés spécifiquement pour les défauts qui ont été créés sur la bague intérieure avec diamètres 0.007, 0.021, et 0.028 inch, et un signal sans défaut.

Avant d'entamer l'étape de sélection des indicateurs, il est nécessaire d'effectuer un prétraitement des données. Nous décrirons ci-dessous les étapes de prétraitement et de traitement (sélection des indicateurs).

II.1. Prétraitement :

II.1.1. Division des signaux :

Nous avons des signaux d'une longueur de 120 800 points. L'arbre tourne à une vitesse de 1730 RPM.

$$fr_{arbre} = \frac{1730}{60} = 28,83hz$$

Il existe quatre fréquences caractéristiques associées aux différents composants du roulement, tels que la cage, la bague extérieure, la bague intérieure et les éléments roulants.

Chapitre IV : résultats et discussion

La plus grande période correspond à la plus basse fréquence parmi ces fréquences caractéristiques.

Dans notre situation, la période la plus longue correspond à la période de la cage :

$$f_{cage}=0.9382 \times 28.83=11.48\text{hz}$$

-la période :

$$T_{cage} = \frac{1}{f_{cage}}$$

-la fréquence d'échantillonnage :

$$f_e=12\text{khz}=12000\text{hz}$$

-la période d'échantillonnage :

$$\Delta t = \frac{1}{f_e}$$

-le nombre de points par période :

$$N_p = \frac{T_{cage}}{\Delta t} = \frac{f_{cage}}{f_e} = \frac{12000}{11.48} = 1045.29\text{pts} \cong 1046\text{pts}$$

Si nous prenons un coefficient de 5. La longueur nécessaire pour chaque tranche sera :

$$N_T = N_p \times 5 = 5230\text{pts}$$

Le coefficient 5 est appliqué pour augmenter le nombre de points dans la période la plus longue parmi les périodes des différents éléments du roulement. Cela permet d'obtenir un nombre d'échantillons adéquat pour chaque intervalle de temps.

Si on prend pour N_M une valeur de 2^n supérieur à N_T :

$$N_M = 2^n=8192 \text{ échantillons}$$

Alors le nombre de tranches dans le cas d'un recouvrement de 50%, soit $S_1 = \frac{N_M}{2}$

Alors :

$$K_t = \frac{N_S - S_1}{N_M - S_1} = \frac{120800 - 4096}{4096} \cong 28\text{tranches}$$

Ainsi, nous avons obtenu un total de 112 signaux répartis en 28 tranches pour chaque classe.

II.1.2. Calcul des indicateurs :

Dans le cadre de notre projet, nous accordons une grande importance au prétraitement des signaux afin d'éliminer toute information inutile et de faciliter l'extraction des indicateurs de surveillance les plus pertinents. Nous avons décidé d'utiliser initialement un ensemble d'indicateurs à la fois temporels et fréquentiels. Parmi ces indicateurs figurent l'écart-type (ET), le facteur de crête (Fc), la valeur crête-crête (Acc), le facteur de dissymétrie (skewness

Chapitre IV : résultats et discussion

(Ks)) et le facteur d'aplatissement (kurtosis (Ku)). De plus, nous avons également pris en compte les énergies obtenues à partir du spectre d'enveloppe.

II.1.2.1. Indicateurs temporels :

Les indicateurs temporels mentionnés précédemment sont évalués dans cinq bandes fréquentielles découlant de la bande d'analyse "6KHZ". Ces bandes sont constituées de quatre sous-bandes adjacentes, chacune ayant une largeur de 1500 Hz, ainsi que de la bande totale.

Les indicateurs pris en compte sont les moyennes des indicateurs calculés dans les cinq bandes distinctes. Les bandes évaluées sont les suivantes : [0-1500HZ], [1500-3000HZ], [3000-4500HZ], [4500-6000HZ] et [0-6000HZ]. Pour chaque bande, le signal est centré et ensuite filtré à l'aide de filtres passe-bande appropriés.

Cette approche permet une analyse ciblée des indicateurs de surveillance dans chaque bande fréquentielle, en fournissant une vue détaillée des caractéristiques du signal dans différentes gammes de fréquences.

II.1.2.2. Indicateurs fréquentiels :

Les indicateurs fréquentiels sont calculés à partir des énergies extraites du spectre d'enveloppe de différentes tranches, à la fois dans la bande totale et dans cinq bandes fréquentielles de largeur de 1000 Hz. Les indicateurs fréquentiels comprennent :

EBT : l'énergie totale dans la bande [0-6000 Hz].

EB1 : l'énergie dans la bande 1 [0-1000 Hz].

EB2 : l'énergie dans la bande 2 [1000-2000 Hz].

EB3 : l'énergie dans la bande 3 [2000-3000 Hz].

EB4 : l'énergie dans la bande 4 [3000-4000 Hz].

EB5 : l'énergie dans la bande 5 [4000-5000 Hz].

II.2. Sélection des indicateurs:

Dans notre étude on utilise deux méthodes de sélection des indicateurs : une méthode visuelle et une méthode automatique (critère de Fisher), la méthode visuelle se base sur les représentations graphiques des indicateurs, tandis que le critère de Fisher utilise une approche statistique pour mesurer la capacité discriminante des indicateurs.

II.2.1. Sélection visuelle :

Les figures de (IV.1) à (IV.11) illustrent visuellement la variation des 11 indicateurs en fonction des 112 tranches (les signaux divisés).

