

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUNT IARET

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Génie électrique

Spécialité: Commande Electrique

THÈME

**Classification automatique de défaut de roulement de la
machine asynchrone par les réseaux de neurones (RNA)**

**Préparé par :
Benhalima Siham
Boumediene Fatima**

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Mr A.Saibi	MAA	President
Mr S.Hassaine	PR	Examineur1
Mr Y.Mihoub	MCB	Examineur2
Mme.S.Laribi	MCB	Encadreur

PROMOTION 2018 /2019

Remerciements

Tout d'abord nous remercions ALLAH le tout puissant qui nous a accommodé nos efforts pour accomplir ce travail et plus noble des prophètes et Envoyés notre prophète Muhammad ainsi que sur sa famille et ses compagnons.

*Nos remerciements s'adressent à notre promoteur
Madame LARIBI Souad, pour ses efforts déployés, ses
encouragements et sa patience.*

*Nous remercions l'ensemble de nos professeurs qui nous ont
accompagné tout au long de notre cursus universitaire.*

*Nous remercions aussi tous ceux qui nous ont aidés de pré ou de loin
pour réaliser ce travail.*

Liste des Symboles

MAS	Machines Asynchrone
TF	Transformée de Fourier.
TH	Transformée d' Hilbert
THH	Transformation de Huang-Hilbert
DME	Décomposition Modale Empirique
IMF	Intrinsèque Mode fonctions
RNA	Réseaux De Neurones Artificiels
f	La fréquence
g	le glissement
p	Nombre de paire de pôles
$f_{d,bi}$	Fréquence caractéristique de défaut de la bague interne
$f_{d,be}$	Fréquence caractéristique de défaut de la bague externe
$f_{d,ca}$	Fréquence caractéristique de défaut de la cage
$f_{d,bi}$	Fréquence caractéristique de défaut de la bille
f_{rot}	Fréquence de rotation de la bague intérieure
f_{ext}	Fréquence de rotation de la bague extérieure
N	Le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles)
d_m	Le diamètre primitif
d_b	Le diamètre des éléments roulants
α	Angle de contact
F_{max}	La fréquence maximale
T_{acq}	Le temps d'acquisition qui correspond à la durée D'observation du signal.
N_e	Le nombre de points enregistrés ou nombre de lignes.
T_e	La période.
F_e	La fréquence d'échantillonnage
r	Résolution
RMS	nommée aussi valeur efficace ou moyenne quadratique
a_{peak}	La valeur maximale par rapport aux points d'équilibre
V_C	La valeur crête

Liste des Symboles

F_C	Facteur de crête
IMF	Facteur d'impulsion
Ku	kurtosis
$M4$ et $M2$	Les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2
$x(n)$	Le signal temporel
\bar{x}	La valeur moyenne des amplitudes.
$X(f)$	La fonction de transformée de Fourier,
$X(k\Delta f)$	La transformée de Fourier discrète rapide.
T_e	La période d'échantillonnage du signal temporel
AI	L'amplitude instantanée
FI	La fréquence instantanée
$r(t)$	Le résidu de la décomposition
N	Le nombre d'IMFs
$a_j(t)$	L'amplitude de l'enveloppe du $j^{ème}$ IMF
$\phi_j(t)$	La phase
m_{norm}	Enveloppe moyenne normalisée
Env_{max}	Enveloppe moyenne maximale
Env_{min}	Enveloppe moyenne minimale

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------	---

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de la MAS

I.1.Introduction	3
I.2.Constitution de la machine asynchrone	3
	4
I.2.1.Stator	
I.2.2.Le rotor	4
I.2.2.1.Le rotor à cage d'écureuil ou rotor en court-circuit	5
I.2.2.2.Le rotor bobiné	5
I.2.3.Les organes mécaniques	5
I.3.Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.	6
I.4.Les défauts affectant les machines asynchrones à cage	6
I.5.Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone	6
I.6. Les cause des défauts	7
I.7.Les défauts affectent dans la machine	8
I.7.1.Les défauts statoriques	8
I.7.1.1.Défaut d'isolement dans un enroulement	9
I.7.1.2.Court-circuit entre spire	9
I.7.1.3.Court-circuit entre phases	9
I.7.1.4.Défaut de circuit magnétique	10
I.7.1.5.Court-circuit entre une phase et le neutre	10
I.7.1.6.Court-circuit phase/bâti	10
I.7.1.7.Circuit ouvert sur une phase	11
I.7.1.8.Court-circuit dans une phase	11
I.7.2.Défauts rotoriques	12
I.7.2.1.Défauts de cassure de barre	12
I.7.2.2.Défauts d'excentricité	13
I.7.2.3.Défauts de rupture des anneaux	13
I.7.2.4.Les défauts de roulement	14
I.8.Diagnostic des défauts dans machine asynchrone	15
I.8.1.Définition de diagnostic	15
I.8.2.Méthodes de diagnostic des défauts des machines électriques	15

Sommaire

I.8.2.1.Diagnostic par l'analyse du courant statorique	16
I.8.2.2.Diagnostic par l'analyse des flux	16
I.8.2.3.diagnostic par mesurer de la température	16
I.8.2.4.Diagnostic par analyse des signaux vibratoires	16
I.8.2.5.Diagnostic basé sur l'intelligence artificielle	17
I.8.2.6.Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique	17
I.8.2.7.Diagnostic par les analyses chimiques	18
I.8.2.8.Diagnostic par l'utilisation les courants de Park	19
I.8.2.9.Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée	19
I.9.Conclusion	19

Chapitre II : Détection des défauts des roulements par l'analyse vibratoire

II.1 Introduction	20
II.2.Géométrie et constitution d'un roulement	20
II.2.1.La bague extérieure	20
II.2.2.La bague intérieure	21
II.2.3.La cage	21
II.2.4.Les éléments roulants	21
II.3.Caractéristiques des roulements	21
II.4.Différents types des roulements	22
II.4.1.Les roulements rigides à billes (à rouleaux cylindriques)	22
II.4.2.Les roulements à aiguilles	22
II.4.3.Roulements à billes à contact oblique	22
II.4.4.Roulements à rotules sur billes (de même sur rouleaux)	23
II.5. Les facteurs essentiels pour le choix de type de roulement	23
II.6.Défauts des roulements	24
II.6.1.Origine des défauts de roulement	24
II.6.2.Principaux défauts	25
II.6.3.Classification de défaut	28
II.6.3.1.Défaut localisé	28
II.6.3.2.Défaut distribué	29
II.7.Fréquences caractéristiques les défauts d'un roulement	29

Sommaire

II.8.Analyse des signaux vibratoires	31
II.8.1.Définition d'une vibration	31
II.8.2.Objectifs de l'analyse vibratoire	31
II.8.3.Caractéristiques d'une vibration	32
II.8.4.Nature d'une vibration	32
II.9.Détection d'un défaut dans les roulements	33
II.10.Les méthodes d'analyse	35
II.10.1.Les méthodes temporelles	35
II.10.2.Les méthodes fréquentielles	39
II.11.Etude du système de roulement	40
II.11.1.Banc d'essais expérimentaux	40
II.11.2.Identification des roulements utilisés	41
II.11.3.Représentation des signaux temporels	42
II.12.Conclusion	48

Chapitre III : Application de la transformée (HHT) au diagnostic des défauts de roulement

III.1.Introduction	50
III.2.La décomposition modale empirique d'un signal(EMD)	50
III.3.Transformée de Hilbert	50
III.4.Définition de l'Intrinsèque	51
III.5. l'algorithme de tamisage (SiftingProcess)	51
III.6.Application de la transformée (THH) au diagnostic des défauts de roulement	54
III.6.1.Analyse de signaux des défauts par la méthode Hilbert Huang	54
III.6.2.Analyse spectral d'Hilbert des IMFs	59
III.7.Conclusion	64

Chapitre IV : Diagnostic de défaut de roulements par les réseaux de neurones

IV.1.Introduction	65
IV.2.Réseaux de neurones artificiels	65
IV.2.1.Définition	65
IV.2.2. Historique	65

Sommaire

IV.2.3. Le neurone biologique	66
IV.2.4. Neurone formel	67
IV.3.Fonction d'activation	68
IV.4. Les type de Réseaux de Neurones	69
IV.4. Les type de Réseaux de Neurones	69
IV.4.2.Réseau de neurones non bouclés	69
IV.4.3.Réseaux de neurones bouclés	70
IV.5.Algorithmes d'apprentissage	71
IV.5.1.Apprentissage supervisés	71
IV.5.2.Apprentissage non supervisés	71
IV.5.3.Apprentissage par renforcement	72
IV.6.Avantages et Inconvénients	72
IV.6.1.Avantages	72
IV.6.2.Inconvénients	72
IV.7.Application des RNA pour la détection des défauts des roulements	72
IV.7.1.Choix des entrées des réseaux	72
IV.7.2.Choix des sorties des réseaux	73
IV.7.3.Choix de fonction d'activation	73
IV.8.Détection des défauts de roulements pour différentes charge	74
IV.8.1.Résultats de l'apprentissage	75
IV.8.2.Interprétation des résultats	75
IV.8.3.Tests du RN pour la détection de défaut	76
IV.9.Détection des défauts de roulements pour différents diamètres	77
IV.9.1.Résultats de l'apprentissage	79
IV.9.2.Interprétation des résultats	80
IV.9.3.Tests du RN pour la détection de défaut	80
IV.10.Conclusion	82
Conclusion générale	83

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.01	Fréquences caractéristiques pour les défauts de roulement avec les différents couples résistants	41
Tableau II.02	Fréquences caractéristiques pour les défauts de roulement avec les différents couples résistant	42

Chapitre III

Tableau III.01	Fréquences et amplitudes d'IMF1 et IMF2	64
-----------------------	---	-----------

Chapitre IV

Tableau IV.01	Fonctions d'activation	69
Tableau IV.02	Descripteurs temporels	73
Tableau IV.03	Condition de roulement de 4 sorties	74
Tableau IV.04	Condition de roulement de 10 sorties	75

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.01	Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	03
Figure I.02	Stator d'une machine asynchrone	04
Figure I.03	Le rotor à cage	04
Figure I.04	Schéma d'un rotor a cage d'écureuil	05
Figure I.05	Schéma d'un rotor bobiné	05
Figure I.06	Evolution des statistiques des pannes dans machine asynchrone à cage	07
Figure I.07	Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	07
Figure I.08	Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	08
Figure I.09	Stator d'un moteur asynchrone complètement grillé	08
Figure I.10	Défaut de court-circuit entre phases	10
Figure I.11	Défaut d'ouverture d'une phase	11
Figure I.12	Représentation d'une barre casée	12
Figure I.13	Représentation de l'excentricité dans la machine asynchrone	13
Figure I.14	Représentation de rupture des anneaux	14
Figure I.15	Représentation d'un roulement à billes	14
Figure I.16	les mesures utilisées pour le diagnostic des machines asynchrones	15

Chapitre II

Figure II.01	Différentes composantes d'un roulement	21
Figure II.02	différente type de roulements	23
Figure II.03	Grippage	25
Figure II.04	Corrosion	26
Figure II.05	Usure	26
Figure II.06	Ecaillage	27
Figure II.07	Détérioration des cages	28
Figure II.08	Coups, fissures, cassures	28
Figure II.09	Schéma synoptique illustrant les effets des deux types de défauts et leurs manifestations	29
Figure II.10	Géométrie et dimensions d'un roulement	31
Figure II.11	Nature d'une vibration	33
Figure II.12	discrétisation du signal	34

Liste des figures

Figure II.13	Evolution des valeurs crête, efficace et du facteur crête	37
Figure II.14	Transformée de Fourier d'une somme de deux sinusoïdes	39
Figure II.15	Le banc d'essai Américain (Data bearing center)	41
Figure II.16	Signaux temporels vibratoires de l'état sain	43
Figure II.17	Les signaux temporels de test sur la bague intérieure pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.007", 0.014")	44
Figure II.18	Les signaux temporels de test sur la bague intérieure pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.021", et 0.028")	44
Figure II.19	Les signaux temporels de test sur les billes pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.007",0.014")	45
Figure II.20	Les signaux temporels de test sur les billes pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.021", et 0.028")	46
Figure II.21	Les signaux temporels de test sur la bague extérieure pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.007",0.014")	46
Figure II.22	Les signaux temporels de test sur bague extérieure centrée pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.021")	47
Figure II.23	Les signaux temporels de test sur bague extérieure orthogonale pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.007",0.021")	47
Figure II.24	Les signaux temporels de test sur bague extérieure opposée pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.007",0.021")	48

Chapitre III

Figure III.01	L'organigramme de l'algorithme de l'EMD	52
Figure III.02	Somme de deux sinus : a) Signal temporel, b) Spectre	53
Figure III.03	a) signal IMF1, b) Spectre de l'IMF1	54
Figure III.04	a) signal IMF2, b) Spectre de l'IMF2	54
Figure III.05	Décomposition en mode empirique de roulement sain à vide	55
Figure III.06	Décomposition en mode empirique de roulement sain en charge	55
Figure III.07	Décomposition en mode empirique du défaut de bague intérieure à vide	56
Figure III.08	Décomposition en mode empirique du défaut de bague intérieure en charge	56

Liste des figures

Figure III.09	Décomposition en mode empirique du défaut de bague extérieure à accéléromètre centré à vide	57
Figure III.10	Décomposition en mode empirique du défaut de bague extérieure à accéléromètre centré en charge	57
Figure III.11	Décomposition en mode empirique du défaut de billes à vide	58
Figure III.12	Décomposition en mode empirique du défaut de billes en charge	58
Figure III.13	Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal cas sans défaut Avide	59
Figure III.14	Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal cas sans défaut Avide	59
Figure III.15	Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal cas sans défaut (3HP)	59
Figure III.16	Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal cas sans défaut (3HP)	60
Figure III.17	Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague intérieure Avide	60
Figure III.18	Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague intérieure Avide	60
Figure III.19	Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague intérieure pour charge (3HP).	61
Figure III.20	Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague intérieure pour charge (3HP)	61
Figure III.21	Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague extérieure Avide	61
Figure III.22	Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague extérieure Avide	61
Figure III.23	Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague extérieure pour charge (3HP).	62
Figure III.24	Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague extérieure pour charge (3HP).	62
Figure III.25	Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de bille Avide	63
Figure III.26	Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de bille Avide	63
Figure III.27	Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de bille pour charge (3HP).	63

Liste des figures

Figure III.28	Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de bille pour charge (3HP).	63
----------------------	---	-----------

Chapitre IV

Figure IV.01	Schéma d'un neurone biologique	67
Figure IV.02	Modélisation du neurone formel	67
Figure IV.03	Un réseau de neurone non bouclé	70
Figure IV.04	Un réseau de neurone bouclé	70
Figure IV.05	Structure d'un réseau de neurones de [7 10 4]	74
Figure IV.06	Construction de bloc de RNA de différentes charges	75
Figure IV.07.	Performances du RN	75
Figure IV.08	Test de RN pour un état de fonctionnement sain	76
Figure IV.09	Test de RN pour un fonctionnement avec un défaut de bague intérieure	76
Figure IV.10	Test de RN pour un fonctionnement avec un défaut de bague extérieure	77
Figure IV.11	Test de RN pour un fonctionnement avec un défaut de bille	77
Figure IV.12	Structure d'un réseau de neurones de [7 10 10].	78
Figure IV.13	Construction du bloc de RNA pour différents diamètres	79
Figure IV.14	Performances de RNA	79
Figure IV.15	Test de RN pour un fonctionnement sain	80
Figure IV.16	Test de RN pour un fonctionnement avec un défaut de bague intérieure pour un diamètre de 0.007"	81
Figure IV.17	Test de RN pour un fonctionnement de défaut bague extérieure pour un diamètre de 0.014"	81
Figure IV.18	Test de RN pour un fonctionnement de défaut de bille pour un diamètre de 0.021"	82

La machine électrique occupe une place très importante dans le milieu industriel, et devient un élément principal dans les différents domaines d'applications. Comme toute autre machine, la machine asynchrone n'est pas à l'abri d'un dysfonctionnement. Elle peut être affectée par des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator, ou du rotor, ou les deux en même temps. Les pannes peuvent être d'origine diverses, les roulements à bille étant la partie mécanique les plus sujets aux défauts dus au vieillissement et à l'usure, les défauts roulement sont les plus fréquents. Les premières approches de détection de défauts consistaient à l'analyse des signaux vibratoires issus de la machine.

L'analyse vibratoire occupe une place prépondérante dans le dépistage et le diagnostic de défauts des machines tournantes, et ce, de façon croissante en raison des performances toujours plus accrues en matière de traitement du signal. Les techniques classiques comme l'analyse de fourrier permettent aussi de mettre en relation les amplitudes et les fréquences des phénomènes vibratoire stationnaires, cependant, certains défauts mécaniques sont représentés par des signaux transitoires de caractère non stationnaires, caractérisés par des vibrations complexe, ces défauts ne peuvent être détectés dans les premières stade de leur apparition par l'utilisation de transformée de fourrier et les méthode de filtrage classique, mais ils peuvent être détecté par l'application des méthodes de traitement de signal avancée, comme la Transformée Hilbert-Huang [1]. Les techniques de diagnostic des défauts de roulement peuvent être classées en trois approches: l'analyse temporelle basée sur des paramètres statistiques, l'analyse fréquentielle et l'analyse temps-fréquence tels que la transformée en ondelettes (TO) et la Transformée Hilbert-Huang.

La transformée de Hilbert Huang dans le but d'analyser un signal non stationnaire et non linéaire. Cette transformée est composée, comme son nom l'indique de deux transformées, la transformée de Huang suivi de la transformée de Hilbert.

Dans une procédure de diagnostic, après extraction des caractéristiques, un système de classification intelligent s'impose. Plusieurs systèmes de classification intelligents ont été développés et utilisées pour la surveillance et le diagnostic, tels que les classificateurs flous, les algorithmes génétiques, les machines à vecteurs de support (SVM) et les réseaux de neurones artificiels (RNA). [2]

Nous intéressons dans ce travail au diagnostic des défauts de roulement, en utilisant un système de classification intelligent basé sur les réseaux de neurones artificiels(RNA).

Les réseaux de neurones artificiels peuvent être exploités dans le diagnostic comme outil principal de classification et de surveillance. En effet, le problème de surveillance peut être considéré comme étant un problème de reconnaissance des formes et de classification où les classes correspondent aux différents modes de défaillance du système et des formes représentant le comportement du système. [3]

Le travail réalisé dans ce mémoire présente la détection des défauts des roulements (partie rotorique) dans la machine asynchrone. L'étude simultanée du modèle simulée et expérimentale de ces défauts, Les outils d'analyse et de diagnostic de défaut sont à basés sur l'utilisation du spectre par la méthode (THH), avec une petite application du réseau de neurone.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à l'étude des composants et du fonctionnement de la machine asynchrones. Après une brève introduction des constitutions de la machine. Une citation des divers défauts pouvant affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone ainsi que les différents méthodes de détection et diagnostique de ces défauts.

Le deuxième chapitre concerne la présentation des généralités sur le roulement, la conception, les caractéristiques, les types de roulements et les différentes avaries et remèdes. est introduit à étude théorique sur l'analyse vibratoires, les différentes méthodes et technique utilisée et celle toujours en voie de développement pour l'analyse vibratoire. L'étude expérimentale des défauts du roulement par l'analyse des signaux vibratoires est présente dans ce chapitre.

Le troisième chapitre introduit la méthode de Hilbert pour le calcul de l'amplitude et la fréquence instantanée, ainsi que la méthode de décomposition empirique pour le calcul des IMFs et l'application de la transformée de Hilbert-Huang (HHT) au diagnostic des défauts de roulement : défaut de la bague externe, défaut de la bague interne, défaut de billes.

Le dernier chapitre est consacré à une étude pratique pour la détection et le suivi de l'évolution d'un défaut sur un composant mécanique en utilisant des techniques de traitement du signal avec l'application du réseau de neurone.

Et enfin, on termine par une conclusion générale.

I.1.Introduction

Ce chapitre présente, dans un premier lieu, la constitution de la machine asynchrone, puis il présentera un aperçu sur les différents types de défauts pouvant affecter les machines électriques tournantes et leurs causes. Enfin, les méthodes de diagnostic les plus fréquemment utilisées pour la détection des défauts.

I.2.Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné et à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous nous intéressons à la machine asynchrone à cage d'écureuil. Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la (Fig. I.01).[4]

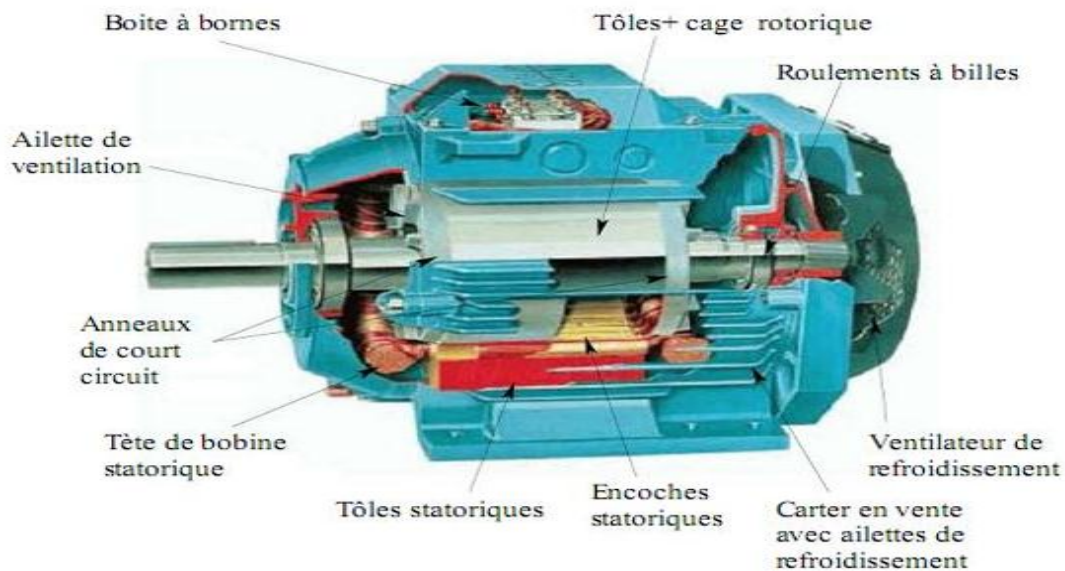


Fig. I.01:Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. [5]

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments montrés sur la figure (I.01) portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.

- ✓ Le rotor est la partie tournante constituée de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement.
- ✓ Le stator (partie fixe de la machine) : constitué de disques en tôles magnétique portant les enroulements chargées de magnétiser l'entrefer.
- ✓ Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles [5].