Chapitre IV : résultats et discussion

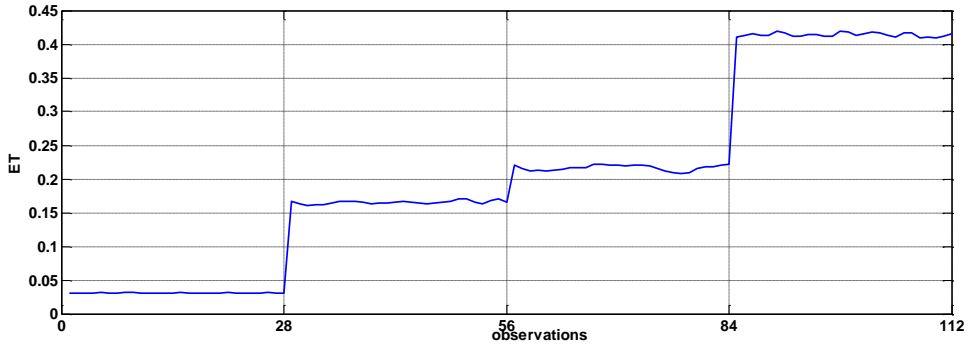


Figure. IV.1 : Variation de l'indicateur ET (Ecart type).

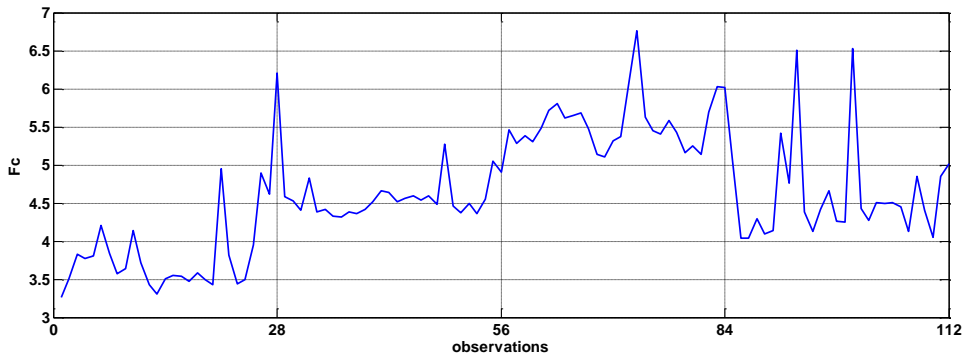


Figure. IV.2 : Variation de l'indicateur Fc (Facteur crête).

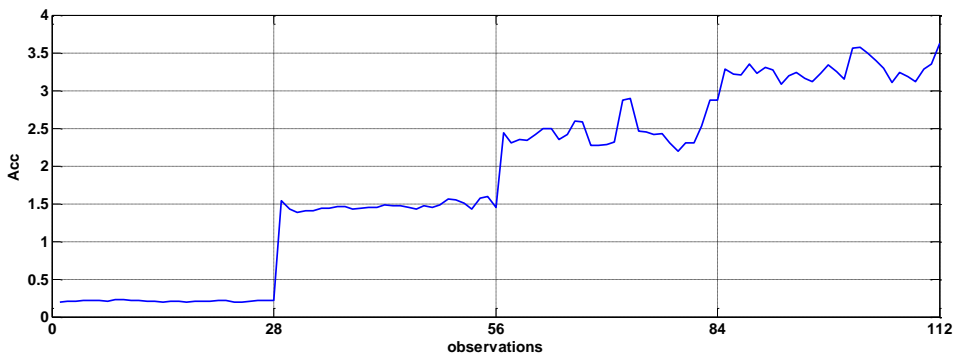


Figure. IV.3 : Variation de l'indicateur Acc (Valeur crête à crête).

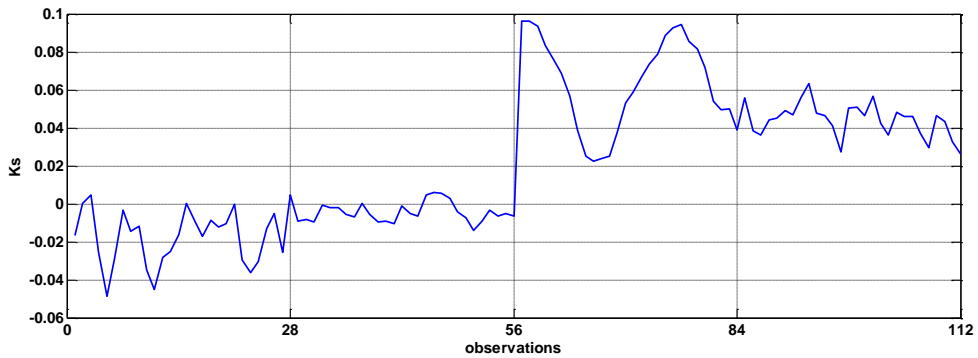


Figure. IV.4 : Variation de l'indicateur Ks (Facteur Skewness).

Chapitre IV : résultats et discussion

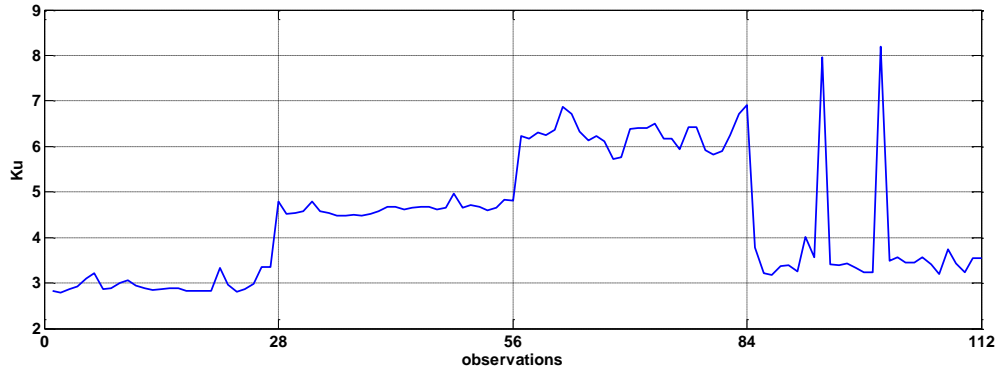


Figure. IV.5 : Variation de l'indicateur Ku (Kurtosis).

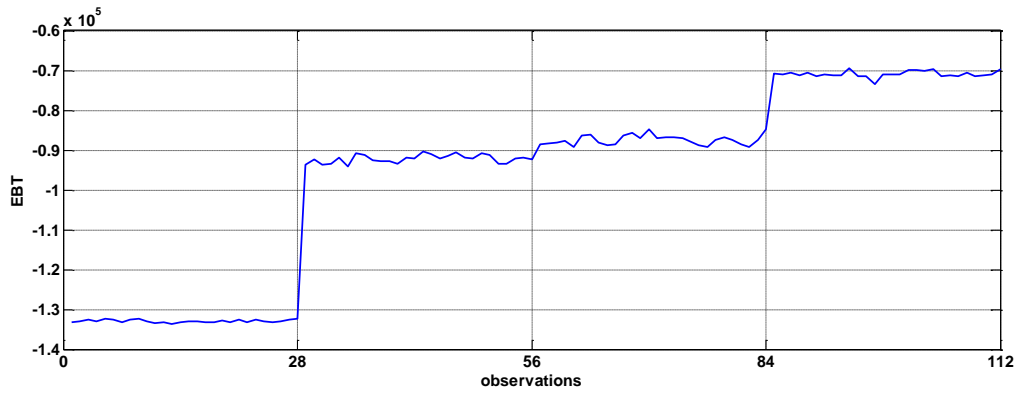


Figure. IV.6 : Variation de l'indicateur EBT (Energie de la bande totale).

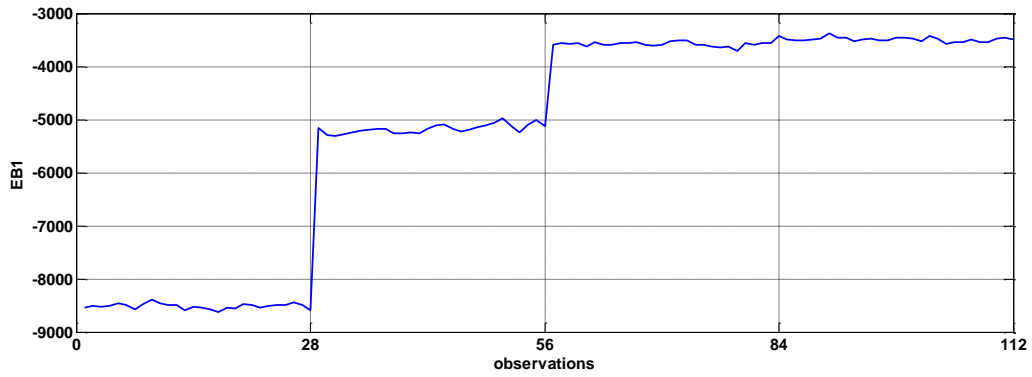


Figure. IV.7 : Variation de l'indicateur EB1 (Energie de la bande [0_1000HZ]).

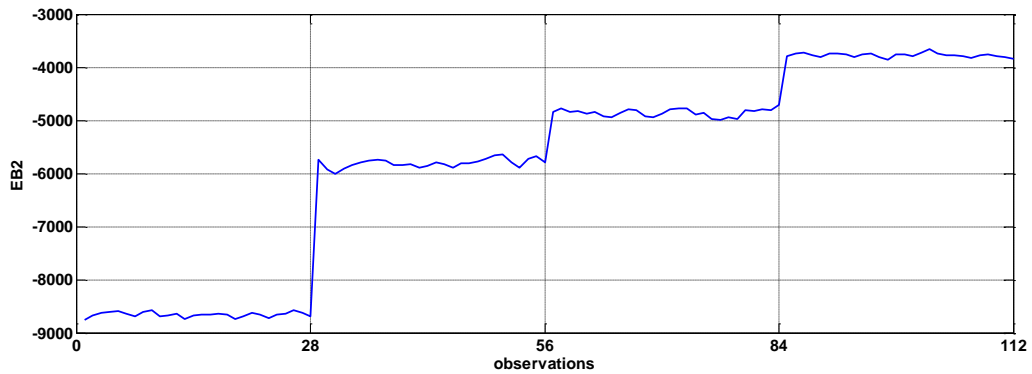


Figure. IV.8 : Variation de l'indicateur EB2 (Energie de la bande [1000_2000HZ]).