I.2.1.Stator

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent trois bobinages indépendants. Elles sont destinées à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou de courants triphasés. Les topologies rencontrées dans les bobinages des machines tournantes à courants alternatifs sont nombreuses. Le bobinage en lui-même nécessite toute une étude.[6]

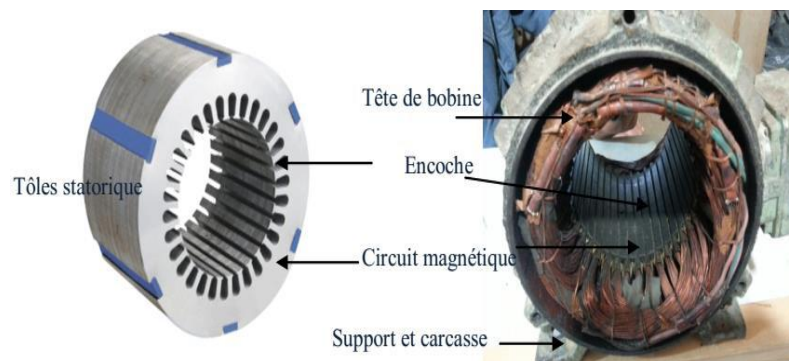


Fig.I.02: Stator d'une machine asynchrone [5]

I.2.2.Le rotor

Le rotor, monté sur l'arbre du moteur se compose d'un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0,4 à 2 mm seulement. Il existe deux types de rotor : le rotor à cage d'écureuil et le rotor bobiné. [7]



Fig. I.03: Le rotor à cage [8].

I.2.2.1. Le rotor à cage d'écureuil ou rotor en court-circuit

L'enroulement du rotor à cage d'écureuil est constituée de barres de cuivre nues introduites dans les encoches ; ces barres sont soudées ou rivées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. L'ensemble ressemble à une cage d'écureuil d'où le nom de rotor à cage d'écureuil. Dans les moteurs de petite moyenne puissance, les barres et les anneaux sont formés d'un seul bloc d'aluminium coulé. [7]

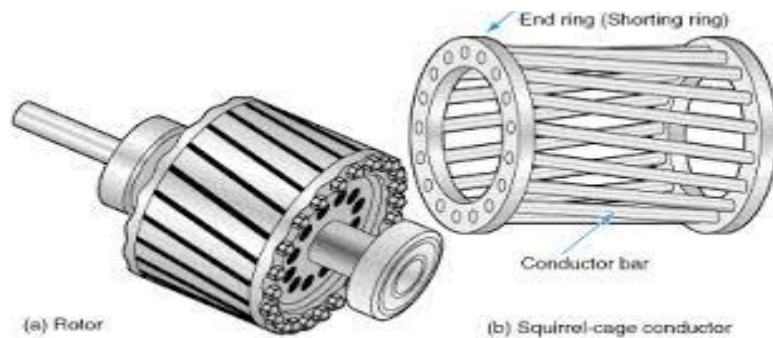


Fig. I.04: Schéma d'un rotor a cage d'écureuil

I.2.2.2. Le rotor bobiné

Le rotor bobiné comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator, placé dans les encoches. Il est composé de trois enroulements raccordés en étoile ; l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague tournant avec l'arbre. Ces bagues permettent, par l'intermédiaire de trois balais, d'insérer une résistance extérieure en série avec chacun des trois enroulements lors du démarrage du moteur. En fonctionnement normal, les trois balais sont court-circuités. [7]

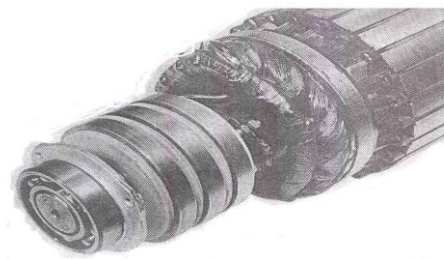


Fig.I.05: Schema d'un rotor bobiné

I.2.3. Les organes mécaniques

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

Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc....), des efforts radiaux

et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts détorsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire).

Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.[4]

I.3.Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.

Le champ tournant statorique induit un système de f.é.m. au rotor où les enroulements sont en court-circuit. Les courants induits au rotor créent une force magnétomotrice e_r qui interagit avec la force magnétomotrice e_s provenant des courants du stator. C'est ainsi que le couple électromagnétique existe à condition que :

- ◆ Le glissement g soit non nul, pour que les grandeurs induites au rotor soient non nulles.
- ◆ Les conducteurs du rotor soient fermés

De fait, il existe de nombreuses relations exprimant le couple électromagnétique C_{em} d'une machine asynchrone. Mais il est possible d'écrire qu'il résulte du produit vectoriel des vecteurs force magnétomotrice:

$$\vec{C}_e = k \vec{e}_s \wedge \vec{e}_r \quad (I.01)$$

La constante k ne dépend que de la géométrie et des bobinages de la machine [9]

I.4.Les défauts affectant les machines asynchrones à cage

Bien que les machines asynchrones à cage d'écureuil soient réputées robustes, elles peuvent parfois présenter différents types de défauts, ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique et d'origine thermique. Un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut, tout comme une utilisation non conforme de la machine.

I.5.Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

Bien que la machine asynchrone à cage d'écureuil soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique. Un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut tout comme

une utilisation non conforme de la machine. Certaines fois, nous pouvons aussi incriminer le milieu dans lequel la machine est utilisée (milieux corrosifs et/ou chimiques hostiles). [5]

La figure (I.06) récapitule la distribution des défauts dans les moteurs examinés dans les études. Par exemple on a été constaté que dans les machines asynchrones à cage, les défauts rotoriques sont plus élevés que les défauts statoriques.

Parmi ces études réalisées par *W.T.THOMSON* en 1999, la répartition des défaillances était comme suit : les roulements (41%), le stator (37%), le rotor (10%) et les autres pannes (12%) (fig. I.06-a). Après une décennie, une autre étude est menée par *A.H.BONNETT* a montré que : les enroulements (69%), le stator (21%), le rotor (7%) et les autres pannes (3%) (fig. I.06-b).

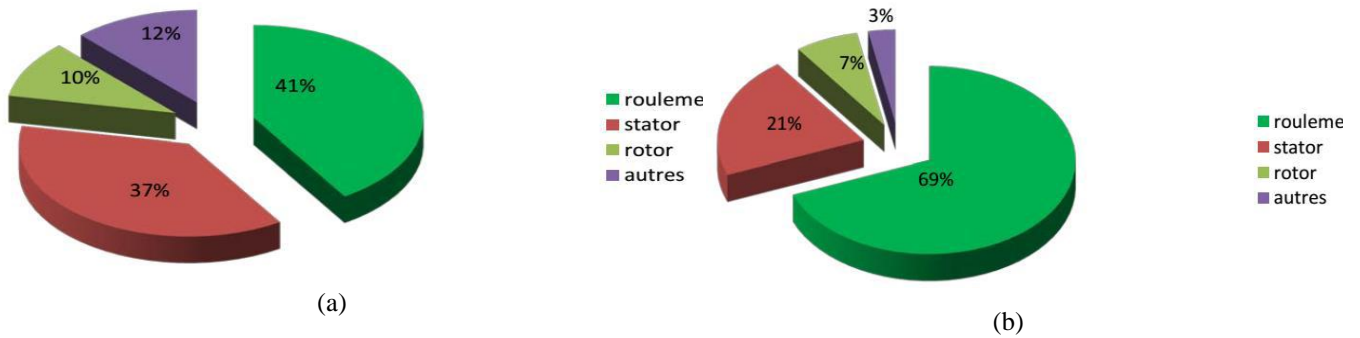


Fig. I.06: Evolution des statistiques des pannes dans machine asynchrone à cage. [5]

I.6. Les cause des défauts

Il existe 2 types de défauts principaux : Internes et externes. Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures I.07etI.08.

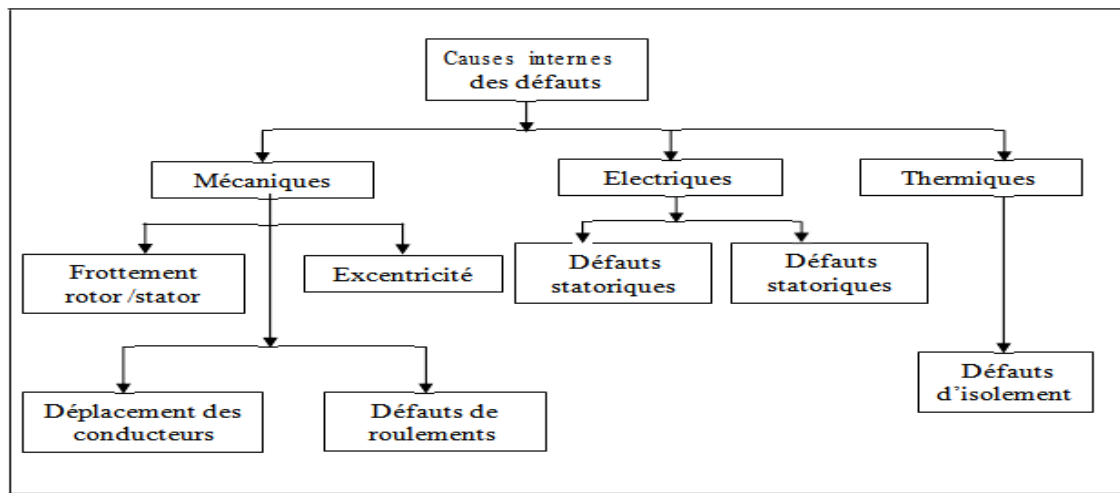


Fig. I.07: Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage. [8]

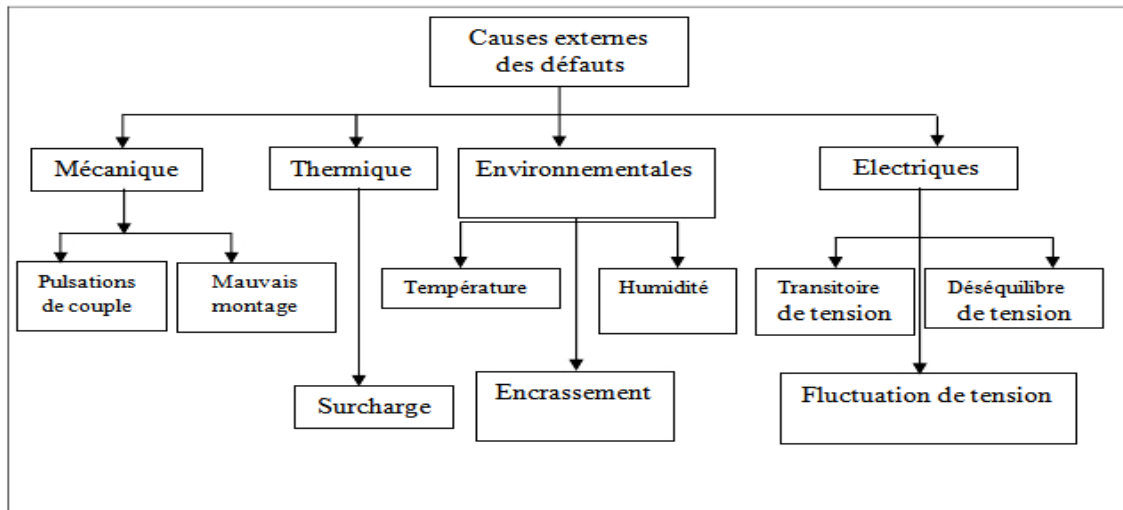


Fig. I.08 : Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage. [8]

Nous pouvons ainsi remarquer que les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique,...). Tandis que, les défauts externes sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'environnement de l'utilisation de la machine.

D'après les organigrammes (Fig. I.07-I.08), les origines des défauts sont diverses :

Thermique, mécanique, électrique ou encore environnemental. A titre indicatif, les démarrages fréquents provoquent des courants élevés dans les barres rotoriques. [10]

I.7. Les défauts affectent dans la machine

I.7.1. Les défauts statoriques

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. La quasi-totalité de ces défauts sont dus à la dégradation de l'isolant [5]



Fig. I.09: Stator d'un moteur asynchrone complètement grillé. [5]

Les défauts statoriques se manifestent sous la forme :

I.7.1.1. Défaut d'isolement dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des court-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- vibrations mécaniques.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- fonctionnement dans un environnement sévère.[11]

I.7.1.2. Court-circuit entre spire

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2^{ème} court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut. [4]

I.7.1.3. Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de

l'incidence de ce défaut sur le système. L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases. [11]



Fig.I.10: Défaut de court-circuit entre phases. [5]

I.7.1.4. Défaut de circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc. [11]

I.7.1.5. Court-circuit entre une phase et le neutre

Le courant dans la phase concernée a une amplitude supérieure par rapport au courant des autres phases. Toutefois, les courants qui parcourent ces phases sont amplifiés par rapport au cas de la machine saine. Plus important est le nombre de spires en court-circuit, plus forte est l'augmentation des courants. De plus, le facteur de puissance diminue avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit, ce qui explique la modification des bobinages, qui implique une variation de l'inductance propre de la phase affectée par le défaut et affecte les autres phases par couplage magnétique. [12]

I.7.1.6. Court-circuit phase/bâti

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type

de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut. [13]

I.7.1.7.Circuit ouvert sur une phase

Un circuit ouvert dans une phase a des conséquences moins graves qu'un court-circuit. L'ouverture d'une des phases ne fait pas circuler de courant de faute et ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de la machine. De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine. Le seul problème est donc la perte d'une phase et donc de production du couple. Dans le cas d'un moteur triphasé alimenté par un onduleur à trois bras, la seule manière de pouvoir assurer un minimum le fonctionnement est de piloter les deux phases restantes, c'est-à-dire avec un fonctionnement équivalent à une machine à une phase. Le problème vient alors des ondulations de couple importantes et du fait de ne pas pouvoir assurer un service nécessitant des changements de sens de rotation et des phases marche/arrêt fréquentes (passage par une vitesse nulle). [5]

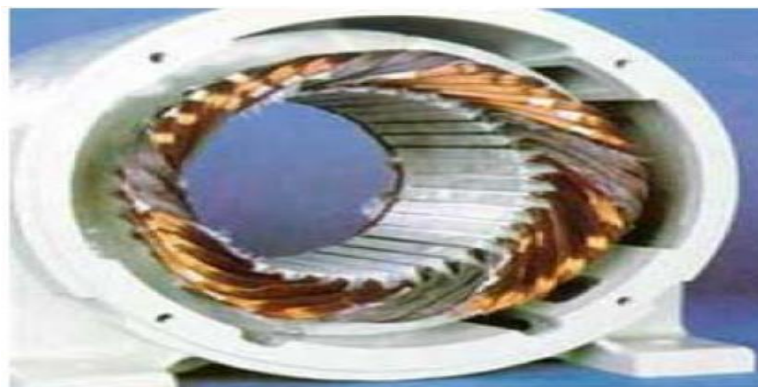


Fig. I.11:Défaut d'ouverture d'une phase. [5]

I.7.1.8.Court-circuit dans une phase

Un court-circuit dans une phase est un des problèmes les plus difficiles à tolérer. Dans ce cas, la littérature présente la phase concernée comme perdue. Sur une machine triphasée avec un onduleur à trois bras, cela implique l'arrêt de la machine à cause des conséquences physiques sur le moteur en cas

de maintien de l'alimentation. La conséquence la plus importante est l'apparition des courants de court-circuit. Le principal problème étant l'échauffement important pouvant propager la faute. L'importance des courants de faute dépend directement du nombre des spires en court-circuit. Il aussi prendre en compte le fait que des spires en court-circuit engendrent un couple résistant dû aux courants induits par le flux d'excitation circulant et les mutuelles de la machine en fonctionnement suit à la panne de la machine. [5]

I.7.2.Défauts rotoriques

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

- ✓ Défauts de cassure de barre
- ✓ Défauts d'excentricité
- ✓ Défauts de rupture des anneaux

I.7.2.1.Défauts de cassure de barre

La cassure de barre d'une machine asynchrone est le défaut le plus couramment étudié aux laboratoires. Ce défaut induit des modifications dans les courants du stator et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal. En effet, lors de l'apparition d'une cassure de barre. Des harmoniques de flux sont produits et induisent des harmoniques dans les courants des enroulements statoriques aux fréquences.

$$f_{cb} = (1 \pm 2kg) \quad (I.02)$$

Avec

$k = 1, 2, \dots$ de plus les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défectueuses. [8]

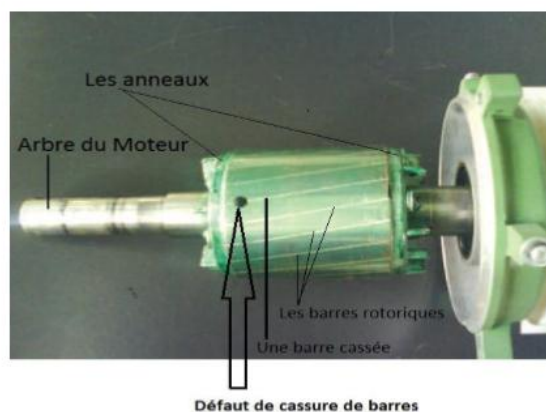


Fig.I.12:Représentation d'une barre casée. [8]

I.7.2.2. Défauts d'excentricité

La variation d'épaisseur de l'entrefer entraîne des variations dans la densité du flux d'entrefer. Les enroulements statoriques sont électriquement modifiés, ce qui entraîne des effets dans le spectre des courants. Il existe trois types d'excentricité

- ✓ **Excentricité statique:** déformation du corps du stator, positionnement incorrecte du rotor.
- ✓ **Excentricité dynamique:** le centre du rotor n'est plus confondu avec le centre de rotation.
- ✓ **Excentricité mixte :** L'apparition des deux types d'excentricité au même temps

L'excentricité dans la machine à induction augmente l'apparition des composantes additionnelles dans le spectre du courant, leurs fréquences sont données par des composantes fréquentielles suivantes :

$$f_{exc} = f_s \cdot [1 \pm k \cdot (1 - g)p] \quad (I.03)$$

Avec

$$k=1, 2, 3, \dots$$

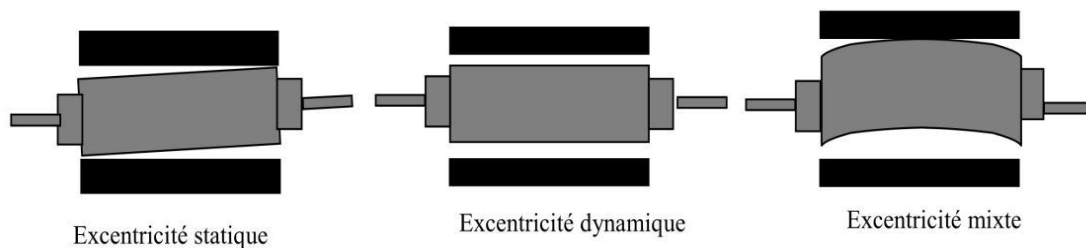


Fig. I.13: Représentation de l'excentricité dans la machine asynchrone. [8]

I.7.2.3. Défauts de rupture des anneaux

La rupture de portion d'anneau est aussi un défaut fréquent dans le rotor comme la cassure de barres. Les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. Les causes qui fragilisent l'anneau sont les bulles de coulées et les dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaires à celui provoqué par la cassure de barres. [13]

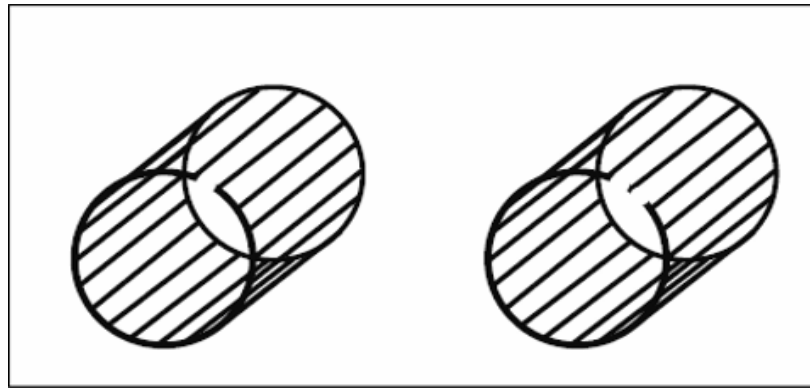


Fig. I.14 : Représentation de rupture des anneaux. [8]

I.7.2.4. Les défauts de roulement

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (Figure I.15).

En fonctionnement normal la défaillance est due à la fatigue commence par des petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences. [8]

$$f_{roul} = |f_s - kf_v| \quad (I.04)$$

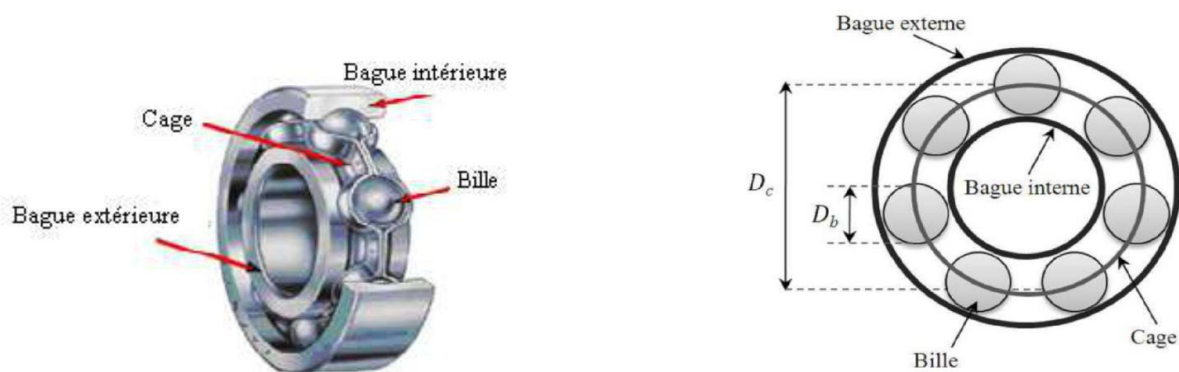


Fig. I.15 : Représentation d'un roulement à billes. [8]

I.8. Diagnostic des défauts dans machine asynchrone

I.8.1. Définition de diagnostic

Le diagnostic consiste à détecter, à localiser et éventuellement à identifier les défaillances et/ou les défauts qui affectent un système. Le diagnostic s'intègre dans le cadre plus générale de la surveillance et de la supervision.

Le mot diagnostic puis leurs peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application. Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver la cause d'une défaillance ou d'un défaut. La définition de ce dernier adoptée par les instances internationales de normalisation "AFNOR" (association française de normalisation) est la suivante: Le diagnostic est l'identification de la cause probable de là (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. Détermination du type, de la taille, de la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut. C'est une fonction qui suit la détection et inclut les fonctions de localisation et d'identification. [11]

I.8.2.Méthodes de diagnostic des défauts des machines électriques

L'historique du diagnostic des défauts est aussi vieux que les machines électriques. En règle générale, la surveillance et le diagnostic exigent la détection et l'analyse des signaux contenant des informations spécifiques (symptômes) qui caractérisent la dégradation de la machine.