Chapitre IV : résultats et discussion

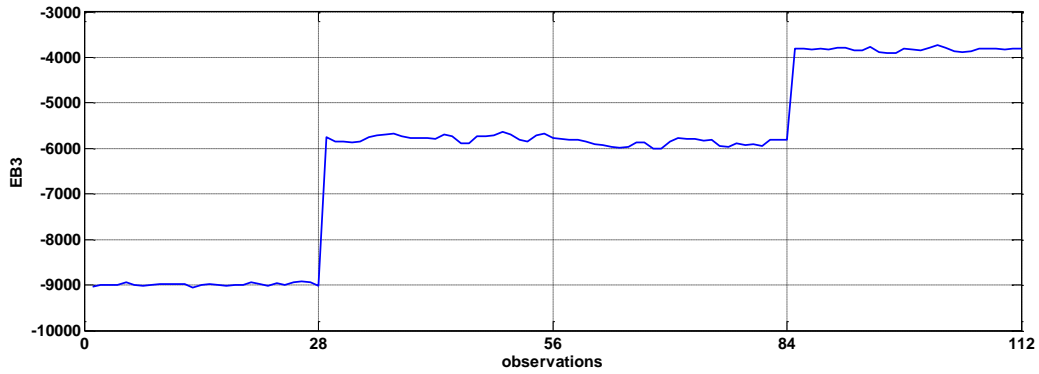


Figure. IV.9 : Variation de l'indicateur EB3 (Energie de la bande [2000_3000HZ]).

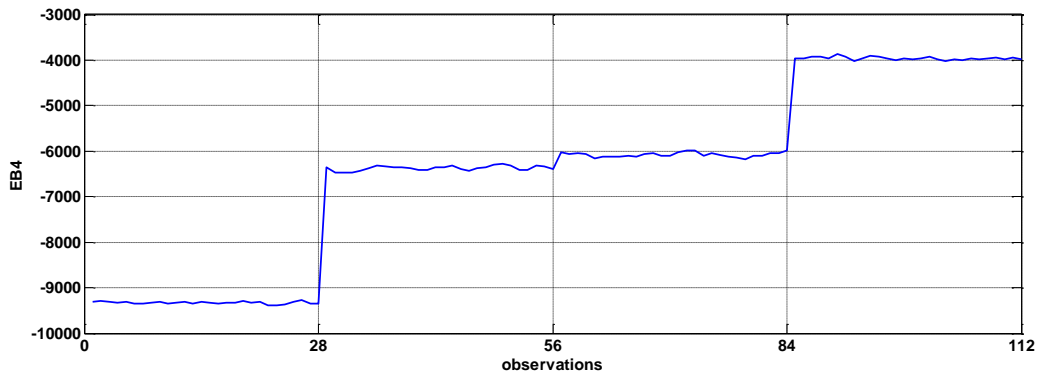


Figure. IV.10 : Variation de l'indicateur EB4 (Energie de la bande [3000_4000HZ]).

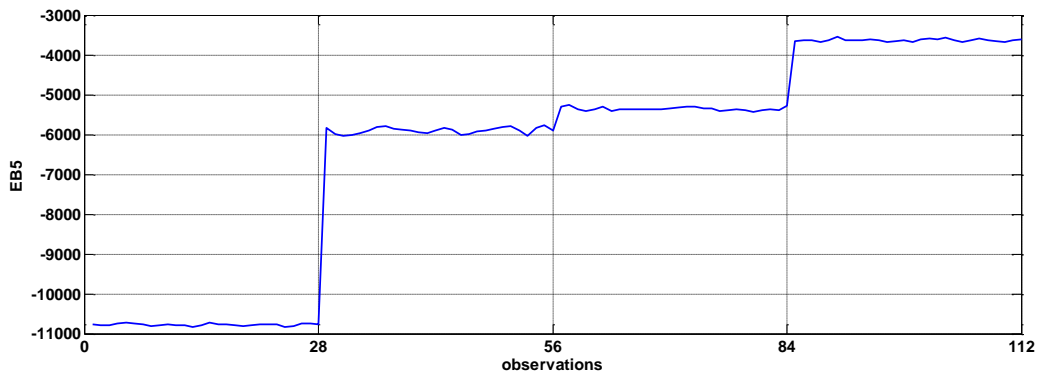


Figure. IV.11 : Variation de l'indicateur EB5 (Energie de la bande [4000_5000HZ]).

II.2.1.1. Discussion des résultats :

En analysant l'ensemble des indicateurs calculés (temporels et fréquentiels) et leurs représentations graphiques, nous constatons que les valeurs numériques de cinq indicateurs spécifiques (ET, EB2, EB3, EB4 et EB5) associés aux figures (IV.1, IV.8, IV.9, IV10, IV11) se répartissent en quatre niveaux distincts. Ces niveaux correspondent aux quatre modes de fonctionnement étudiés : un mode sans défaut et trois autres modes avec des défauts. Dans le cas des roulements sans défaut, ces cinq indicateurs ont des valeurs relativement faible, tandis

Chapitre IV : résultats et discussion

que dans les cas de roulements avec défauts, ils augmentent en fonction du diamètre du défaut.

Ainsi, nous concluons que les indicateurs: écart-type(ET), énergie dans la bande 2(EB2), énergie dans la bande 3(EB3), énergie dans la bande 4(EB4), et l'énergie dans la bande 5(EB5) , sont les plus pertinents pour identifier et diagnostiquer les défauts dans notre étude. Ces cinq indicateurs, comprenant un indicateur temporel et quatre indicateurs fréquentiels, présentent les meilleures capacités de distinction entre les différentes classes de défauts étudiées, mais l'inconvénient de cette méthode graphique (visuelle) c'est que nous ne pouvons pas classer les cinq indicateurs selon leurs pouvoirs de discrimination entre les classes.

Lorsque le nombre de paramètres augmente, la sélection des indicateurs à l'aide de la méthode graphique devient complexe et difficile. Dans de tels cas, une solution efficace consiste à automatiser ce processus. Plusieurs méthodes de sélection automatique sont disponibles, et dans notre étude, nous avons opté pour la méthode de sélection basée sur le critère de Fisher. Cette méthode nous permet d'identifier objectivement les indicateurs les plus pertinents en utilisant des calculs statistiques, ce qui facilite grandement la sélection des indicateurs dans des ensembles de données plus vastes

II.2.2. Sélection par le critère de Fisher :

Le critère de Fisher, également connu sous le nom d'analyse de Fisher ou de ratio de Fisher, est une mesure statistique utilisée pour évaluer la séparation ou la discrimination entre deux ensembles de données. Il est couramment utilisé dans le domaine de la classification ou de la sélection des caractéristiques pour déterminer quelles variables ou caractéristiques sont les plus pertinentes pour différencier les classes ou les groupes de données.

D'une manière générale, pour M classes et pour un indicateur α , le critère de Fisher $J(\alpha)$ s'écrit :

$$J(\alpha) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{M-1} \frac{(m_i(\alpha) - m_j(\alpha))^2}{N_i \sigma_i^2(\alpha) + N_j \sigma_j^2(\alpha)} \quad (\text{IV. 1})$$

Avec: α : un indicateur parmi l'ensemble globale des indicateurs.

m_i : Centre de gravité de la classe ω_i .

σ_i^2 : Variance de la classe ω_i .

N_i : Nombre de vecteurs dans la classe ω_i .

Chapitre IV : résultats et discussion

Dans notre travail, le nombre de classes est 4, et le nombre d'individu dans chaque classe est de 28, avec un nombre d'indicateurs égale a 11 indicateurs, on peut calculer le critère de Fisher pour chaque indicateur, pour cela on a élaboré un sous-programme sous environnement Matlab (**voir annexe 3.2**). L'histogramme dans la figure IV.12 suivant montre la variation du critère de Fisher pour les 11 indicateurs.

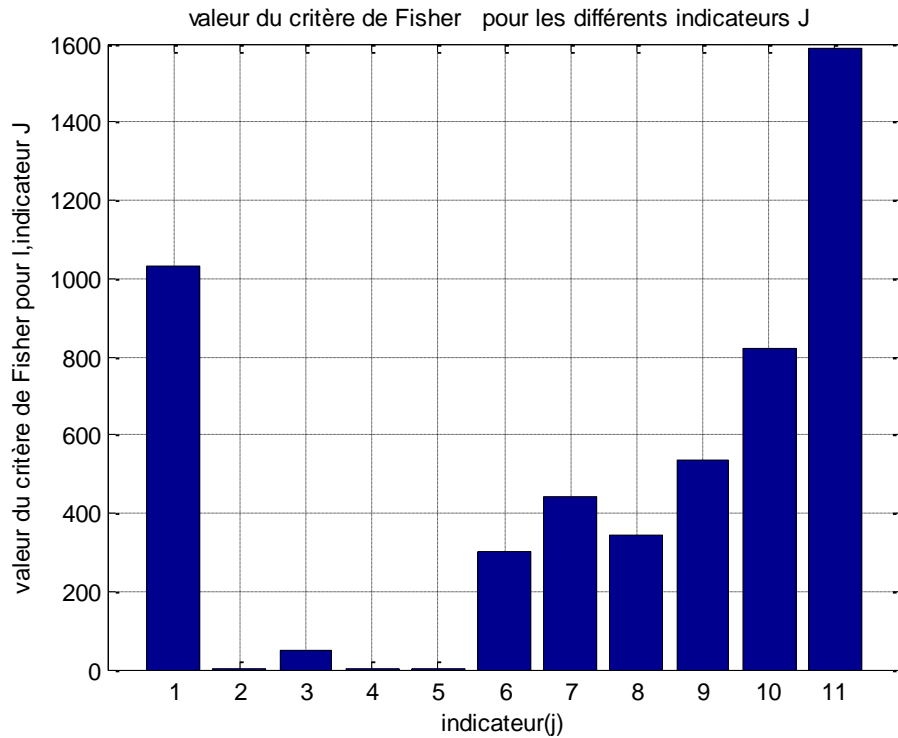


Figure IV.12 : Variation du critère de Fisher pour les 11 paramètres

La Figure IV.13, montre la variation du critère de Fisher pour les 11 paramètres selon un ordre décroissant. Les indicateurs (j) de 1 à 11 dans la Figure IV.13 sont respectivement : EB5, ET, EB4, EB3, EB1, EB2, EBT, Acc, Ku, Ks, FC.