Il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection de défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure, tel que la mesure du champ magnétique, du bruit, de la vibration...etc. d'autres sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur défaillant avec celles du moteur sain (courant statorique, couple électromagnétique, vitesse mécanique et puissance).[14]

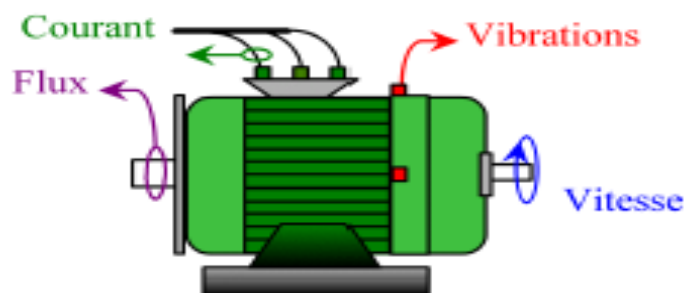


Fig. I.16: les mesures utilisées pour le diagnostic des machines asynchrones. [14]

I.8.2.1.Diagnostic par l'analyse du courant statorique

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à

affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace). [15]

I.8.2.2.Diagnostic par l'analyse des flux

Un déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou bien encore électromagnétique, situé au rotor ou au stator, peut affecter la conversion électromécanique et la répartition de champ dans et en hors de la machine. Des études ont donc été menées pour extraire de la mesure des flux d'entrefer, axial ou de fuite des signatures caractéristiques de certains défauts. Pour cela, des bobines exploratrices sont placées à l'intérieur de la machine sur les dents statoriques, à l'extérieur de la machine, parallèlement et perpendiculairement à l'axe du rotor.

L'auteur met en évidence les composantes fréquentielles du flux d'entrefer et le flux de fuite dans l'axe du rotor, respectivement, qui permettent de détecter et d'identifier des ruptures de barres rotoriques et des courts-circuits dans les enroulements statoriques. Il en déduit les fréquences caractéristiques.

Ces composantes, présentes dans le spectre du flux pour une machine saine, vont augmenter avec l'apparition d'un défaut. Certaines composantes du flux axial permettent de détecter d'éventuels défauts liés aux barres rotoriques et aux paliers. [14]

I.8.2.3.diagnostic par mesurer de la température

Un capteur peut être monté sur l'enroulement ou noyé (intégré) dans l'isolant ou placé dans la plaque à bornes est un bon indicateur de la surchauffe de la machine qui est un signe de défauts. En plus, récemment des techniques par visualisation des images thermiques par infrarouge sont utilisées pour le diagnostic des différents défauts. [5]

I.8.2.4.Diagnostic par analyse des signaux vibratoires

Le diagnostic vibratoire est une méthode très ancienne et très utilisé pour la détection des défauts dans les machines électriques.

Toutes les machines électriques produisent du bruit et des vibrations. Leur analyse peut être employée pour fournir des informations sur l'état de la machine.

Plus souvent, les mesures sont faites comme une procédure non fréquente ou lorsqu'un problème est suspecté, les mesures sont faites en utilisant des accéléromètres ou des capteurs de vitesse à boulons. Des sondes de déphasage sont aussi employées pour le contrôle du mouvement de l'arbre. Le désalignement entre les centres des supports donnant naissance à un entrefer non uniforme produit la vibration à une fréquence double, tandis que le déséquilibre mécanique engendre la vibration à la vitesse angulaire, au moment où les deux dépendent de la réponse mécanique à cette fréquence. Les signaux de vibrations détectés contiennent des informations essentielles sur l'état de la machine. L'analyse spectrale de ces signaux nous renseigne sur les différents défauts qui sont à l'origine de ces vibrations.[16]

I.8.2.5.Diagnostic basé sur l'intelligence artificielle

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment (diagnostic interne et externe), ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques liées à l'intelligence artificielle.

Ces techniques apportent aux systèmes de diagnostic des moteurs électriques la fiabilité, l'automatisation, la praticité et la sensibilité. Ces méthodes ne sont pas en concurrence avec les méthodes précédemment citées. Elles exploitent les signatures avec ou sans modèle, décrites précédemment, pour réaliser la supervision et le diagnostic du système. Elles possèdent, par ailleurs, de grandes facultés d'apprentissage. En effet, les récents développements dans le matériel et le logiciel permettent de produire un système pour la surveillance automatique des moteurs asynchrones en utilisant des techniques de traitement des signaux et des techniques de classification non supervisée pour le diagnostic des défauts.

Parmi ces méthodes, nous pouvons citer les systèmes experts, la logique floue, les réseaux neuronaux, leurs techniques hybrides etc. [14][17]

I.8.2.6.Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique

Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmoniques dans le spectre du couple électromagnétique mesuré, résultant d'une interaction entre le flux et le courant. Ce

couple peut être reconstruit, soit à partir de deux des trois courants statoriques, soit en utilisant un modèle physique de la machine.

L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même, la torsion de l'arbre entraîne l'apparition d'harmoniques dans le spectre du couple.

Les oscillations du couple, provoquées par certains défauts rotoriques, peuvent servir à détecter ces derniers.

A partir d'un modèle de la machine, l'estimation des composantes du flux rotorique dans un repère „d-q“ lié au stator peut se faire dans le but d'observer le couple électromagnétique. Il a été constaté qu'une dissymétrie électrique du rotor fait apparaître des harmoniques de dentures rotoriques, ce qui modifie le champ d'entrefer [13]. Le problème peut alors être détecté en analysant les fréquences d'encoches présentes dans le spectre du couple estimé.

Comme nous venons de le voir, les signaux évoqués précédemment permettent de détecter un grand nombre de défauts sur la machine. Cependant, ces signaux nécessitent la mise en place d'un grand nombre de capteurs (bobines exploratrices pour le flux, couple mètre, accéléromètres, transducteurs,...) souvent coûteux ou onéreux, sensibles et délicats à placer dans des environnements contraignants. Ceci limite l'application de ces techniques qui sont basées sur l'analyse de ces signaux malgré leurs avantages. D'autres techniques qui ne sont pas décrites ici, sont bien utilisées pour des applications bien particulières telles que les techniques de mesure des décharges électriques, les techniques qui utilisent les signaux infrarouges, de radiofréquence (RF) ou les techniques chimiques et d'autres, qui trouvent dans certains cas leur emploi dans les grosses machines spécifiques à un certain type de défauts. [14]

I.8.2.7. Diagnostic par les analyses chimiques

Plusieurs moteurs sont refroidis par l'air ou à l'aide d'un circuit fermé avec un échangeur de chaleur hydro réfrigéré. La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air refroidissant et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge.

L'air est tiré du moteur à travers le tube vers le détecteur infrarouge par une pompe auxiliaire. Seuls les moteurs en service sont échantillonnés et la forme de l'air de chaque moteur est analysée pendant deux minutes. L'huile de roulement est aussi analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents.

A ce stade, on peut conclure que la plupart des techniques précitées exigent l'emploi des capteurs, qui doivent être placés au niveau de la machine. C'est pour cette raison elles peuvent être utilisées que pour les machines de grande puissance.

Ces techniques sont basées généralement sur l'utilisation des grandeurs mécaniques, afin que les ingénieurs mécaniciens puissent faire leur interprétation, malgré que les machines sont des moteurs électriques. La présence des ingénieurs électriciens est nécessaire pour intervenir dans la partie électrique et pour cette raison, les techniques de diagnostics sont de plus en plus orientées vers l'emploi des grandeurs électriques vu leur accessibilité et la simplicité du capteur utilisé. [16]

I.8.2.8. Diagnostic par l'utilisation les courants de Park

Il existe une autre méthode d'analyse du courant c'est l'analyse par l'approche des vecteurs du Park. Elle est utilisée pour les moteurs alimentés par système triphasé. Les trois grandeurs de la machine sont transformés en grandeurs biphasées selon les axes " d " et " q ", et qui sont utilisées pour tracer la courbe de Lissajous $I_q = f(I_d)$. Le changement de la forme et de l'épaisseur de cette courbe donne une information sur le défaut. L'analyse spectrale du module des deux vecteurs de Park est aussi un moyen pour surveiller l'état de la machine. [5]

I.8.2.9. Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet des nombreux travaux. Car la puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase (oscillations plus importantes et plus visibles). Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres. [15]

I.9. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la composition de la machine asynchrone et présente différentes défaillances pouvant se produire sur la machine asynchrone, ainsi que les causes et les conséquences de leur apparition. Ensuite on a présenté une partie des différentes techniques de diagnostic des défauts de la machine asynchrone.

II.1 Introduction

Le diagnostic de défauts est une tâche extrêmement importante dans la surveillance. Différentes techniques de surveillance ont été développées, tels que la dynamique, les vibrations, la tribologie et la non-destruction les techniques. L'analyse du signal de vibration est l'une des plus importantes méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts des machines tournantes, et utilisée dans le suivi d'un défaut de roulement. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement est un organe de base qui assure une liaison mobile entre deux éléments d'un mécanisme en rotation l'un par rapport à l'autre.

Les vibrations causées par les roulements défectueux représentent la grande majorité des problèmes des machines. Pour chaque élément de roulement il y a une fréquence de rotation caractéristique. Avec un défaut sur un élément particulier, une augmentation du niveau de vibration à cette fréquence peut se produire.

Dans ce chapitre, on présente une étude sur les roulements et les défauts qui se présentent dont les roulements et ses causes. et une étude sur l'analyse vibratoire.

II.2.Géométrie et constitution d'un roulement

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

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

De manière générale, les roulements sont constitués de quatre composants essentiels [18] :

II.2.1.La bague extérieure

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

II.2.2. La bague intérieure

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

II.2.3. La cage

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

II.2.4. Les éléments roulants

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



Fig. II.01 : Différentes composantes d'un roulement. [18]

II.3. Caractéristiques des roulements

Les roulements sont produits sous de diverses formes et variantes ayant chacune des caractéristiques distinctes.

En comparaison avec les paliers lisses, les roulements ont les avantages suivants :

- ✓ Le couple de frottement au démarrage est plus faible et de plus n'est que légèrement supérieur au couple de frottement dynamique.
- ✓ Ils sont fabriqués suivant des normes internationales, sont interchangeables et facilement disponibles.
- ✓ Le graissage est simple et la quantité de graisse consommée est très faible.
- ✓ En règle générale, ils acceptent à la fois des charges radiales et des charges axiales.

- ✓ Leur utilisation à basse comme à haute température est possible.
- ✓ La rigidité des roulements peut être augmentée par un pré charge. [2]

II.4. Différents types des roulements

Il existe plusieurs types de roulements et sont classés selon le type d'éléments roulants (bille ou rouleau), Les roulements à billes sont classés en différentes catégories suivant la forme de leur bague (roulements à billes, à gorge profonde et à contact oblique). Les roulements à rouleaux sont classés suivant la forme des rouleaux (roulements à rouleaux cylindriques, coniques, à rotule sur rouleaux et roulements à aiguilles).

Les roulements sont également répartis en roulements radiaux qui encaissent principalement des charges radiales et les butées pour les charges axiales.

Les roulements se subdivisent encore en d'autres catégories : simple, double, ou a quatre rangées d'éléments roulants, roulements à bagues séparables ou non. [19]

II.4.1. Les roulements rigides à billes (à rouleaux cylindriques)

Ce sont les roulements les plus répandus, ils sont conçus pour des charges radiales, mais peuvent supporter une petite charge axiale. Les roulements à rouleaux peuvent supporter des charges plus élevées. [18]

II.4.2. Les roulements à aiguilles

Les éléments roulants des roulements à aiguilles sont des aiguilles dont le diamètre maximal est de 5mm et sont 3 à 10 fois plus longues que leur diamètre. La section des roulements est mince, mais la capacité de charge est élevée malgré leur taille. Etant donné le grand nombre d'aiguilles, la rigidité de ces roulements est importante. Ils sont idéaux pour des mouvements d'oscillations et de pivotement. Il existe de nombreux types de roulements à aiguilles. [19]

II.4.3. Roulements à billes à contact oblique

La ligne qui relie le point de contact de la bague intérieure, les billes et le point de contact de la bague extérieure tourne avec un certain angle (angle de contact) suivant la direction radiale. Il existe trois angles de contact standard [19] :

- ✓ Les roulements à contact oblique peuvent supporter une charge axiale, mais ne peuvent être montés seuls à cause de l'angle de contact. Ils doivent toujours être montés par paires ou combinés.
- ✓ Les roulements à billes à contact oblique à deux rangées (pistes doubles) ont un angle de contact est de 25° .
- ✓ Les roulements à billes à quatre points de contact peuvent supporter des charges axiales dans les deux directions.

II.4.4. Roulements à rotules sur billes (de même sur rouleaux)

Ce type de roulement est célèbre, inventé en 1907 par le fondateur de SKF Sven Wingquist, a permis de résoudre l'un des problèmes industriels les plus épineux de l'époque, celui des arrêts de production récurrents dus à des défaillances de roulements. Comme l'alignement des arbres n'était pas suffisamment précis pour permettre une utilisation normale des roulements rigides à billes, les pannes étaient fréquentes. Les roulements à rotule sur billes à deux rangées, qui tolèrent un défaut d'alignement pour une durée de service identique, ont permis de résoudre le problème.[18]



Fig. II.02 : différents types de roulements [18].

II.5. Les facteurs essentiels pour le choix de type de roulement

Le choix du type et de la taille d'un roulement est basé sur les conditions de fonctionnement et les caractéristiques de construction afin d'assurer un bon fonctionnement à des coûts réduits.

Les facteurs qu'il faut tenir en considération pour réaliser un choix optimal de roulement sont les suivants : [18]

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

II.6. Défauts des roulements

II.6.1. Origine des défauts de roulement

a. Mauvaise lubrification

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

b. Pollution

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

c. Mauvais montage

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

- d. **Fatigue:** Les machines ne fonctionnent pas toujours dans des conditions optimales. Surcharges, entretiens insuffisants ou inadaptés sont responsables d'environ **34%** des défaillances de roulements. Un roulement qui fonctionne dans des conditions de surcharge. [2]

II.6.2.Principaux défauts

On peut noter deux types d'avaries caractéristiques de la détérioration des roulements.

Les avaries dites naturelles dues à la fatigue des roulements et les avaries dues à un mauvais montage ou une mauvaise utilisation du roulement.

On qualifie les principaux défauts comme suit: [18]

a. Le grippage

C'est un effet d'adhérence (blocage) de deux pièces en mouvement relatif .il est caractérisé par l'apparition des traces brunes d'échauffement, laminage du métal. Il est du à leurs dilatation (jeu résiduel nul) ou à une absence de la lubrification (fig. II.03).donc, on peut dire que le grippage est un phénomène caractérisé par des micro- arrachements des particules métalliques. [20]



Fig. II.03 : Grippage. [21]

b. La corrosion

- ✓ **La corrosion chimique :** se produit par la présence de l'humidité aux points de contact des éléments roulants avec les chemins. Surtout quand les roulements viennent d'être nettoyés et sont contaminés par la transpiration des mains comme montre la figure (II.03.a). [2]
- ✓ **La corrosion de contact (fretting) :** Les surfaces de contact sont recouvertes de fines particules colorées provenant de micro-vibrations en fonctionnement. Traces de

brinelling sur les pistes provenant de vibrations lorsque le roulement est à l'arrêt comme montre la figure (II.06.b). [19]

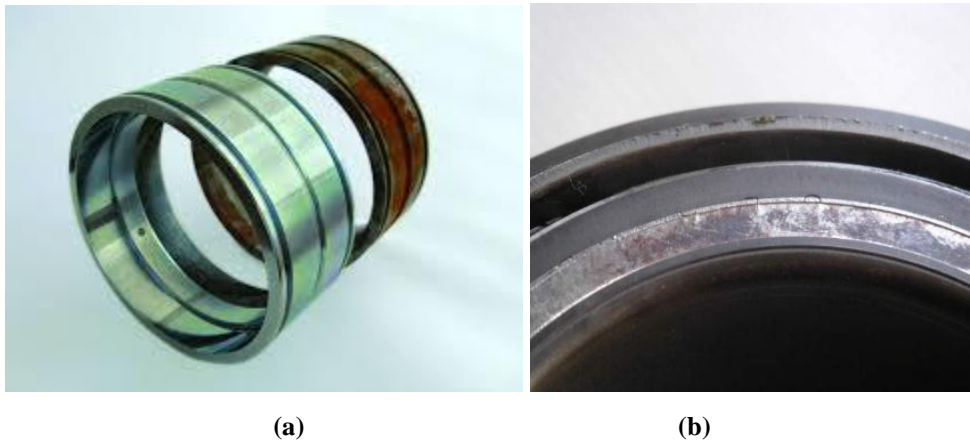


Fig.II.04: Corrosion. [21]

c. Usure

- ✓ **Usure par déformation** : C'est une déformation plastique des chemins des roulements, causée par des chocs importants ou une vibration à haute fréquence. C'est une usure sans perte de matière (présence des empreintes). [2]
- ✓ **Usure par abrasion** : L'usure par abrasion, due à une mauvaise lubrification. L'usure par abrasion donne aux roulements un aspect gris, givré. [22]



Fig. II.05 : Usure. [21]

d. La fissuration des bagues

C'est l'apparition des fissures et des petites cassures sur les éléments du roulement. Les coups lors du montage, le non-respect des portées de roulement (ajustement trop serré). sont responsables sur ce type de détérioration, elle est provoquée par une déformation plastique.[2]

e. L'écaillage

L'écaillage apparaît normalement à cause du vieillissement du roulement, mais ce n'est pas la raison unique pour que cet écaillage apparaisse, celui-ci peut arriver à cause d'une grande différence de température entre la bague interne et externe, de même, si le boîtier qui porte le roulement possède la forme ovale, on obtient le même résultat, il faut changer le boîtier immédiatement. D'autres causes peuvent être : un montage incorrect du roulement, ou une liberté axiale légère qui n'est pas suffisante pour le mouvement de la dilatation. On peut distinguer deux types d'écaillage : [23]

- ✓ **Ecaillage de fatigue** : C'est un écaillage unilatéral, il est caractérisé par des petites fissures et arrachement de fragments de matière. Il se produit lors de l'application d'une surcharge, ou lors d'un défaut désalignement comme montre la figure (II.06.a) [2]
- ✓ **Ecaillage superficiel** : Causé par une concentration de contraintes, due à une contrainte accentuée (résultent probablement d'un défaut d'alignement). Ou bien par la modification de la zone de pré charge. Aussi par la présence de particules étrangère à l'intérieur du roulement comme montre la figure (II.06.b).[2]



a



b

Fig. II.06 : Ecaillage. [21]

f. Détérioration des cages

Déformation, usure, rupture. Des statistiques plus précises montrent que 90% des défauts de roulements sont dus soit à la bague extérieure ou intérieure, rarement la cage et la bille. En effet les deux pistes subissent les effets dus à la transmission de charge par les éléments roulants ce qui les rend plus sujettes à la dégradation. [21]



Fig. II.07 : Détérioration des cages. [21]

g. Coups, fissures, cassures

Chocs violents, enlèvement de la matière en surface, fissures, rupture des bagues. [21]



Fig. II.08 : Coups, fissures, cassures. [21]

II.6.3. Classification de défaut

Les défauts de roulement sont souvent classés en fonction de la localisation du défaut (par exemple, un défaut d'une bague intérieure ou un défaut de bague extérieure).

Les défauts de roulement peuvent être classifiés en deux groupes : [19]

- ❖ Les défauts distribués,
- ❖ Les défauts localisés.

II.6.3.1. Défaut localisé

Il est défini comme un défaut dans un seul point, la surface n'est pas endommagée. Ce type de défaut produit une fréquence caractéristique de défaut ; dépend de quel surface défectueuse de roulement ; ce qui existe dans le signal vibratoire ainsi que dans le signal du courant stator.

II.6.3.2. Défaut distribué

Est un type de défaut où la surface est dégradée sur une grande partie, et devient rugueuse, irrégulière, ou déformée invisible par l'œil. Les effets produits par ce type de défaut sont difficiles à prédire puisque qu'il n'y a pas de défaut localisé. Les fréquences caractéristiques n'existent pas et ce type de défaut n'apparaît pas dans le spectre du courant statorique ou vibratoire.

La figure II.09 donne un schéma synoptique illustrant les effets des deux types de défauts et leurs manifestations

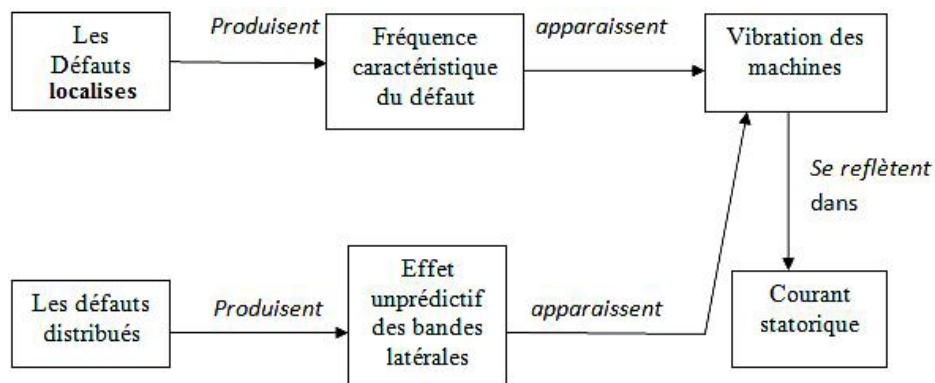


Fig. II.9 : Schéma synoptique illustrant les effets des deux types de défauts et leurs manifestations. [19]

II.7. Fréquences caractéristiques des défauts d'un roulement

Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage) ; ...etc. 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. [24]

- **Défaut sur la bague intérieure**

Sa fréquence caractéristique est donnée dans (II.01). Cette fréquence est modulée par sa fréquence de rotation de l'arbre (bandes latérales autour de la raie de défaut).

$$f_{d,bi} = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) (f_{rot} - f_{ext}) \right) \quad (II.01)$$

- **Défaut sur la bague extérieure**

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (II.02). Bien que la charge appliquée sur la bague externe soit constante, on peut remarquer une modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre autour de la fréquence de défaut.

$$f_{d,be} = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) (f_{rot} - f_{ext}) \right) \quad (\text{II.02})$$

- **Défaut sur la cage**

La fréquence de passage d'un défaut de cage est donnée par l'équation (II.03). Ce défaut se manifeste par la présence de raies à la fréquence $f_{d,ca}$, et ses harmoniques. A l'instar de la bague interne, on pourra constater des bandes latérales autour de $f_{d,er}$, (fréquence de défaut d'élément roulant) et $2 \cdot f_{d,er}$, ces bandes seront distantes d'une fréquence égale à la fréquence de défaut de la cage $f_{d,ca}$

$$f_{d,ca} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) \right) f_{rot} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) \right) f_{ext} \quad (\text{II.03})$$

- **Défaut sur l'élément roulant :** La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau), sur la bague externe ou sur la bague intérieure, est donnée par l'équation (II.04) :

$$f_{d,er} = \frac{1}{2} \frac{d_m}{d_d} \left(1 - \left(\frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) \right)^2 \right) (f_{rot} - f_{ext}) \quad (\text{II.04})$$

La figure (II.10) présente les dimensionnements d'un roulement à bille, dont les paramètres caractéristiques sont les suivantes :

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

d_m : le diamètre primitif.

d_b : le diamètre des éléments roulants.