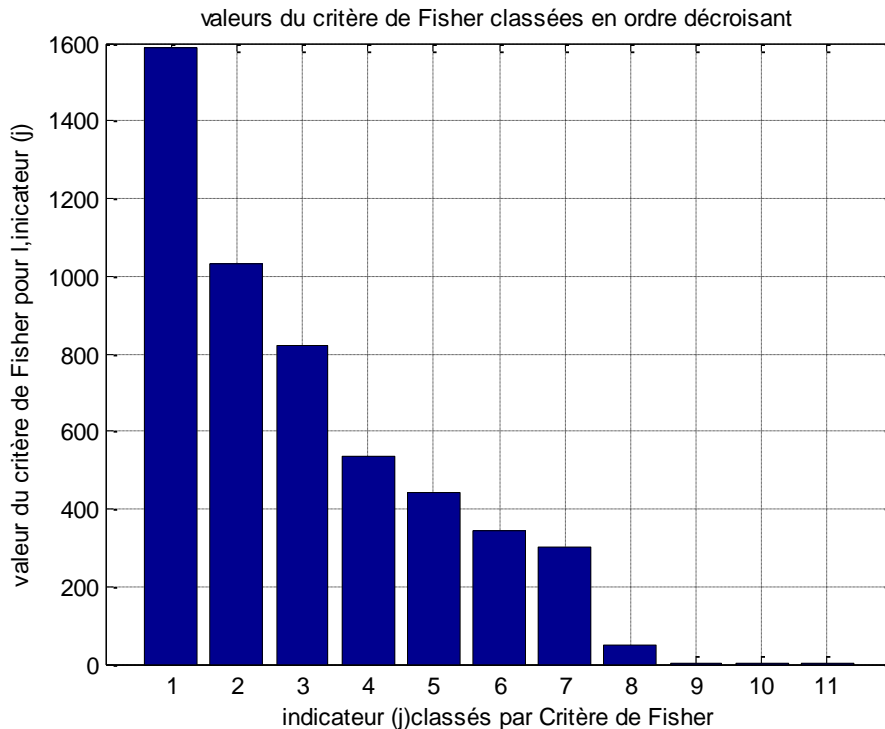


Figure IV.13 : Critère de Fisher pour les différents indicateurs en ordre décroissant

II.3.1 Discussion des résultats :

Le sous-programme (**voir annexe 3.2**) a permis d'effectuer une analyse discriminante en utilisant le critère de Fisher pour évaluer l'importance des différents indicateurs dans la séparation des classes dans la base de données donnée. Les résultats obtenus ont permis de classer les indicateurs en fonction de leur contribution à la discrimination entre les classes.

Les valeurs du critère de Fisher ont été calculées pour chaque indicateur, et les indicateurs ont été triés en ordre décroissant en fonction de leur pertinence. Cela a permis de mettre en évidence les indicateurs les plus discriminants, c'est-à-dire ceux qui contribuent le plus à la séparation des classes.

Les graphiques obtenus ont fourni une visualisation claire de l'importance de chaque indicateur. Les valeurs du critère de Fisher classées en ordre décroissant ont permis d'identifier les indicateurs les plus significatifs.

Cette analyse a fourni des informations précieuses pour la compréhension des relations entre les indicateurs et la discrimination entre les classes dans la base de données. Ces résultats peuvent être utilisés pour la sélection des variables les plus pertinentes dans des études et domaines ultérieures.

En somme, le programme a permis d'effectuer une analyse approfondie des indicateurs à l'aide du critère de Fisher, mettant en évidence les indicateurs les plus discriminants et

Chapitre IV : résultats et discussion

fournissant des informations utiles pour la caractérisation et la distinction des classes dans la base de données étudiée.

La méthode de sélection des indicateurs par critère de Fisher permet la classification de chaque indicateur selon son pouvoir de discrimination par contre la méthode visuelle permet juste la sélection d'un ensemble d'indicateurs les plus pertinents sans classement.

III. Conclusion

Ce chapitre consacré à l'analyse et à la discussion des résultats, l'utilisation du critère de Fisher s'est révélée efficace pour la sélection des indicateurs les plus pertinents et discriminants dans le diagnostic des défauts de roulements et ses avantages sur la méthode visuelle. Cette approche a permis de déterminer l'importance de chaque indicateur dans la séparation des classes, Le programme (**voir annexe 3.1 et 3.2**) constitue un outil précieux pour explorer les relations entre les variables et peut être appliqué dans divers domaines nécessitant la classification et la prédiction de classes.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons abordé la problématique de la sélection des indicateurs de surveillance des défauts mécaniques des roulements, qui sont des composants critiques dans les machines tournantes. Notre objectif était de développer une méthodologie rigoureuse pour choisir les indicateurs les plus efficaces, capables de détecter les différents types de défauts et d'améliorer la fiabilité des machines.

Au cours de notre étude, nous avons suivi une méthodologie en plusieurs étapes. Nous avons collecté des données sur un banc d'essai dédié aux roulements, prétraité ces données pour garantir leur qualité, calculé les statistiques descriptives pour évaluer les différences entre les classes de machines saines et défectueuses, et appliqué le critère de Fisher pour la sélection, et le classement des indicateurs les plus discriminants.

Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité de notre approche. Les indicateurs de surveillance sélectionnés ont montré une sensibilité et une spécificité élevées dans la détection des défauts mécaniques des roulements. Ils ont également présenté des performances supérieures par rapport aux mesures existantes ou aux approches de surveillance courantes, ce qui confirme leur potentiel à améliorer la maintenance préventive et à réduire les coûts d'exploitation.