α : angle de contact.

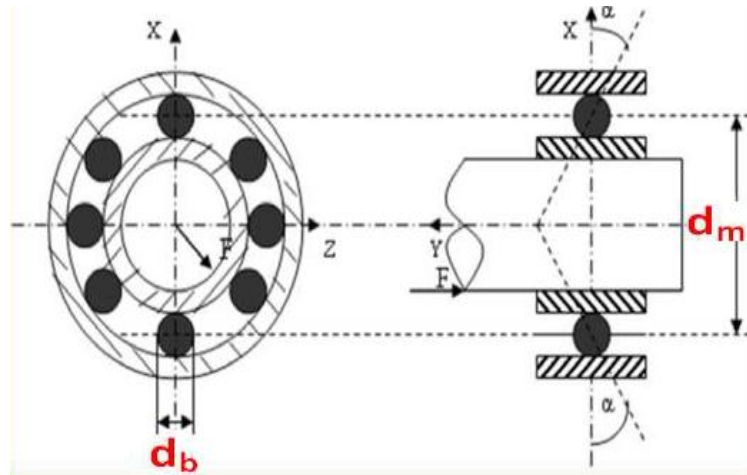


Fig. II.10: Géométrie et dimensions d'un roulement. [24]

II.8. Analyse des signaux vibratoires

Toutes les machines possédant des composants en mouvement génèrent un certain niveau de vibration. Ainsi, une machine neuve en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibrations. Aujourd'hui, l'emploi des technologies intégrant les méthodes avancées du signal occupe une place privilégiée pour faire un diagnostic d'un équipement mécanique. Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse vibratoire un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet d'améliorer la disponibilité et la sécurité, par détection précoce et le suivi de la dégradation des éléments critiques, et ainsi de localiser l'organe défectueux sans démontage de la machine. [2]

II.8.1. Définition d'une vibration

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va-et-vient autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre, si l'on observe le mouvement d'une masse suspendue à un ressort, on constate qu'il se traduit par :

- ✓ Un déplacement : la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre ;
- ✓ Une vitesse de déplacement : variation du déplacement par rapport au temps ;
- ✓ Une accélération : variation de la vitesse par rapport au temps. [23]

II.8.2. Objectifs de l'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- la détection des défauts ;
- l'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- soit dans le domaine temporel ;
- soit dans le domaine fréquentiel ;
- soit dans les deux à la fois. [23]

Les avantages de l'analyse vibratoire sont :

- détection de défauts à un stade précoce ;
- Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi ;
- autorise une surveillance continue.
- permet de surveiller ;
- l'équipement à distance.

Les inconvénients de l'analyse vibratoire sont :

- les spectres des signaux vibratoires sont parfois difficile à interpréter.
- dans le cas de la surveillance continue, les installations sont relativement coûteuses.

[25]

II.8.3. Caractéristiques d'une vibration

Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature.

- **Fréquence :** La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz [Hz] : 1 hertz = 1 cycle/seconde.

Une vibration qui se produira 20 fois par seconde aura donc une fréquence f de 20 hertz. [25]

- **Amplitude :** On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre et on peut définir l'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête ou niveau crête, l'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête ou niveau crête-crête. [23]

II.8.4. Nature d'une vibration

Une machine tournante quelconque en fonctionnement génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante:

- ❖ Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple (fig. II.11 a) ou sinusoïdal complexe (fig. II.11 b) représentatives du fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques (rotation de lignes d'arbres,

engrènements,...) ou d'un certain nombre d'anomalies (déséquilibre, désalignement, déformations, instabilité de paliers fluides, déversement de bagues sur roulements, ...).

- ❖ Les vibrations périodiques de type impulsionnel (fig. II.11c) sont appelées ainsi par référence aux forces qui les génèrent et à leur caractère brutal, bref et périodique. Ces chocs peuvent être produits par des événements normaux (presses automatiques, broyeurs à marteaux, compresseurs à pistons, ...) ou par des événements anormaux comme l'écaillage de roulements ou un défaut sur des engrenages, un jeu excessif, ...
- ❖ Les vibrations aléatoires de type impulsionnel (fig. II.11 d) peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe. [25]

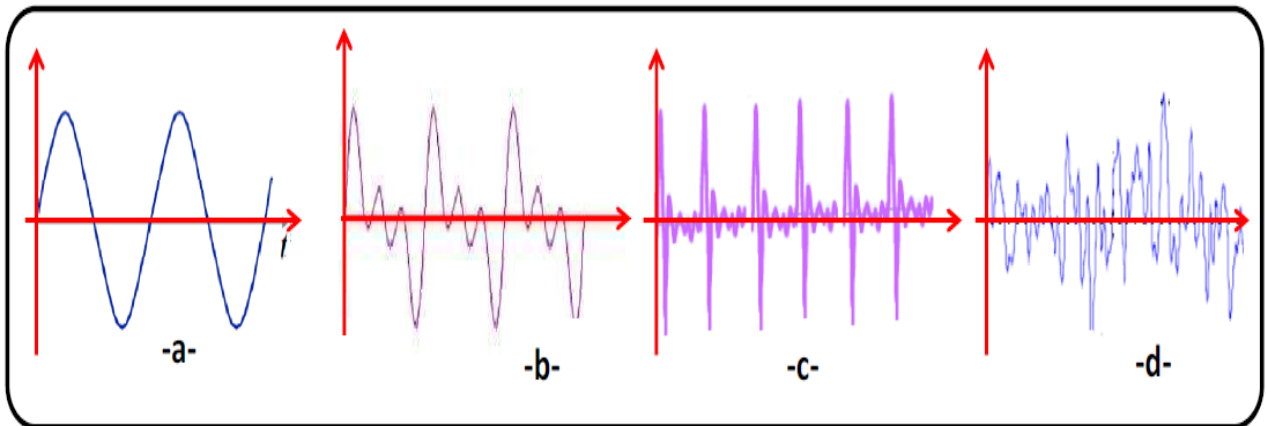


Fig. II.11 : Nature d'une vibration. [25]

II.9. Détection d'un défaut dans les roulements

La détection d'un défaut nécessite d'une part une prise de mesure vibratoire puis une exploitation du signal recueilli. Nous rappelons dans ce paragraphe l'essentiel de la démarche à suivre :

a. Paramétrage de l'échantillonnage

Un échantillon discret est l'ensemble des valeurs d'un signal continu prises aux instants

$$t_i = t_0 + i\Delta t$$

La discrétisation d'un signal induit une perte d'information qui peut être préjudiciable au diagnostic. Cette perte d'information est liée au nombre des composantes des fréquences élevées qu'introduit le processus de discrétisation (théorème de Shannon). L'opération de

discrétisation est effectuée périodiquement sur le signal temporel à une période T_e . La fréquence d'échantillonnage équivaut alors à $f_e = 1 / T_e$ comme le montre la figure (II.12) :

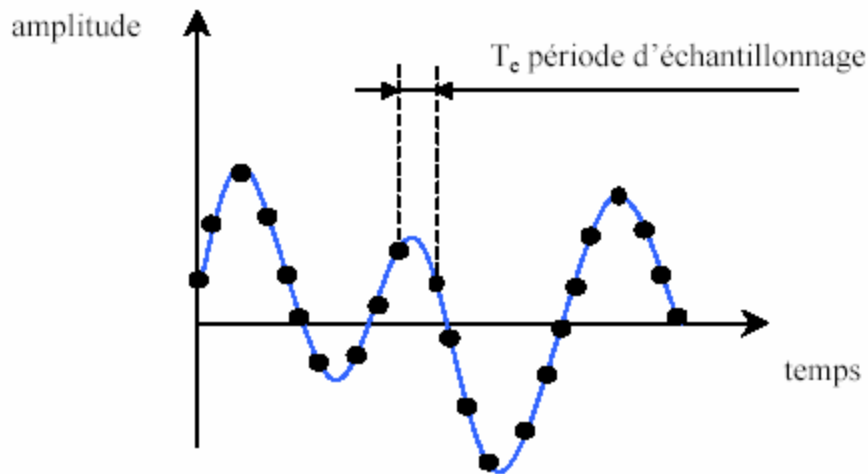


Fig. II.12 : Discrétisation du signal. [20]

L'application du théorème de Shannon permet d'éviter le recouvrement spectral mais pour cela il faut choisir $F_e \geq 2 \cdot F_{max}$. En pratique, la valeur couramment choisie pour la fréquence d'échantillonnage est $F_e \geq 2.56 F_{max}$

Il est alors possible d'en déduire le temps d'acquisition : T_{acq} qui correspond à la durée d'observation du signal.

Soit

$$T_{acq} = N_e T_e = \frac{N_e}{T_e} = \frac{N_e}{2.56 f_{max}} \quad (\text{II.05})$$

b. Résolution

Pour réaliser de bonnes mesures, il est nécessaire de choisir une résolution appropriée dans la bande de fréquences de travail. Une résolution est satisfaisante lorsqu'elle permet de dissocier des fréquences voisines. Elle dépend de la largeur de la bande de fréquences, du nombre de points N_e et du nombre de lignes de l'analyseur

Avec :

$$\Delta f = \frac{\text{fréquence pleine échelle}}{\text{nombre de lignes}}$$

Nombre de lignes

$$\frac{N_e}{2.56}$$

Autrement dit :

$$\Delta f = \frac{F_e}{N_e} = \frac{1}{N_e \cdot T_e} = \frac{1}{T_{acq}} \quad (\text{II.06})$$

En général, pour séparer deux composantes dont l'espacement fréquentiel est de δf , une Résolution de $r = \delta f/4$ est nécessaire. Une mauvaise résolution peut engendrer un mauvais diagnostic notamment si les pics des fréquences sont proches. [20]

II.10. Les méthodes d'analyse

Les machines en fonctionnement induisent généralement des vibrations. Pour assurer leurs surveillances on doit prendre en considération l'analyse de ces vibrations. Afin de détecter d'événement dysfonctionnements de suivre leur évolution, certains cas nécessitent simplement un calcul ou relevé d'un indicateur suivi d'une comparaison avec un seuil.

D'autres, nécessitent une analyse plus fine par outils de traitement du signal, afin de localiser les éléments défectueux. Nous présentons quelques outils de traitement du signal adéquats à la détection et au diagnostic des défauts. [20]

II.10.1. Les méthodes temporelles

Les méthodes temporelles sont basées sur l'analyse statistique du signal recueilli, elles sont basées directement sur la variation de la grandeur vibratoire mesurée par rapport au temps. Cette méthode utilise des indicateurs qui permettent évaluent l'état de fonctionnement global des équipements mais ne localisent pas le défaut. L'indicateur le plus utilisé est : [26]

✓ Valeur efficace ou valeur RMS (RootMean Square)

Le RMS, nommée aussi valeur efficace ou moyenne quadratique d'un signal, correspond à la racine carrée du moment d'ordre deux et est calculé comme montré par l'équation (II.07) :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2} \quad (\text{II.07})$$

Le RMS est un des premiers indicateurs utilisés en industrie, dû notamment à sa simplicité et à sa rapidité d'exécution. Une variation excessive du niveau RMS signifie en général un changement de l'état de fonctionnement et donc une défaillance. L'un des inconvénients

majeurs de l'utilisation du RMS c'est qu'il donne généralement une alarme assez tardive, notamment pour le cas des défauts de roulements, où la variation du signal due à l'apparition du défaut est masquée par d'autres composantes d'amplitudes plus élevées. [1]

✓ **Pic (Peak) :**

C'est la valeur maximale par rapport aux points d'équilibre (niveau crête) définie comme :

$$a_{peak} = SUP_{1 \leq k \leq N} |a_k| \quad (\text{II.08})$$

✓ **La valeur crête V_C**

La valeur crête représente la valeur maximale du signal. Pour un signal $x(n)$, la valeur crête est donnée par :

$$V_C = sup|x(n)| \quad (\text{II.09})$$

C'est un indicateur qui caractérise l'amplitude maximale des chocs. Il se manifeste dès l'apparition de la première écaillure 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 (RMS, V_C) 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). [23]

✓ **Facteur de crête**

Contrairement à la valeur efficace de l'amplitude d'un signal, les indicateurs spécifiques comme le facteur de crête ou le Kurtosis sont mieux adaptés pour représenter un signal induit par des forces impulsionnelles tels que les écaillages de roulements. Ces indicateurs sont issus des valeurs crêtes du signal temporel mesuré. Le facteur crête, défini comme étant le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace.

$$FC = \frac{sup|x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2}} \quad (\text{II.10})$$

Le facteur crête a l'avantage de détecter les défauts avant la valeur efficace. Ceci provient du fait que pour un roulement sans défaut, le rapport reste sensiblement constant et augmente lorsqu'une dégradation apparaît alors que la valeur crête croît pendant que la valeur efficace reste à peu près constante. [21]

✓ **Facteur d'impulsion :**

Est utilisé pour indiquer défaut dans les machines tournantes et il est défini en tant que rapport entre la valeur de crête à la valeur moyenne du signal. [2]

$$IMF = \frac{a_{peak}}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |a_k|} \quad (\text{II.11})$$

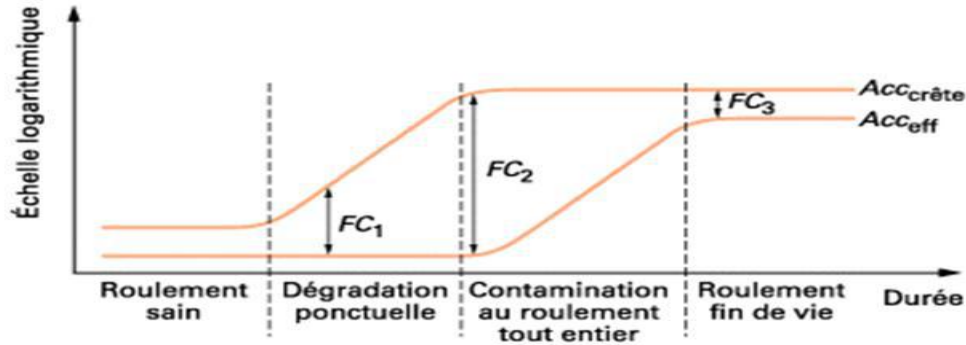


Fig. II.13 : Evolution des valeurs crête, efficace et du facteur crête. [27]

✓ Le kurtosis

Le Kurtosis est le moment d'ordre 4 normé de la distribution statistique du signal. C'est un indicateur permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut de roulement. Dans le cas d'un roulement sans écaillage, la distribution des amplitudes contenues dans le signal recueilli est gaussienne ce qui entraîne une valeur de Kurtosis proche de 3 (moment d'ordre 4 d'un signal gaussien égale à 3). Lorsqu'un défaut est détecté, sa valeur devienne supérieure à 3. L'analyse des défauts de roulement par le Kurtosis peut également être réalisée dans différentes bandes de fréquences liées aux résonances de la structure.

$$K_U = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (\text{II.12})$$

Le principale avantage du Kurtosis réside dans le fait qu'il ne tient pas compte de l'historique, et qu'il donne une valeur intrinsèque de l'état du roulement.

Le Kurtosis doit cependant être utilisé avec beaucoup de précaution, car il est très sensible aux chocs ce qui oblige un emploi du Kurtosis dans un environnement peu complexe afin de ne pas commettre d'erreurs de diagnostic. [23]

✓ Talaf et Thikat : deux nouveaux descripteurs

Dans cette étape démontrée qu'une combinaison appropriée descripteurs scalaires conventionnels peut conduire à deux paramètres appropriés additionnels qui pourraient être s'applique uniquement à prédire futures défaillances et le suivi des défauts dès les premières

manifestations de dégradation aux derniers signes de défaillance catastrophique pour aider les gestionnaires planifier leur maintien opérations.

En outre, ces indicateurs scalaires sont incapables de détecter les défaillances résultant d'un grand nombre de défauts ou des dommages répandus, ou ceux qui se produisent à des vitesses de rotation élevées. Ils révèlent la propagation de défaut mais ne prédisent pas lorsque le défaut deviendra excessif. Basé sur l'analyse des tendances susmentionnées, il apparaît que la combinaison d'une certaine manière le kurtosis et les paramètres RMS peuvent décrire correctement l'existence de défauts de surface et leurs effets, en commençant dès les premiers signes de dégradation à la fin quand signes de dégradation grave sont observés. Donc, nous avons défini un nouvel indicateur appelé TALAF :

$$\text{TALAF} = \log \left[k_u + \frac{\text{RMS}}{\text{RMS}_0} \right] \quad (\text{II.13})$$

Où RMS0 représente la valeur efficace sans défaut ou bien une valeur initiale qu'on relève au début de la surveillance vibratoire.

Il est vivement recommandé que, une fois un roulement défectueux est identifié, les données doivent être notées périodiquement; la plupart des gestionnaires de la maintenance deviennent perplexes sur l'évolution de l'endommagement et de l'action appropriée à prendre :

- ✓ Quand faut une machine être mise hors-service en présence de la détérioration des conditions de défaut, et pourrait-il rester fiable et sécurisé jusqu'à ce que le prochain arrêt de production planifié.
- ✓ Combien de temps le roulement endommagé dernier, où devrait-il être réparé immédiatement?

Pour répondre à ces questions, un nouveau paramètre appelé THIKAT, exprimé dans l'équation (II.14), a été conçu pour intégrer des données provenant de plusieurs paramètres (Ku, RMS, CF, Peak) en une seule unité d'information :

$$\text{THIKAT} = \log \left[(k_u)^{CF} + \left(\frac{\text{RMS}}{\text{RMS}_0} \right)^{\text{Peak}} \right] \quad (\text{II.14})$$

Le principal avantage d'utiliser Thikat est que le kurtosis donnerait une alarme trop tôt à la fin de l'étape deuxième de la dégradation tandis que Thikat donnait une alarme à la fin de la troisième phase de la dégradation. Lorsque le dommage augmente énormément, Thikat devient nulle et il est impératif d'arrêter la machine [2]

II.10.2. Les méthodes fréquentielles

Les méthodes fréquentielles sont basées sur la transformée des Fourier. La connaissance des fréquences caractéristiques permet d'identifier et de localiser les défauts issus des composants mécaniques en analysant leur spectre. Elles sont souvent utilisées pour les machines complexes comportant beaucoup de composants mécaniques.

✓ Analyse en fréquence

L'analyse en fréquence est devenue l'outil fondamental pour le traitement des signaux vibratoires. Elle s'appuie sur la transformée de Fourier (équation II.11) 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 (équation II.12) sur des signaux numérisés.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (\text{II.15})$$

$$X_{(k\Delta f)} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nt_e) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \quad (\text{II.16})$$

A partir de la figure (II.13), on peut visualiser la transformée de Fourier de la somme de deux signaux sinusoïdaux de fréquences respectives 140 et 250 Hz. [27]

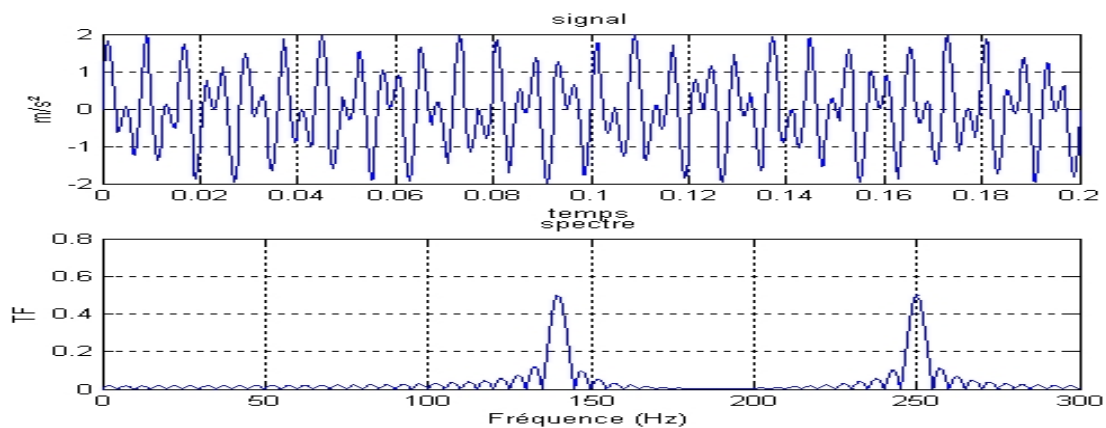


Fig. II.14 : Transformée de Fourier d'une somme de deux sinusoïdes [27]

✓ Les méthodes temps-fréquences

Il s'agit de caractériser dans le domaine fréquentiel des signaux non stationnaires, par exemple ceux dont les caractéristiques varient dans le temps. On peut par exemple citer, les

signaux acoustiques et vibratoires générés par un moteur diesel durant un cycle. De tels signaux seront la résultante de phénomènes (successifs) : la compression, puis l'injection et enfin la combustion qu'il est d'intérêt de caractériser en fréquences (quelles sont les phases les plus bruyantes, existe-t-il des résonances de soupapes, de la chambre, etc...), et ce, pour chaque cylindre. C'est ce que peut fournir l'analyse temps-fréquence. Plusieurs méthodes ont ainsi été développées pour améliorer les performances du « spectrogramme » qui voit sa «résolution » fréquentielle diminuer lorsque l'on se concentre sur une région temporelle courte. [1]

✓ Les méthodes temps-échelles

Les méthodes temps-échelles sont basées sur la transformée en ondelettes. Elles consistent à décomposer le signal en une somme d'ondelettes dilatées ou non et localisées temporellement. Cette analyse est multi résolution. Nous obtenons une bonne résolution fréquentielle en basses fréquences, et temporelle en hautes fréquences.

Notons que les ondelettes sont utilisées soit pour réaliser un dé-bruitage du signal, soit pour réaliser un diagnostic en analyse vibratoire.

Une ondelette désigne une fonction qui oscille sur un intervalle de longueur finie (un temps donné si la variable est du type spatial). [26]

II.11. Etude du système de roulement

II.11.1. Banc d'essais expérimentaux

La base de donnée utilisée c'est un ensemble des signaux vibratoires de roulement provient de " Case Western Reserve University Bearing Data Center " voir le site : (<http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/home>). La base de données des roulements à billes normaux ou défectueux, sont recueillis sur un banc d'essai, composé d'un moteur, d'un accouplement et d'une génératrice. Des défauts sous forme de points de différents diamètres et profondeurs ont été créés sur les différentes parties des roulements [22]

Comme représenté sur la figure (II.15), le banc d'essai se compose principalement d'un moteur (à gauche), d'un accouplement « transducteur/encodeur » (au centre), d'un dynamomètre (à droite) et des circuits de commande (non montrés).

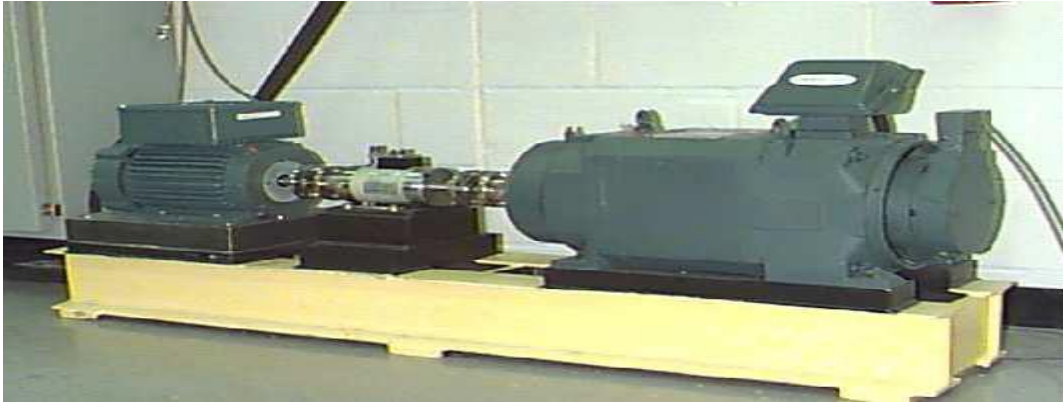


Fig. II.15 : Le banc d'essai Américain (Data bearing center).

II.11.2. Identification des roulements utilisés

Les roulements testés soutiennent l'arbre du moteur des deux cotés (coté entraînement et coté ventilateur). Des simples défauts sous forme de points ont été créés sur les roulements d'essai, en utilisant l'usinage électro-décharge.

Les défauts allant de 0,007 pouces à 0.028 pouces de diamètre ont été introduits séparément dans:

- ✓ La bague intérieure
- ✓ L'élément roulant (la bille)
- ✓ La bague extérieure de roulement

Les signaux ont été enregistrés à l'aide des accéléromètres, qui ont été fixés à la cage du moteur par aimant. Pour différents couples résistants

Les couples sont respectivement 0, 1, 2, 3 HP dont des vitesses respectives sont 1797, 1772, 1750, 1730 tr/min.

Le couple résistance(HP)	La vitesse (tr/min)	Fréquence(Hz)
0	1792	29.95
1	1772	29.53
2	1750	29.16
3	1730	28.83

Tableau II.1. Fréquences caractéristiques pour les défauts de roulement avec les différents couples résistants [24]

- Les capteurs ont été placés à la position 12 heures « verticale », des deux cotés accouplement et ventilateur de la cage du moteur.
- La fréquence d'échantillonnage est $f_e = 12\text{KHz}$ et le nombre d'échantillons de chaque signal est de 4096 points.

➤ Tous les fichiers de données sont en format Matlab (*.mat). Chaque fichier contient trois données : signaux de vibration des deux cotés accouplement et ventilateur ainsi que la vitesse de rotation du moteur. Pour tous les fichiers, le nom des variables utilisés:

- * DE - données de coté accouplement de l'accéléromètre
- * FE - données de coté ventilateur de l'accéléromètre
- * BA- les données de base de l'accéléromètre
- * Temps - les données de séries chronologiques. [22]

Dans ce travail, les roulements que nous avons considérés, sont les roulements de coté accouplement. Les fréquences caractéristiques sont :

- ✓ Fréquence de la bague intérieure : $f_{bi} = 5.415 \times f_r$
- ✓ Fréquence de la bague extérieure : $f_{be} = 3.584 \times f_r$
- ✓ Fréquence de la cage : $f_c = 0.3982 \times f_r$
- ✓ Fréquence de la bille : $f_b = 4.7135 \times f_r$

L'élément défaillant	La bague externe	La bague interne	La cage	L'élément roulant (la bille)
Diamètre en (mm)	2.0472	0.9843	0.5906	0.3126
Fréquences de défauts du roulement (Hz)	3.5848	5.4152	0.3983	4.7135

Tableau .II.2. Fréquences caractéristiques pour les défauts de roulement avec les différents couples résistant. [24]

II.11.3.Représentation des signaux temporels

Les figures ci-dessous montrent les signaux vibratoires temporels enregistrés pour un fonctionnement sain et avec sans défaut de roulements coté accouplement, pour quatre niveaux de charge (0, 1, 2,3 HP), 12.000 points/seconde.

➤ Etat sain

La figure (II.16) présente les signaux vibratoires pour différents niveaux de charges (0HP ,1HP, 2HP ,3HP) lorsque le roulement est à l'état sain.

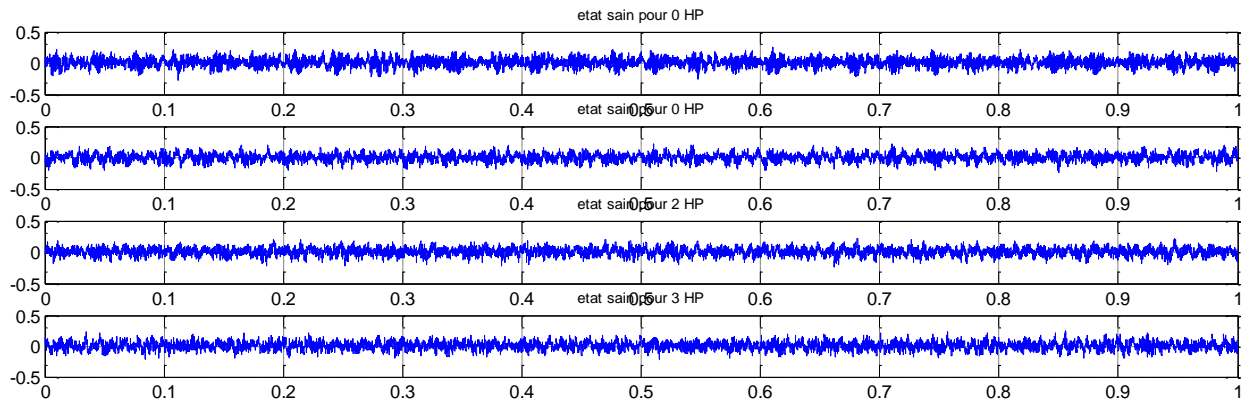


Fig. II.16 : Signaux temporels vibratoires de l'état sain.

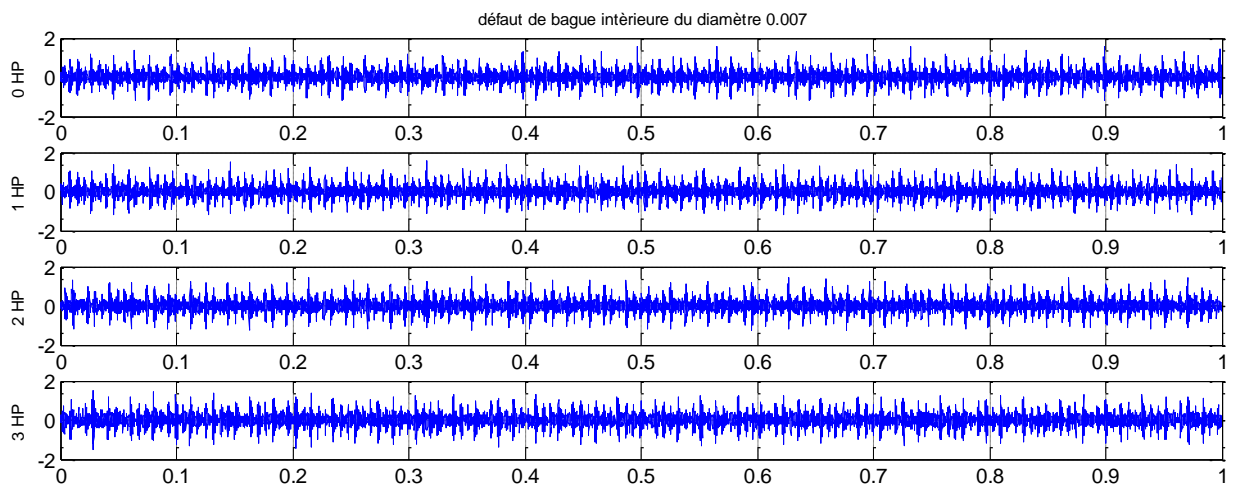
1 mil=0.001 inches

Inches = pouces=25.4mm, 1 HP=745.69 Watt

➤ **Défauts de roulement coté accouplement**

Les figures ci-dessous montrent les signaux vibratoires temporels lors de défauts de roulement coté accouplement avec respectivement 12.000 pts/s pour cinq(05) types de défauts: défaut de bague intérieure, défaut de bille, défaut de bague extérieure centrée, défaut de bague extérieure orthogonale et défaut de bague extérieure opposée, avec déferant diamètre (0.007", 0.014", 0.021", 0.028").

➤ **Défaut de bague intérieure**



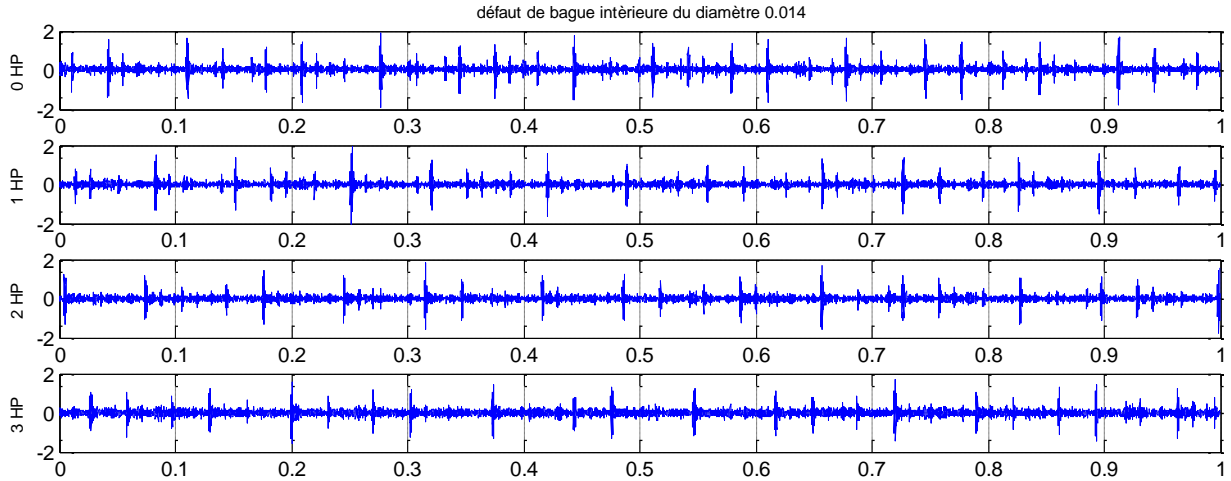


Fig. II.17 : Les signaux temporels de test sur la bague intérieure pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.007", 0.014")

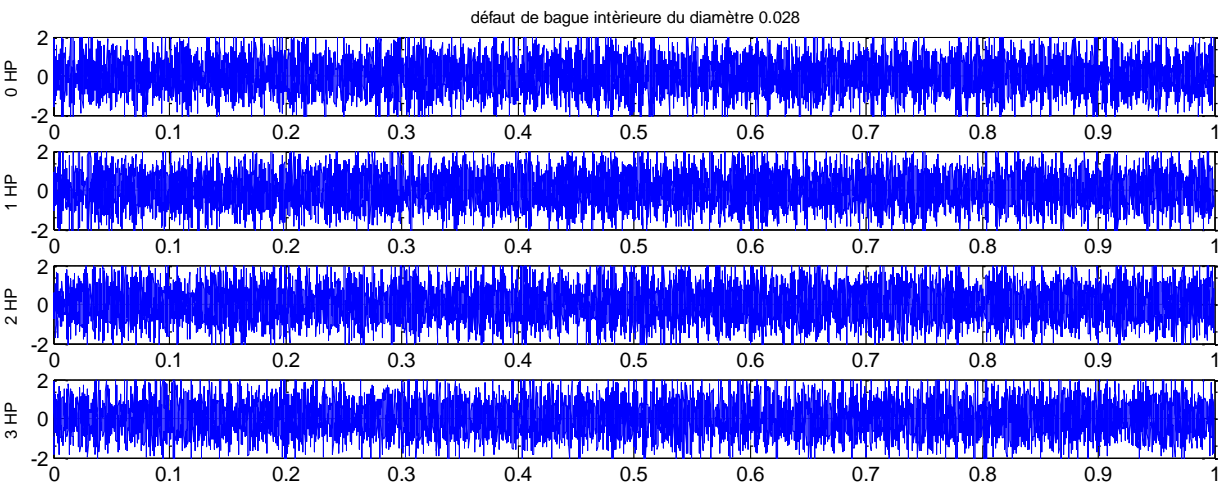
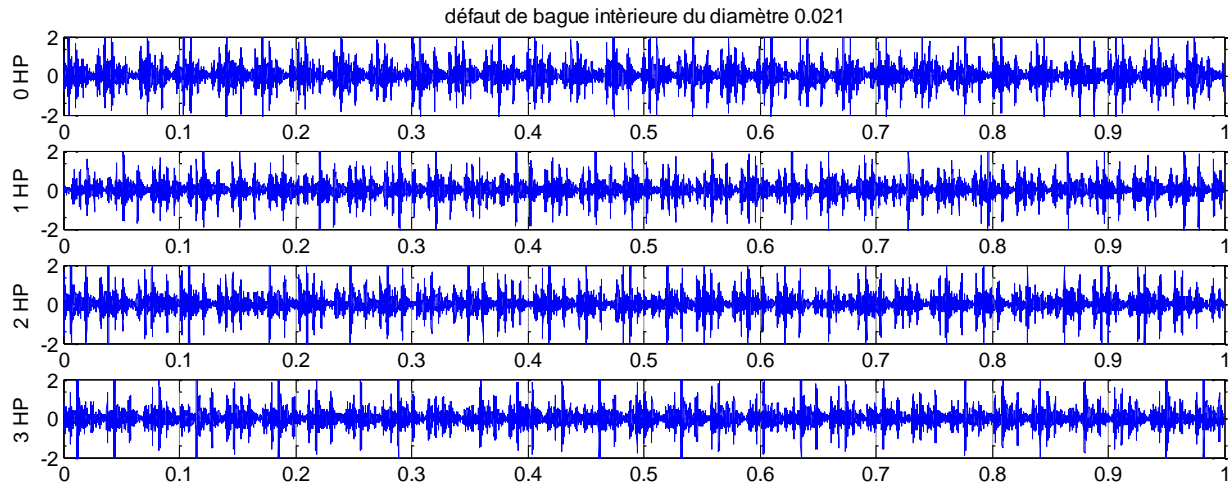


Fig. II.18 : Les signaux temporels de test sur la bague intérieure pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.021", et 0.028")

➤ **Défaut de bille**

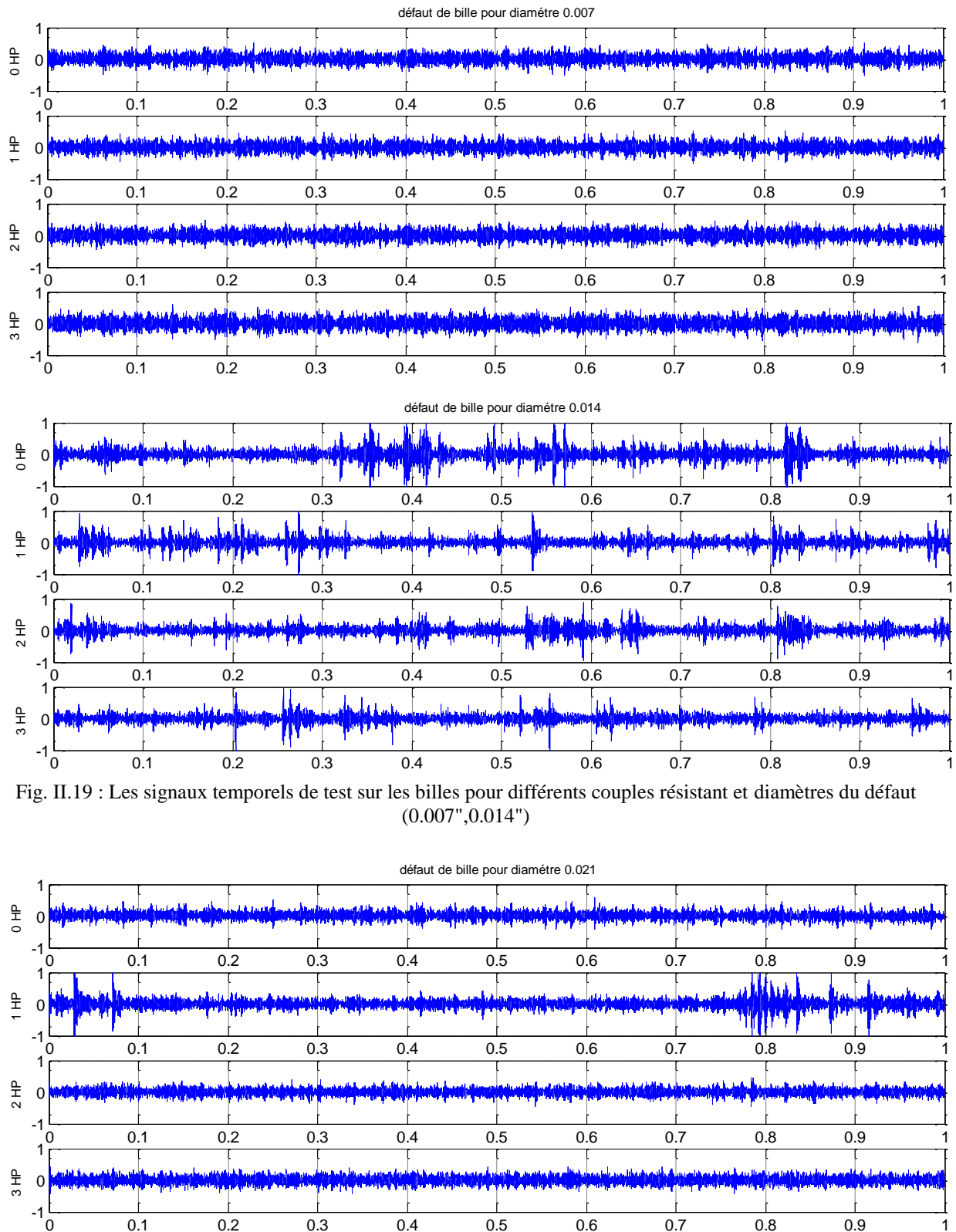


Fig. II.19 : Les signaux temporels de test sur les billes pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.007",0.014")

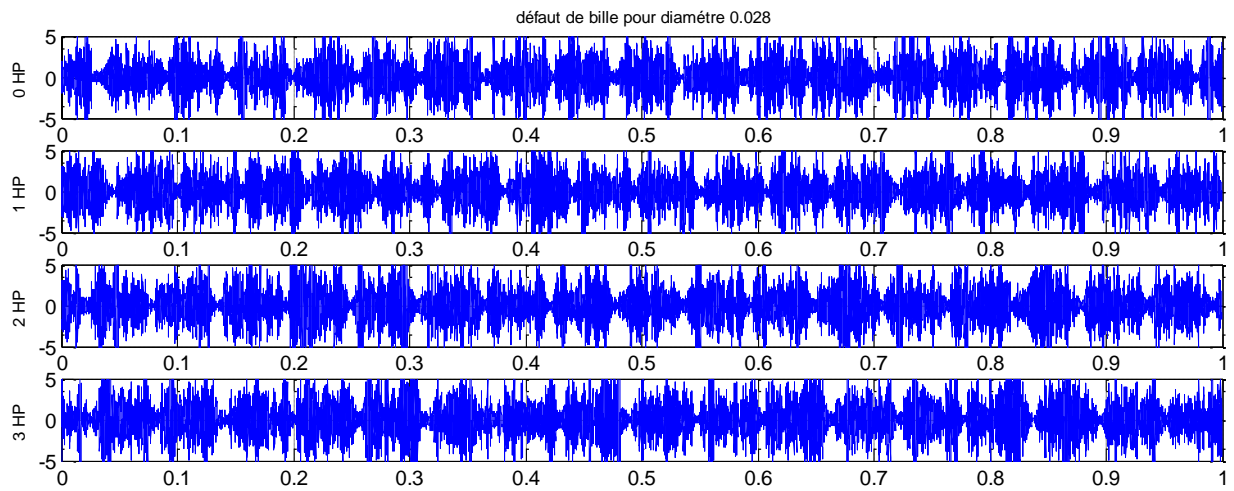


Fig. II.20 : Les signaux temporels de test sur les billes pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.021", et 0.028")

➤ **Défaut de bague extérieure centrée**

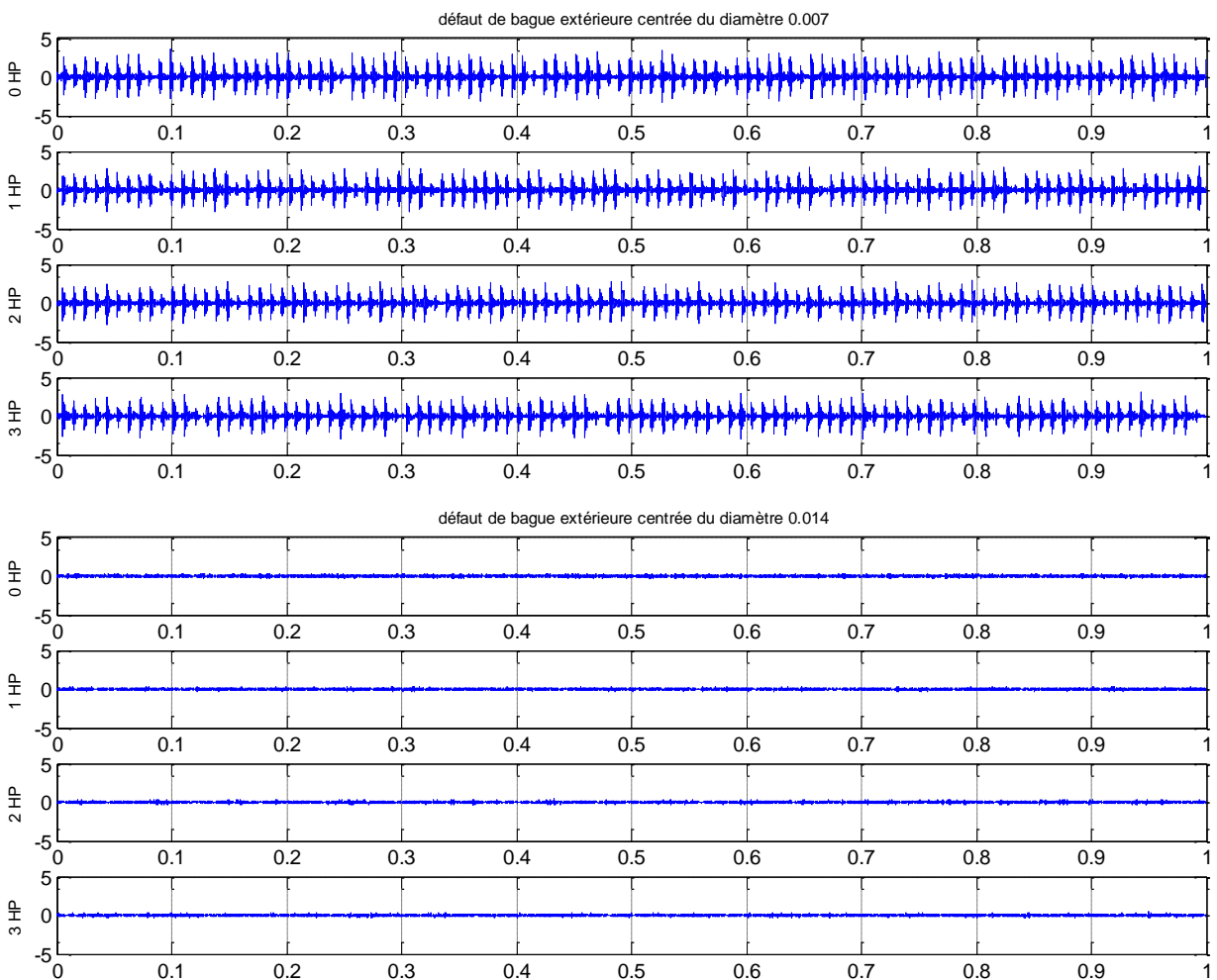


Fig. II.21 : Les signaux temporels de test sur la bague extérieure pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.007", 0.014")