L'analyse et l'interprétation des résultats nous ont permis de mieux comprendre les caractéristiques des défauts mécaniques des roulements et leur impact sur les indicateurs de surveillance. Nous avons pu identifier les indicateurs les plus pertinents et les paramètres clés pour détecter précocement les défauts et prendre des mesures de maintenance appropriées.

Cependant, il convient de noter que notre étude présente quelques limites. Les résultats obtenus sont basés sur des conditions spécifiques du banc d'essai et des types de défauts étudiés. Il serait intéressant d'étendre nos recherches à d'autres types de machines tournantes et de défauts mécaniques pour une généralisation plus large des résultats.

Notre étude sur la sélection des indicateurs de surveillance des défauts mécaniques des roulements a permis de développer une méthodologie robuste et d'identifier des indicateurs performants. Ces résultats ont un impact significatif sur la maintenance préventive des machines tournantes, en permettant une détection précoce des défauts, une réduction des temps d'arrêt et une optimisation des coûts d'exploitation.

**REFERENCE
BIBLIOGRAPHIQUE**

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques :

- [01] S. HADDAB « traitement des signaux vibratoire : application au diagnostic des défaillances ». Mémoire de master, univTiziOuzou, 2009.
- [02] M. Fisher R.Turner G. Arce, M.D. Campbell. Global standards for rotatingmachinery: Navigating world wide industry requirements for electric motors. IEEE Industry Applications Magazine, 23(1) :58–69, 2017.
- [03] Lyes KHELFI, Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificiel. Thèse de doctorat, UniversitéBadj-Mokhtar de Annaba, 2014.
- [04] M .T. Nabti, « ETUDE DE L'EVOLUTION DES INDICATEURS SPECTRAUX ET CESTREUX DANS LA DETECTION DES DEFAUTS MECANIQUES ».Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas Sétif (2011)
- [05] BOUZAOUIT Azzedine « INFLUENCE DE LA VIBRATION SUR LA DUREE DE VIE DES ROULEMENTS »Thèse Doctorat Badji Mokhtar-Annaba- doctorat de 2008.
- [06] Mahgoun Hafida : « Analyse non stationnaire de signaux vibratoire dans la surveillance des machines et la prévention des défaillances » Thèse de l'université Ferhat Abbas Sétif. 2013.
- [07] Analyse des Défaillances des roulements, Dommages par Type, <https://www.nskeurope.fr/fr/bearings/services/troubleshooting/damage-by-type/flaking.html> consulté le 07/03/23
- [08] ISHAK, Georges. “Détection des défauts mécaniques par des indicateurs de Cyclostationnarité“. Université libanaise école doctorale des sciences et de la technologie.
- [09] KASS, Souhayb. Diagnostique autonome des roulements. [En ligne] thèse de doctorat en informatique industrielle. INSA LYON, université de libanaise, 2019,100p. Format PDF. Disponible sur : <https://www.these.fr>.
- [10] Chevalier R, «Etat de l'art de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes à EDF», RFM, (2001)
- [11] LandolsiFoued. Cours de Diagnostic vibratoire « études des principaux défauts »
- [12] Dr. YOUNES Ramdane. Les roulements. Université Badji Mokhtar. Annaba.
- [13] T. Emmanuel. Etude et modélisation de la fatigue de contact en présence d'indentation dans le cas de roulement tout acier et hybrides. Compiègne, France. Septembre 2012.
- [14] Boulenger et C. Pachaud, «Aide-mémoire Surveillance des machines par analyse des vibrations». Dunod, Paris, (2009).

Références Bibliographiques

- [15] CLAUDE PICHOT « Surveillance des machines par analyse des vibrations », version Dunod (2009).
- [16] M. El Badaoui, M. Guillet, N. Nejjar, J. Danière. Diagnostic d'un train d'engrenage par analyse cepstrale synchrone. 16ème colloque GRESTI sur le traitement du signal et des images, 15-19 septembre 1997, Grenoble. France.
- [17] HAMRAOUI Salim «diagnostic des defauts d'engrenages en utilisant la methode des paquets d'ondelettes» mémoire master, univTiziOuzou 2021.
- [18] El badaoui Mohamed, «Contribution au diagnostic vibratoire des réducteurs complexes à engrenages par l'analyse cepstrale», Thèse de l'Université Jean Monnet, (1999).
- [19] IkhlefBilal, Mémoire master « étude de diagnostic intelligent des défauts mécaniques dans les machines tournantes » Université Mohamed Seddik Ben Yahia Jijel, 2021.
- [20] CHIKH N, 2005, « Analyse spectrale des vibrations Application à la maintenance des équipements mécanique», mémoire de magister, Université M'hamedBougaraBoumardes.
- [21] DERBEL, S(2020).thèse doctorat : Contribution à la détection des défauts pour la maintenance prédictive des Systèmes mécatroniques en utilisant des méthodes basées sur des observateurs : Application à la transmission par engrenages. University de Cergy-pontoise.
- [22] Bensana Toufik, « Diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une turbine à Vapeur. », Thèse de Doctorat Spécialité Génie Mécanique, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA, (2008).
- [23] Djebala, A. (2008). Application de la transformée par ondelettes à l'étude et l'analyse vibratoire des systèmes mécaniques (Thèse de doctorat, Université de Annaba, Algérie).
- [24] Kious M, M .Bousbia S, A « Maintenance conditionnelle par analyse vibratoire dans une centrale Électrique à turbine à gaz » Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.
- [25] Ziani, R. (2018). Contribution à l'analyse et à la classification automatique des défauts mécaniques (Doctoral dissertation).
- [26] Pachaud, C., Salvetat, R., & Fray, C. (1997). Crest factor and kurtosis contributions to identify defects inducing periodical impulsive forces. Mechanical systems and signal processing, 11(6), 903-916.
- [27] Safi Eddine OUNOUGH, Mémoire de fin d'étude : diagnostic des défauts de machines tournantes par analyse vibratoire : surveillance et et diagnostic des défauts de roulements par analyse spectrale. École national polytechnique, 2020.