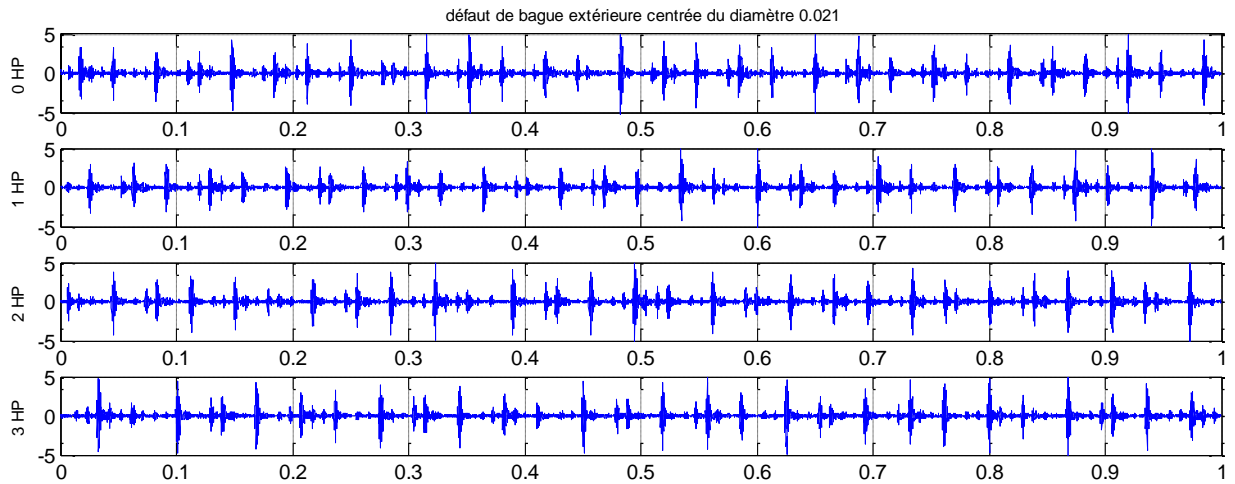


Fig. II.22 : Les signaux temporels de test sur bague extérieure centrée pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.021")

➤ **Défaut de bague extérieure orthogonale**

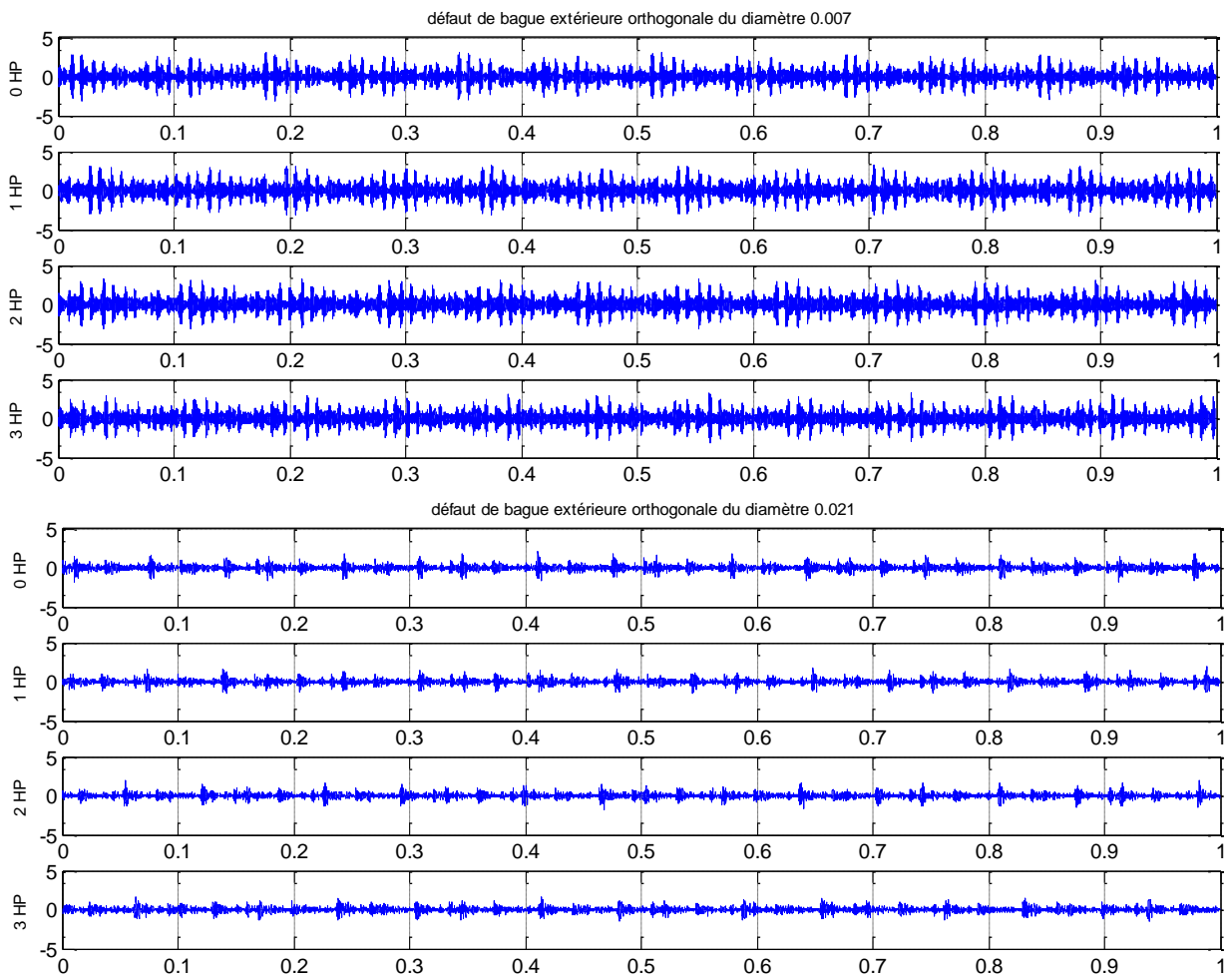


Fig. II.23 : Les signaux temporels de test sur bague extérieure orthogonale pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.007",0.021")

➤ défaut de bague extérieure opposée

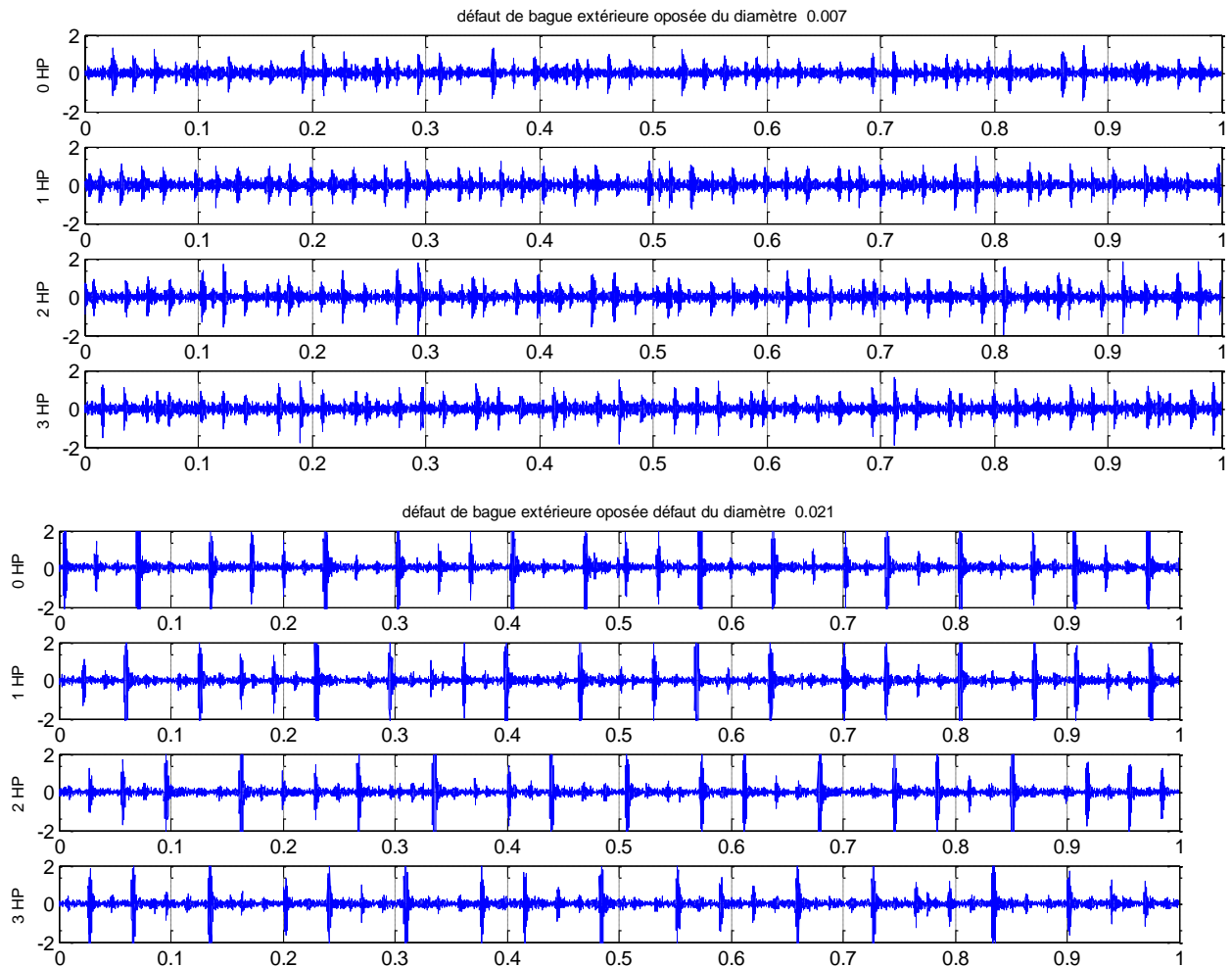


Fig. II.24 : Les signaux temporels de test sur bague extérieure opposée pour différents couples résistant et diamètres du défaut (0.007",0.021")

Les représentations temporelles des signaux vibratoires pour tous les cas montrent que les amplitudes (m/s²) des signaux ont des valeurs trop faibles, donc, il faut faire une normalisation de données par rapport aux valeurs moyennes en décibelle (db).

II.12.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu qu'il existe plusieurs types de roulements dans l'industrie, chaque type de roulements présente des caractéristiques qui dépendent de sa conception, et nous avons présenté les principaux défauts des roulements et on a mentionné les fréquences caractéristiques de chaque défaut.

Ensuite, nous avons donné un aperçu général sur les techniques de la surveillance pour les roulements basés sur les traitements et les méthodes les plus utilisés dans le domaine de traitement des signaux vibratoires.

Donc L'analyse vibratoire est aujourd'hui un outil performant dans le monde industriel, en recherchant un maximum de productivité. Elle est la méthode la plus puissante pour éviter les pannes mécanique et les détecte de manière plus précise.

Les vibrations sont le résultat de forces dynamiques à l'intérieur des machines qui comprennent des éléments roulants et à l'intérieur des structures qui sont connectées à la machine .les différents éléments vibreront à des fréquences et des amplitudes différentes

Les vibrations créent de la fatigue et de l'usure et elles sont souvent à l'origine de la rupture de la machine.

III.1.Introduction

La transformée de Hilbert Huang (THH) est une méthode d'analyse temps-fréquence. Cette méthode consiste à décomposer, de façon adaptative, le signal en une somme de composantes oscillantes qui possède une seule fréquence à chaque échantillon, pour ensuite calculer la fréquence et l'amplitude instantanée de chacune de ces composantes en utilisant la transformée de Hilbert.

Au cours de ce chapitre, on cite les deux étapes de la transformée de Hilbert Huang : La transformée de Hilbert et la décomposition modale empirique (EMD) de Huang. Ensuite on les applique pour le diagnostic des défauts des roulements.

III.2.La décomposition modale empirique d'un signal(EMD)

Cette technique (EMD ou "Empirical Mode Decomposition") est une méthode d'analyse de signal qui a été introduite par Norden Huang, ingénieur de la NASA, appliquée au départ en 1998, pour décomposer tout signal en une série de composantes oscillantes extraites directement de celui-ci de manière adaptative. Ces composantes (ou IMF pour "Intrinsic Mode Functions") s'interprètent comme des formes d'ondes non stationnaires. (Modulées en amplitude et en fréquence) pouvant être éventuellement associées à des oscillations non linéaires.

Idéalement, ces IMFs sont des fonctions oscillantes, de moyenne nulle, et de plus, celles-ci reflètent les fréquences présentes localement dans le signal, depuis les plus hautes fréquences vers les plus basses. Le résidu est un terme basse-fréquence qui donne la tendance globale du signal.

La décomposition en mode empirique est une méthode d'itération au cours de laquelle chaque estimation de mode est retranchée du signal analysé et ou l'estimation du mode suivant est conduit à partir du signal résidu. [24]

III.3.Transformée de Hilbert

Tout signal sinusoïdal réel $A \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi)$ peut être transformé en un signal complexe $A \cdot e^{j(\omega t + \phi)}$ en générant une composante en quadrature de phase :

$A \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$, servant de partie imaginaire :

$$A \cdot e^{j(\omega t + \phi)} = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi) + jA \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \quad (\text{III.01})$$

Pour les signaux plus compliqués, qui sont exprimables par une somme de plusieurs sinusoides, nous pouvons utiliser un filtre qui déphase chaque composante d'un quart de période, cette méthode est appelée la transformée de Hilbert.[8]

Ces deux étapes, EMD et transformée de Hilbert, permettent d'obtenir trois dimensions (temps, fréquence et amplitude) représentation du signal.

III.4. Définition de l'Intrinsèque

Sur l'ensemble des données, le nombre d'extrema et le nombre de passages à zéro doivent être égaux ou **Mode Fonction (IMF)**

Une IMF, pour Intrinsèque Mode Fonction ou mode empirique, est une fonction telle que :

$$IMF: \begin{cases} R \rightarrow R \\ t \rightarrow IMF_j(t) \end{cases} \quad (III.2)$$

Chaque IMF doit satisfaire les contraintes suivantes:

- ✓ Différent au maximum de un.
- ✓ A chaque instant t, la valeur moyenne de l'enveloppe définie par les maxima locaux et de l'enveloppe définie par la section locale minima est proche de zéro. [22]

III.5. l'algorithme de tamisage (SiftingProcess)

L'organigramme de l'algorithme de l'EMD est illustré dans la figure (Fig.III.1). Cet algorithme comporte deux boucles imbriquées. La boucle principale qui correspond au concept même. Elle s'arrête lorsqu'il n'est plus possible d'extraire de résidu. Cela permet de définir le niveau N de profondeur de la décomposition. D'après la deuxième condition de la définition de l'IMF, les deux enveloppes Env_{min} et Env_{max} doivent être symétriques par rapport à zéro. D'où la nécessité d'ajouter une boucle supplémentaire qui correspond à une opération appelée processus de tamisage (ou sifting). L'arrêt de cette boucle est lié à un critère qu'il convient de définir précisément. [28]

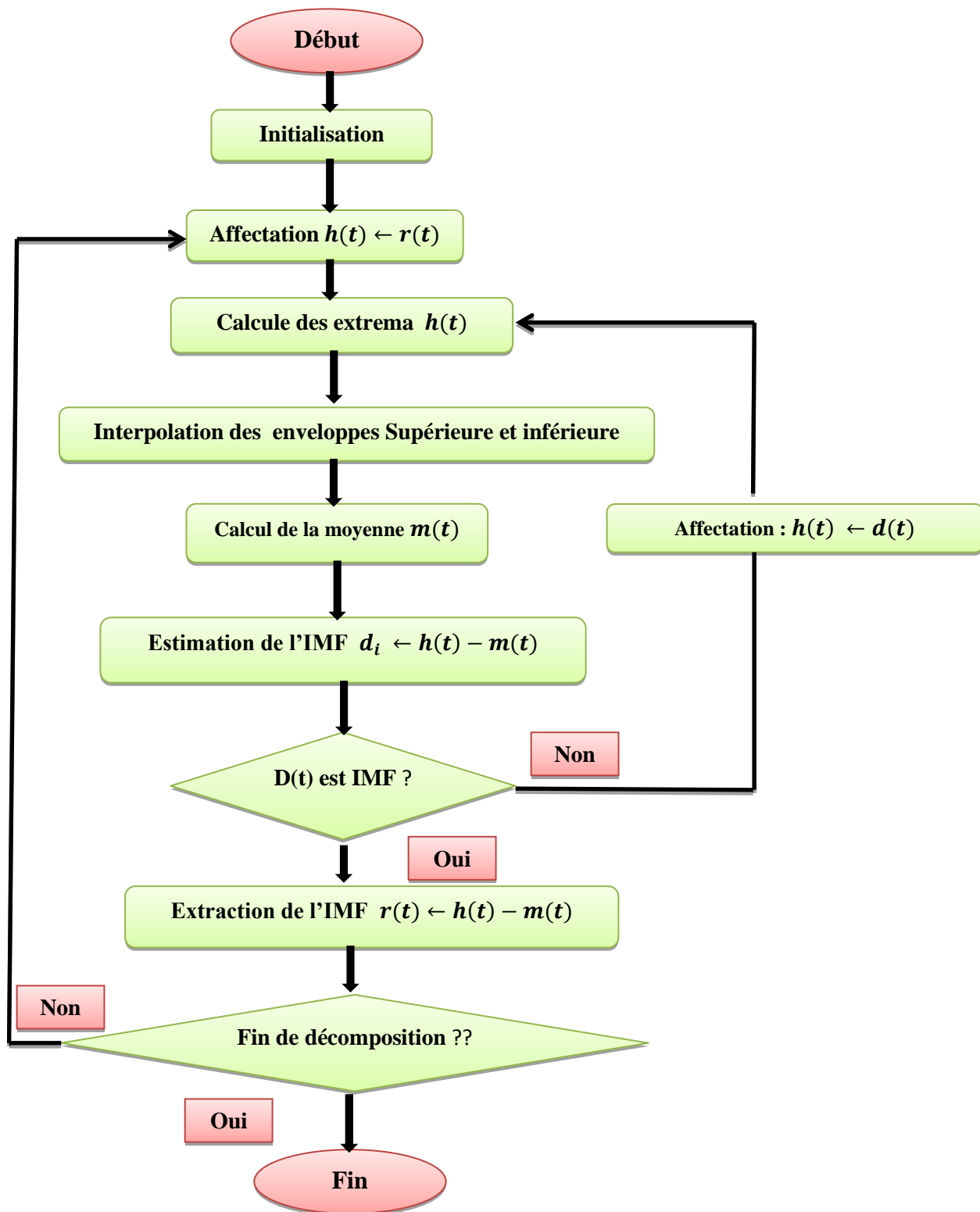


Fig. III.01 :L'Organigramme de l'algorithme de l'EMD [28]

✓ **Décomposition avec EMD d'un signal simple**

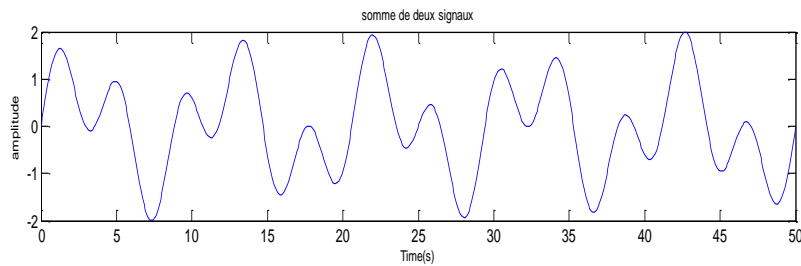
Pour la méthode EMD appliquée à un signal simple de deux signaux sans bruit, l'exemple suivant montre la décomposition de ce signal, ensuite le dé-bruitage. [24]

Soit le signal $x(t)$:

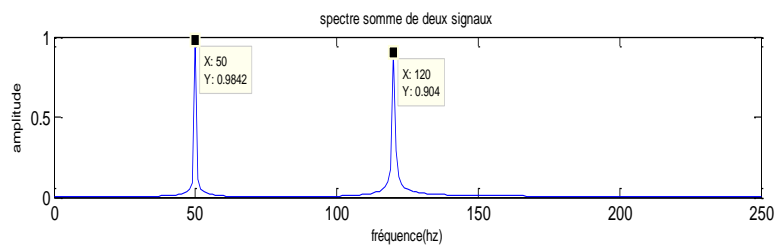
$$X(t) = \sin(w_1 t) + \sin(w_2 t)$$

Avec $w_1 = 2\pi 50$ rad/s, et $w_2 = 2\pi 120$ rad/s et $f_1 = 50$ Hz, $f_2 = 120$ Hz.

Le signal temporel est donné par la figure (II.02.a), et son spectre par la figure (II.02.b).



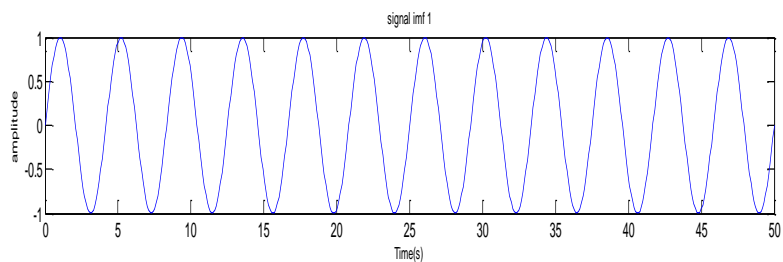
a



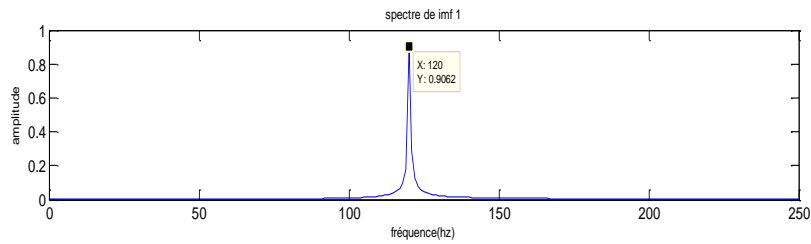
b

Fig. II.02 : Somme de deux sinus : a) Signal temporel, b) Son Spectre

En appliquant la méthode de l'EMD, pour les deux signaux précédents, le signal d'IMF1 est donné par la figure (II.03.a), et son spectre par la figure (II.03.b).

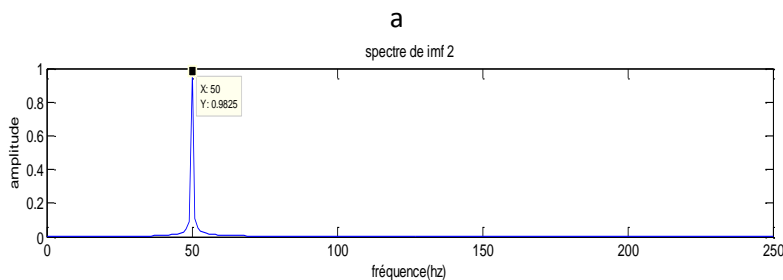
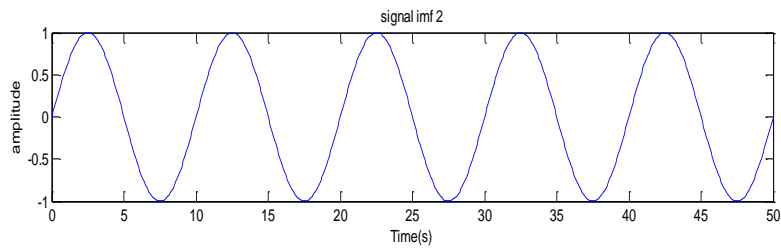


a



b
Fig. II.03 : a) Signal de IMF1, b) Spectre de l'IMF1

Le signal d'IMF2 et son spectre sont illustrés par la figure (II.04)



a
b
Fig. II.04 : a) signal IMF2, b) Spectre de l'IMF2

D'après cet exemple, on voit que la décomposition EMD commence par le signal qui a la fréquence élevée en allant vers le signal de basse fréquence.

III.6. Application de la transformée (THH) au diagnostic des défauts de roulement

III.6.1. Analyse de signaux des défauts par la méthode Hilbert Huang

Les figures ci-dessous montrent les premières IMFs de la décomposition des quatre signaux qui correspondent respectivement aux quatre états de défaut de roulement : sain, défaut de la bague intérieure, défaut de la bague extérieure et le défaut de billes, pour un diamètre de défaut égale à 0.007", et pour différentes charges (0HP ,3HP).

➤ **Etat sain des roulements**

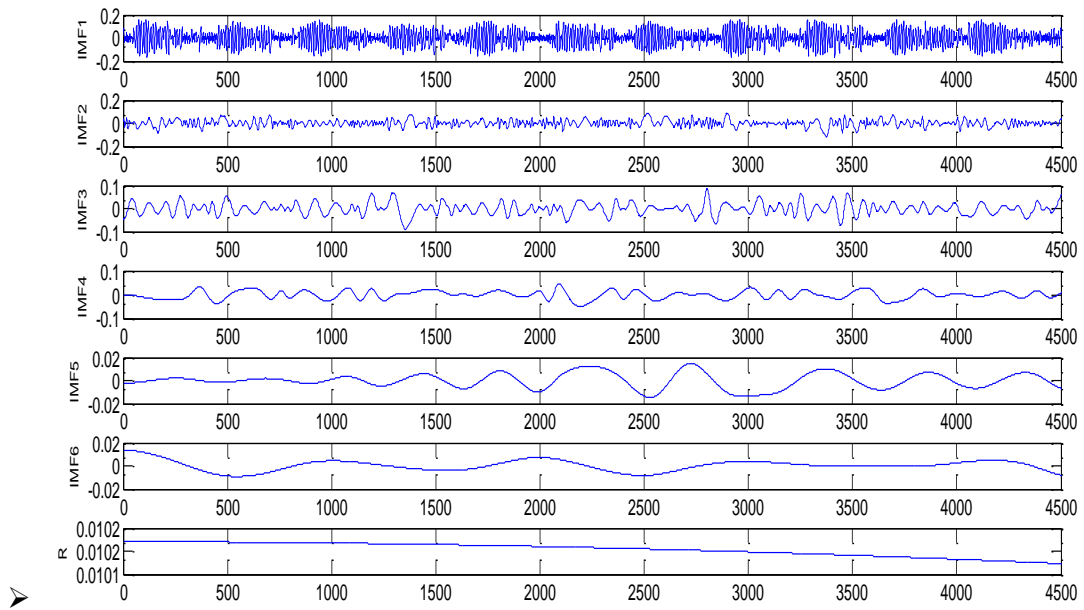


Fig.III.05: Décomposition en mode empirique de roulement pour un fonctionnement sain à vide

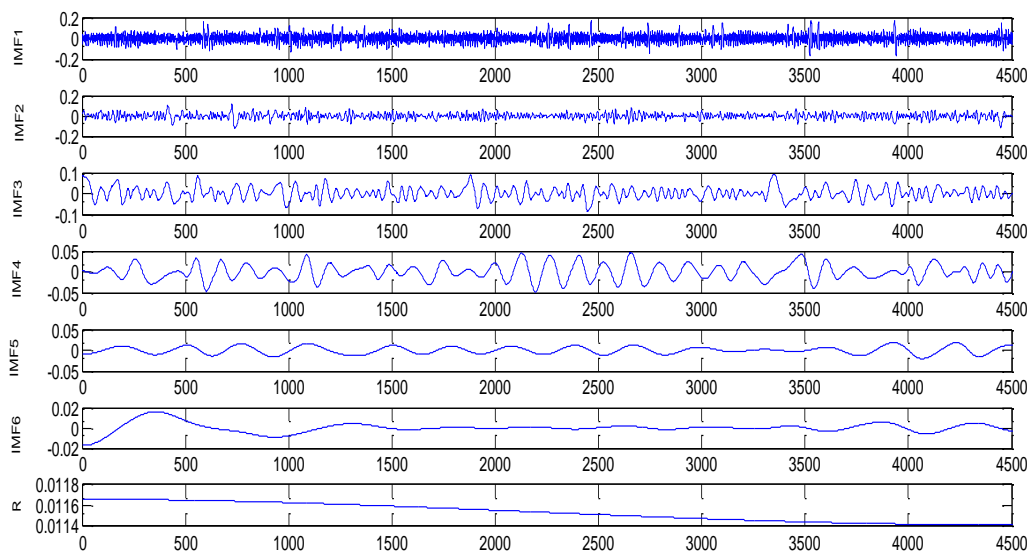


Fig.III.06: Décomposition en mode empirique de roulement pour un fonctionnement sain en charge de 3HP

➤ Défaut de bague intérieure

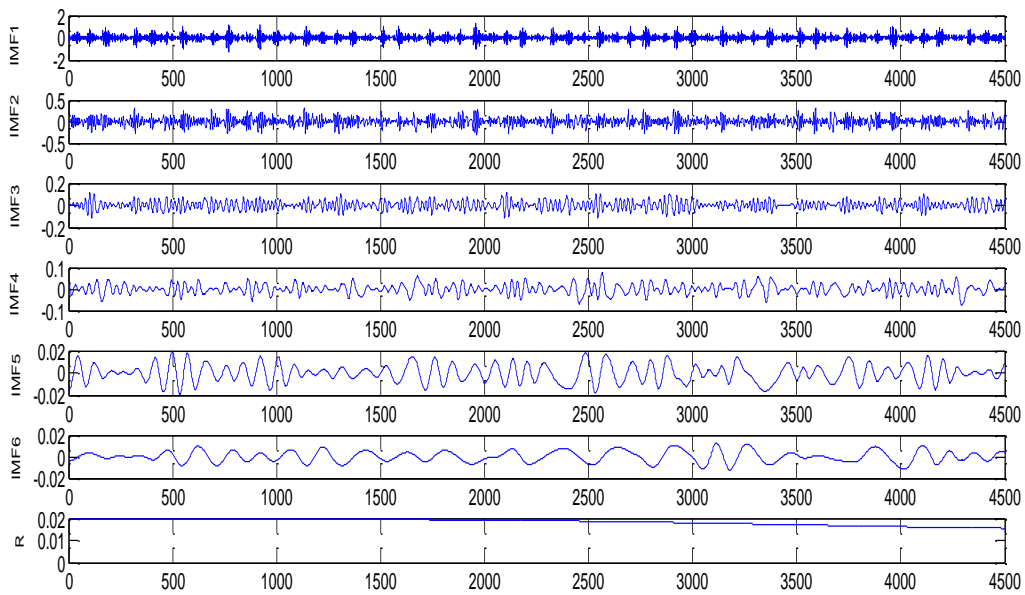


Fig.III.07: Décomposition en mode empirique du défaut de bague intérieure à vide

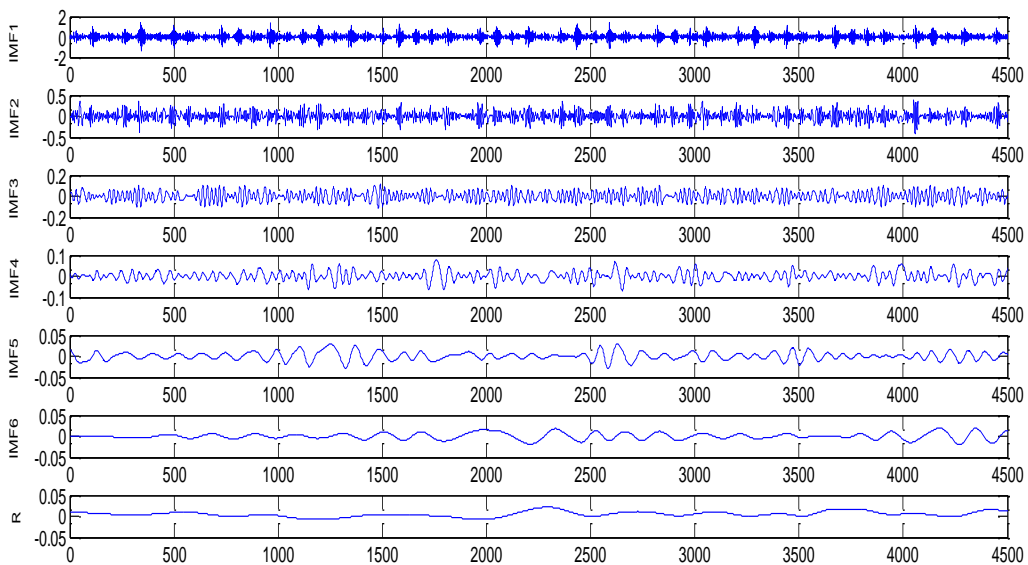


Fig.III.08: Décomposition en mode empirique du défaut de bague intérieure en charge de 3HP

➤ Défaut de bague extérieure à accéléromètre centré

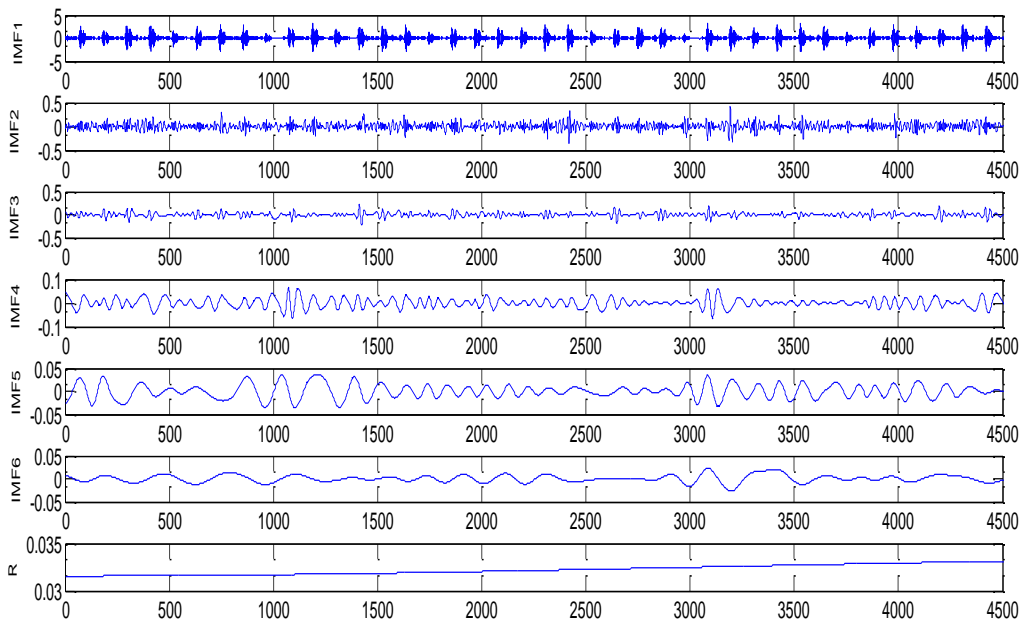


Fig.III.09: Décomposition en mode empirique du défaut de bague extérieure à accéléromètre centré à vide

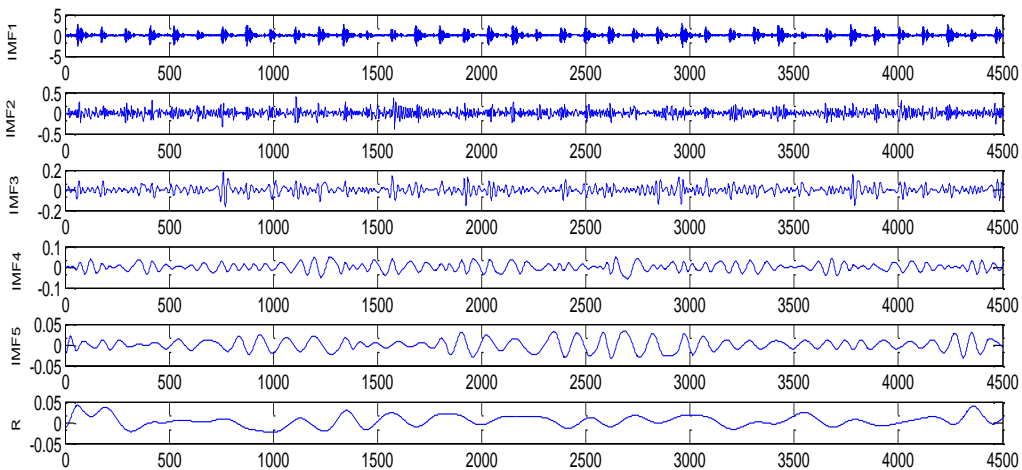


Fig.III.10: Décomposition en mode empirique du défaut de bague extérieure à accéléromètre centré en charge de 3HP

➤ Défaut de billes

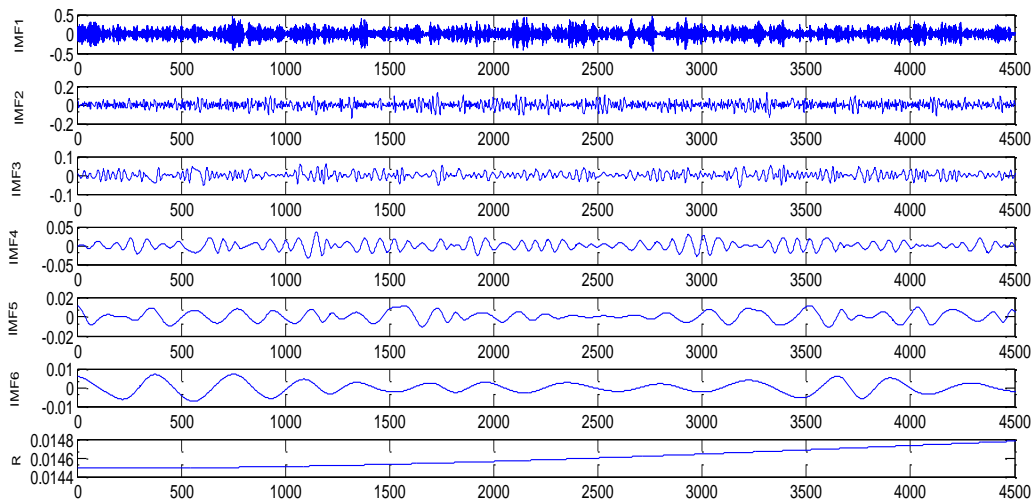


Fig.III.11: Décomposition en mode empirique du défaut de billes à vide

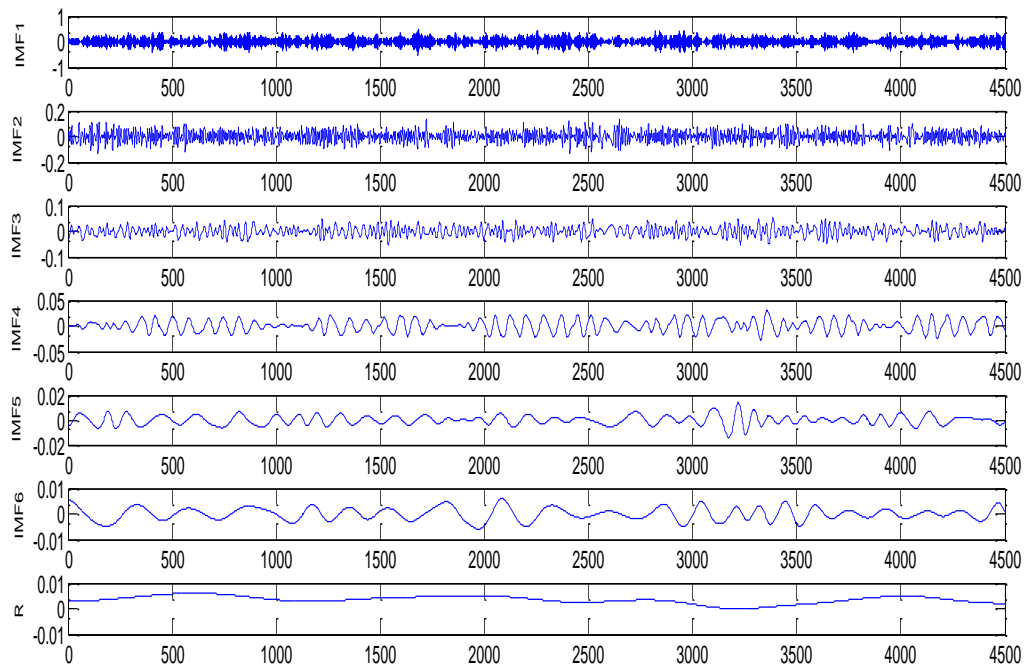


Fig.III.12: Décomposition en mode empirique du défaut de billes en charge de 3HP

III.6.2. Analyse spectral d'Hilbert des IMFs

➤ Analyse spectral d'Hilbert à l'état sain

✓ A vide

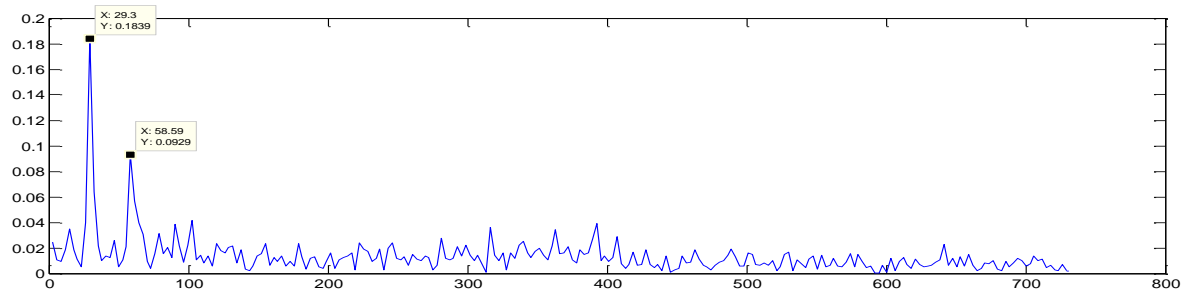


Fig.III.13: Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un fonctionnement sans défaut à vide

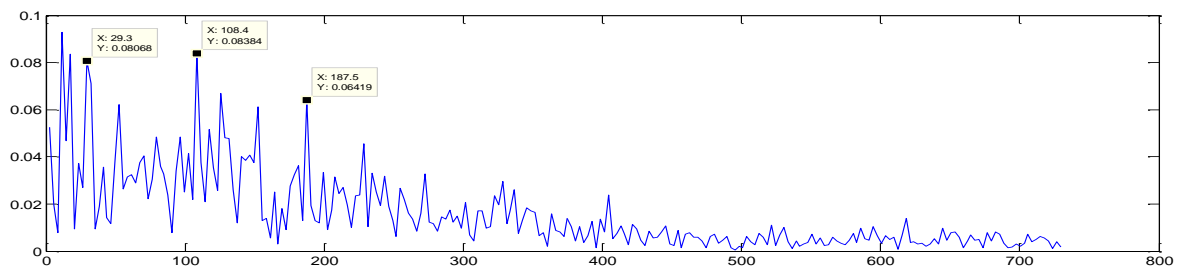


Fig.III.14: Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un fonctionnement sans défaut à vide

Les figures III.13, III.14 montre le spectre d'Hilbert des signaux vibratoires dans le cas sain (vide et charge), pour des deux premières IMFs du signal du roulement sans défaut, sur les spectres nous pouvons lire facilement la fréquence de rotation et ses harmoniques. Nous remarquons l'absence totale de la fréquence de défaut (pas de défaut).

Les figures III.15, III.16 montrent les spectres d'Hilbert des signaux vibratoires dans le cas sain pour une charge de 3HP, pour des deux premières IMFs. La figure III.15 (IMF1) qui permettent de lire distinctement la fréquence de rotation 29.3Hz avec une absence totale de la fréquence de défaut (pas de défaut).