Références Bibliographiques

- [28] TAHI, Mohamed «. Développement d'un système d'aide au diagnostic des machines tournantes par utilisation de l'arbre de décision. [En ligne]. Thèse des doctorats en génie mécanique. ALGER : USTHB, 2019, 103p. Format PDF Disponible sur : <https://repository.usthb.dz>.
- [29] Nabti Mohamed Tahar « Etude de l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques » mémoire magister. Université Ferhat Abbas Sétif 2011.
- [30] FELKAOUI Ahmed «Diagnostic vibratoire au service de la maintenance :de l'acquisition à la décision» Thèse Doctorat UNIVERSIIE FERHAT ABBAS – SETIF, 2007.
- [31] B. Trajin. Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones Application à la surveillance des roulements à billes. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [32] Omar DJEBILI ; « contribution a la maintenance prédictive par l'analyse vibratoire des composants mécaniques tournants .application aux butées a billes soumises à la fatigue de contact de roulement » .Thèse de doctorat, Université de Reims champagne Ardenne (2013).
- [33] Boughaneb Khaled, mémoire : surveillance et diagnostic des machines tournantes par analyse vibratoire .Univ ANNABA, 2020
- [34] Roland casimir, thèse doctorat : diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes. L'école centrale de Lyon 2003.
- [35] TALEB Mounia ; thèse doctorat : surveillance détection et diagnostic des défaillances dans une cimenterie en utilisant l'analyse fonctionnelle. UNIV Skikda ,2018
- [36] JEAN VIEILLE, Marie. ACP : « analyses en composantes principales». Lovelyanalytics.com.
- [37] FEDALA, Semchedine. “Le diagnostic vibratoire automatisé : comparaison des méthodes d'extraction de la sélection du vecteur forme”, mémoire de master DOMP-UFAS, Sétif 2005, ppp.142
- [38] The Case Western Reserve University - Bearing Data Center. Cleveland, Ohio. USA. Disponible sur : <https://engineering.case.edu>.

Résumé

Ce travail se concentre sur la sélection des indicateurs de surveillance les plus pertinents dans le diagnostic des défauts mécaniques des machines tournantes, ses défauts peuvent altérer ou affecter le fonctionnement de la machine tournante ou diminuer sa performance. Les indicateurs de surveillance sont des paramètres mesurables, ils interviennent pour évaluer et suivre l'état de fonctionnement de ces machines, et éviter une éventuelle anomalie, l'action de ses indicateurs se diffère de types de défauts. Le critère de Fisher permet la sélection de ses indicateurs, et garantir que les indicateurs choisis sont fiables et précis dans la détection et la mesure des défauts, Il permet de choisir les indicateurs les plus pertinents et les plus robustes, assurant ainsi une surveillance efficace et précise des défauts mécaniques des machines tournantes.

Mots clés : défauts mécaniques, diagnostic, indicateurs de surveillance, traitements de signal, machine tournante.

Abstract

This work focuses on selecting the most relevant monitoring indicators for diagnosing mechanical faults in rotating machines. These faults can alter or affect the operation of the rotating machine or decrease its performance. Monitoring indicators are measurable parameters used to assess and track the operating condition of these machines and to prevent potential anomalies. The role of Fisher's criterion is to facilitate the selection of these indicators, ensuring that the chosen indicators are reliable and accurate in detecting and measuring faults. It enables the selection of the most relevant and robust indicators, thus ensuring effective and precise monitoring of mechanical faults in rotating machines.

Keywords: Mechanical faults, diagnostics, monitoring indicators, signal processing, rotating machine.

المخلص

يركز هذا العمل على اختيار أدق مؤشرات المراقبة في تشخيص الأعطال الميكانيكية في الماكينات الدوارة. يمكن أن تؤثر هذه الأعطال على عمل الماكينة الدوارة أو تقلل من أدائها. تعتبر مؤشرات المراقبة معايير قابلة للقياس تستخدم لتقييم وتتبع حالة تشغيل هذه الماكينات وتجنب حدوث أي انحرافات. يختلف تأثير هذه المؤشرات اعتمادًا على نوع العيوب. يساعد معيار فيشر في اختيار هذه المؤشرات وضمان موثوقيتها ودقتها في اكتشاف وقياس العيوب. يمكنه اختيار أدق المؤشرات وأكثرها قوة، مما يضمن مراقبة فعالة ودقيقة للأعطال الميكانيكية في الماكينات الدوارة.

الكلمات المفتاحية: العيوب الميكانيكية، التشخيص، مؤشرات المراقبة، معالجة الإشارة، الآلة الدوارة