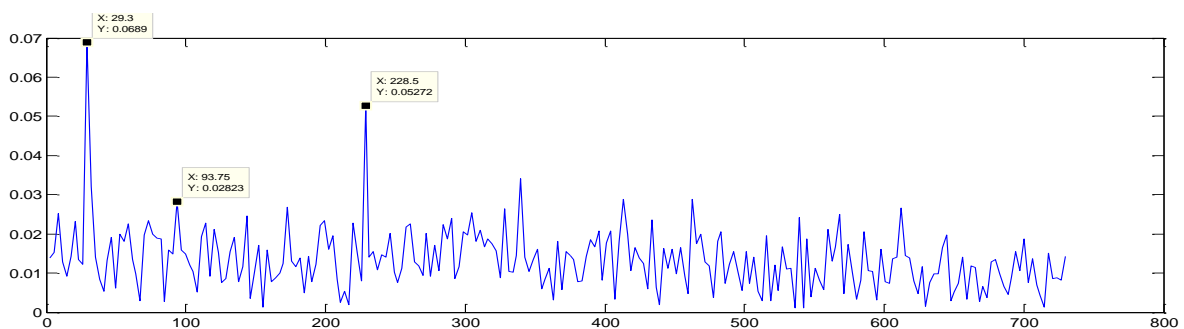


Fig.III.15: Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal cas sans défaut avec une charge de 3HP

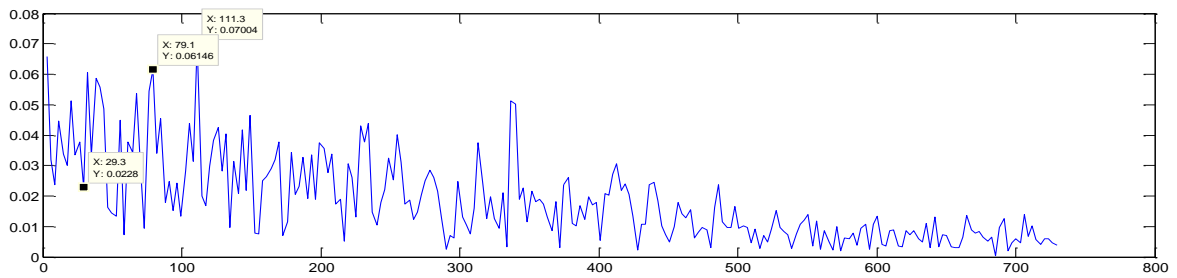


Fig.III.16: Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal cas sans défaut avec une charge de 3HP

➤ **Analyse spectrale de Hilbert du défaut de bague intérieure**

Les figures, III.17, III.18, présentent le spectre de Hilbert des signaux vibratoires dans le cas de défaut de bague intérieure, les deux IMFs présentent la fréquence première harmonique de rotation 29.3 Hz .la fréquence de défaut de la bague intérieure qui est égale 161.1 Hz qui est l'harmonique caractéristique ce type de défaut.

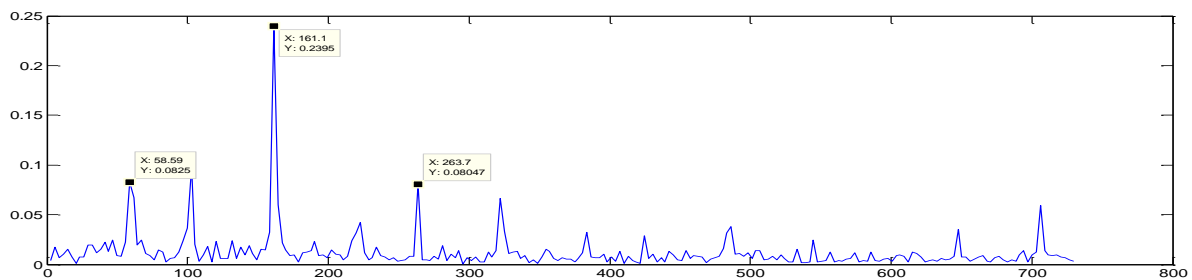


Fig.III.17: Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague intérieure à vide

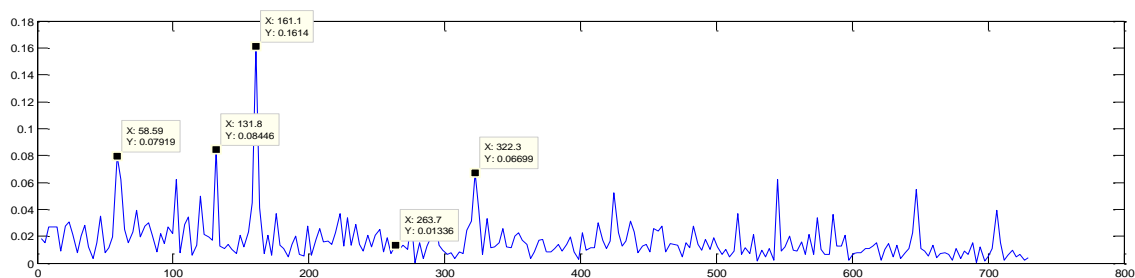


Fig.III.18: Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague intérieure à vide

Les figures III.19, III.20 montrent les spectres d'Hilbert des signaux vibratoires dans le cas de défaut de bague intérieure pour une charge de 3HP, pour des deux premières IMFs. on constate l'existence de fréquence de rotation 29.3Hz et une fréquence caractéristique ce type de défaut 155.3Hz.

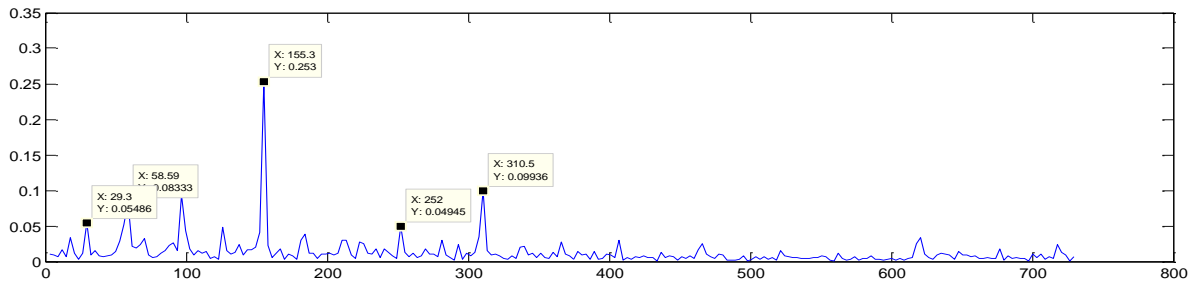


Fig.III.19: Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague intérieure pour charge de 3HP.

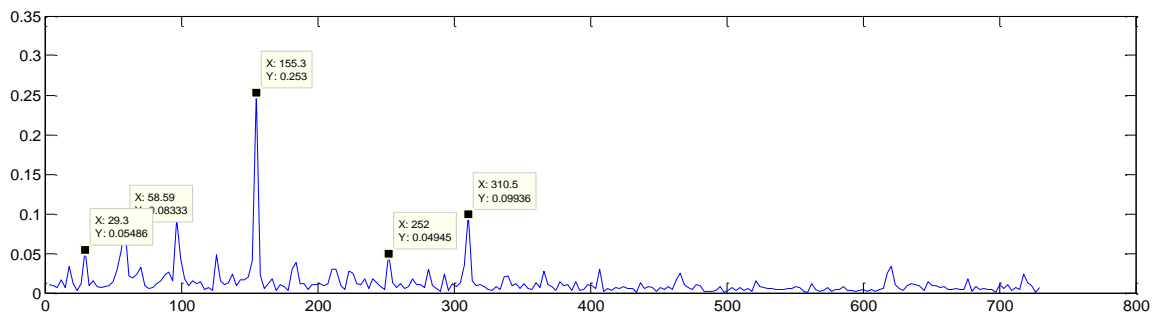


Fig.III.20: Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague intérieure pour charge de 3HP

➤ **Analyse spectrale de Hilbert du défaut de bague extérieure à accéléromètre centré**

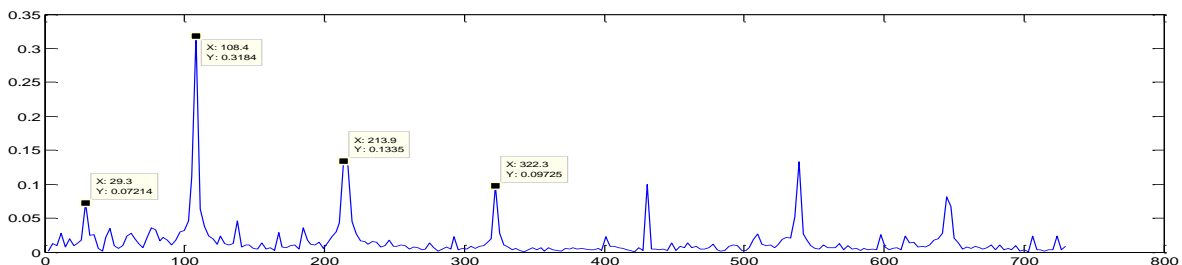


Fig.III.21: Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague extérieure à vide.

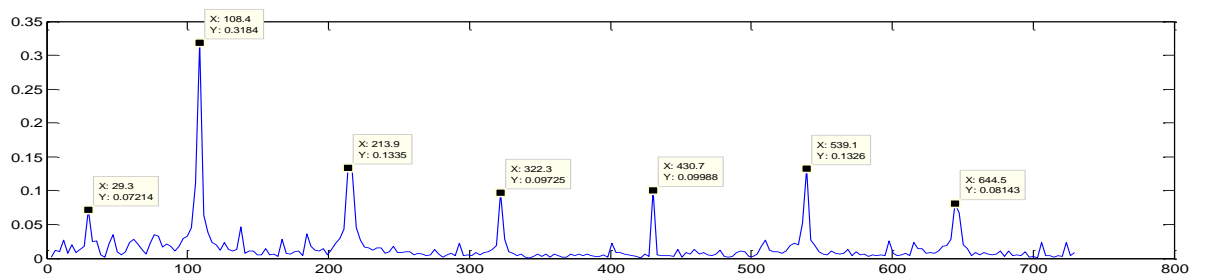


Fig.III.22: Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007'' de la bague extérieure à vide.

Les figures, III.21, III.22, présentent le spectre de Hilbert des signaux vibratoires dans le cas de défaut de bague extérieure, les deux IMFs présentent la fréquence de rotation 29.3Hz, la fréquence de défaut de la bague extérieure qui est égale à 108.4 Hz et ses harmoniques.

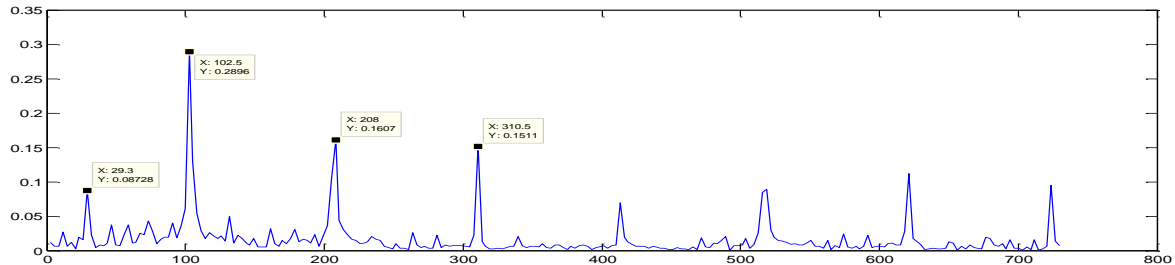


Fig.III.23: Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague extérieure pour une charge de 3HP.

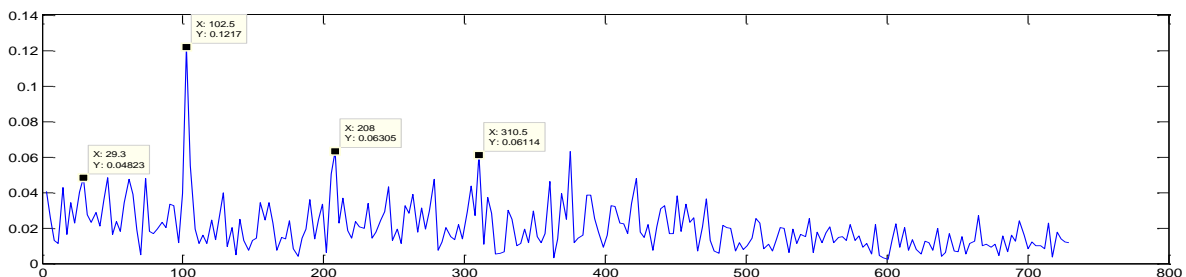


Fig.III.24: Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de la bague extérieure pour une charge de 3HP.

Les figures III.23, III.24 montrent les spectres d'Hilbert des signaux vibratoires dans le cas de défaut de bague extérieure pour une charge de 3HP, pour des deux premières IMFs. On constate l'existence de fréquence de rotation 29.3Hz et une fréquence de défaut 102.5Hz. et un nombre d'harmonique plus que IMF1.

➤ Analyse spectrale de Hilbert du défaut de bille

Les figures, III.25, III.26, présentent le spectre de Hilbert des signaux vibratoires dans le cas de défaut de bille, les deux IMFs présentent la fréquence de rotation 29.3Hz, et la première IMF1 permet de lire distinctement la fréquence de défaut 140.6Hz.

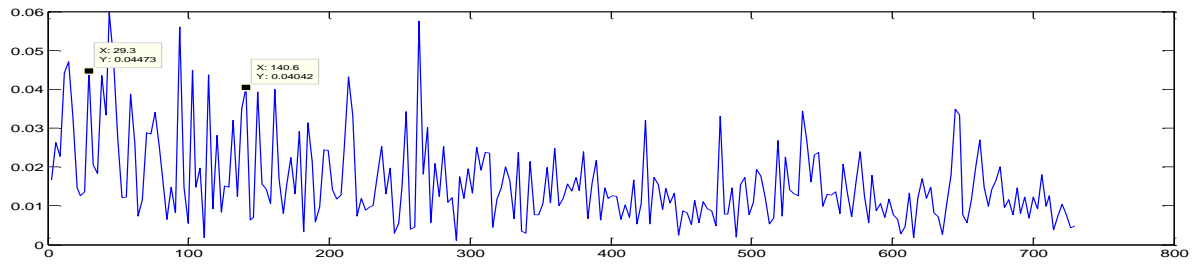


Fig.III.25: Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de bille Avide

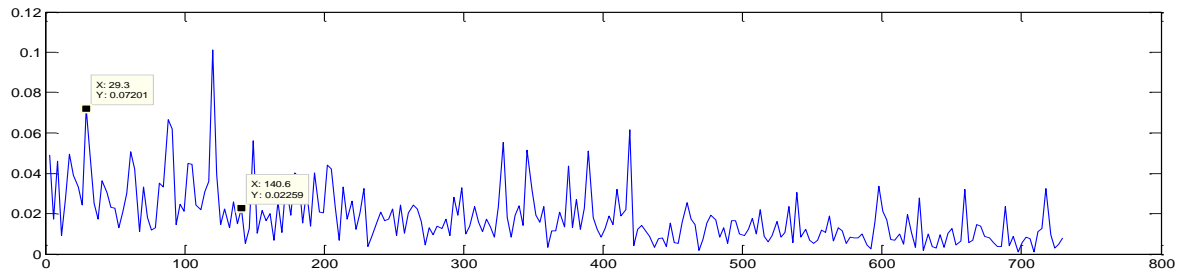


Fig.III.26: Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de bille Avide

Les figures III.27, III.28 montrent les spectres d'Hilbert des signaux vibratoires dans le cas de défaut de bille pour une charge de 3HP, pour des deux premières IMFs. On constate l'existence de fréquence de rotation 29.3Hz. L'apparition de la fréquence de défaut dans le spectre IMF2 plus claire qu'IMF1.

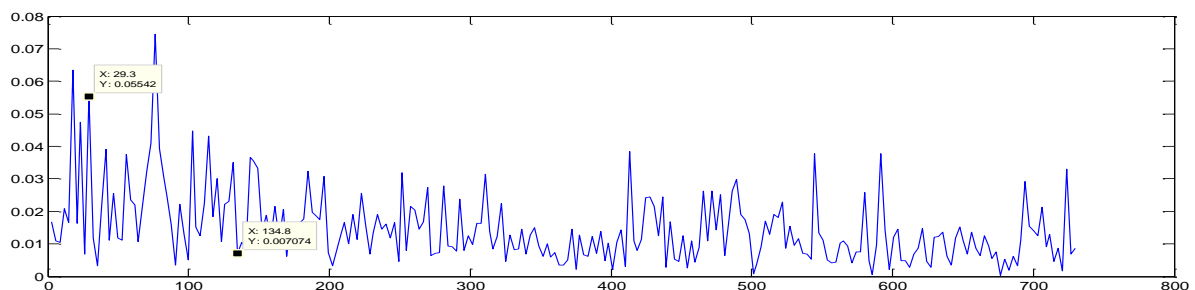


Fig.III.27: Spectre de l'amplitude d'IMF1 du signal pour un défaut = 0.007" de bille pour charge de 3HP.

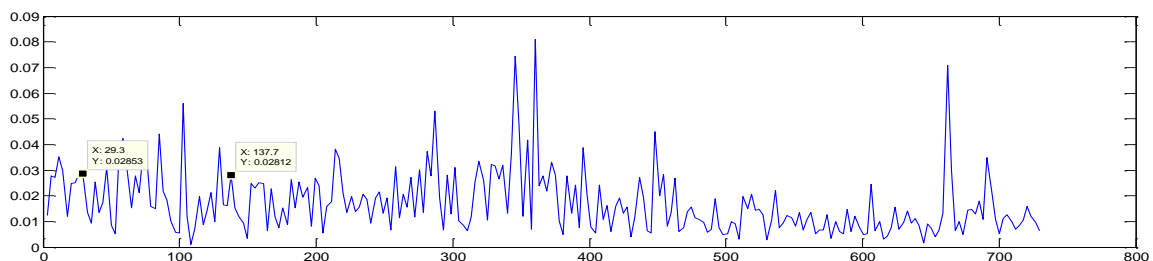


Fig.III.28: Spectre de l'amplitude d'IMF2 du signal pour un défaut = 0.007" de bille pour charge de 3HP.

A partir des spectres de Hilbert obtenus précédemment avec différents fonctionnement de la machine (fonctionnement sain et fonctionnement avec différents défauts), nous avons pu relevé les amplitudes et les fréquences des harmoniques existants dans les spectres des signaux. Les valeurs obtenues sont portées dans tableau suivant :

Etat de défaut	Charge du moteur	Fréquence pour les différentes couples résistant. (Hz)	Fréquence de défaut (Hz)	Amplitude (dB) IMF1	Amplitude (dB) IMF2
sain	0HP	29.95	*	*	*
	3HP	28.83	*	*	*
Défaut de bague intérieure	0HP	29.95	162.18	0.2395	0.1614
	3HP	28.83	156.11	0.256	0.253
Défaut de bague extérieure	0HP	29.95	107.01	0.3184	0.3184
	3HP	28.83	103.32	0.2896	0.1217
Défaut de bille	0HP	29.95	140.74	0.04042	0.02259
	3HP	28.83	135.89	0.007074	0.02812

Tableau III.1 : Fréquences et amplitudes d’IMF1 et IMF2

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode d’analyse d’un signal non linéaire et non stationnaire qui est la transformée de Hilbert-Huang (H.H.T). Cette technique est composée de deux types de transformées. La première dite de Huang ou de décomposition modale empirique permet de décomposer un signal en ensemble d’IMF.

Les IMFs sont triées dans l’ordre décroissant allant de la plus haute fréquence à la plus basse fréquence. La dernière IMF, appelée résidu correspond à la composante de la fréquence la plus basse, Le EMD est une technique simple et plus avantageuse par rapport aux autres méthodes d’analyse de signaux non stationnaires.

La deuxième qui est la transformée de Hilbert permet d’estimer l’amplitude et la fréquence instantanée de chaque composante.

Les résultats d’analyse temps-fréquence de signaux par THH ont montrés l’efficacité de la méthode, de même pour le spectre on distingue facilement les fréquences caractéristiques de défaut de chaque élément de roulement, ainsi que leurs amplitudes sont claires sur le spectre.

IV.1.Introduction

Les réseaux de neurones (RN) formels sont des systèmes de traitement de l'information dont la structure s'inspire de celle du système nerveux. Leurs deux grands domaines d'application sont d'une part la modélisation biologique, dont il ne sera pas question ici, et d'autre part, la réalisation de machines destinées à effectuer des tâches auxquelles les ordinateurs et les outils traditionnels semblent moins bien adaptés que les êtres vivants, telles que des tâches perceptives et motrices, ainsi, qu'à la reconnaissance de formes, la classification et à l'identification des systèmes.

Nous commençons donc ce chapitre, en premier lieu, par l'historique des RN, nous présenterons ensuite les définitions essentielles en expliquant ce qu'un neurone formel, que ce qu'un réseau de neurones, que ce que l'apprentissage des RN (nous précisons notamment les différences entre l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé).

IV.2.Réseaux de neurones artificiels

IV.2.1.Définition

Les réseaux de neurones artificiels ou réseaux connexionnistes sont fondés sur des modèles qui tentent de mimer les cellules du cerveau humain et leurs interconnexions. Le but, d'un point de vue global, est d'exécuter des calculs complexes et de trouver, par apprentissage, une relation non linéaire entre des données numériques et des paramètres.[29]

IV.2.2. Historique

Aujourd'hui, les réseaux de neurones sont utilisés dans de nombreux domaines à cause de leurs propriétés, en particulier leur capacité d'apprentissage.

- 1890 : W. James, célèbre psychologue américain introduit le concept de mémoire associative et propose ce qui deviendra une loi de fonctionnement pour l'apprentissage sur les réseaux de neurones connue plus tard sous le nom de loi de Hebb.

- 1943 : J. Mc Culloch et W. Pitts laissent leurs noms à une modélisation du neurone biologique (un neurone au comportement binaire). Ce sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes (tout au moins au niveau théorique).

- 1949 : D. Hebb, physiologiste américain explique le conditionnement chez l'animal par les propriétés des neurones eux-mêmes. Ainsi, un conditionnement de type pavlovien tel que,

nourrir tous les jours à la même heure un chien, entraîne chez cet animal la sécrétion de salive à cette heure précise même en l'absence de nourriture. La loi de modification des propriétés des connexions entre neurones qu'il propose explique en partie ce type de résultats expérimentaux.

Le premier réseau de neurones artificiel apparaît en 1958, grâce aux travaux de Rosenblatt qui conçoit le perceptron. Ce dernier est inspiré du système visuel (en terme d'architecture neurobiologique) et possède une couche de neurones d'entrée une couche de sortie ("décisionnelle"). Ce réseau parvient à apprendre, à identifier des formes simples et à calculer certaines fonctions logiques.

- 1969 : M. Minsky et S. Papert publient un ouvrage qui met en exergue les limitations théoriques du perceptron, limitations alors connues, notamment concernant l'impossibilité de traiter par ce modèle des problèmes non linéaires. Ils étendent implicitement ces limitations à tout modèle de réseaux de neurones artificiels. Leur objectif est atteint, il y a abandon financier des recherches dans le domaine (surtout aux U.S.A.), les chercheurs se tournent principalement vers l'IA (Intelligence Artificielle) et les systèmes à bases de règles. Il faudra attendre le début des années 80 pour que l'intérêt pour ce domaine soit de nouveau présent. En effet, Hopfield démontre en 1982 tout l'intérêt d'utiliser les réseaux récurrents (dits "feedback») pour la modélisation des processus. Les réseaux récurrents constituent alors la deuxième grande classe de réseaux de neurones, avec les réseaux type perceptron (dits "feed-forward"). En parallèle des travaux de Hopfield, Werbos conçoit son algorithme de rétro propagation qui ne sera pourtant popularisé qu'en 1986 par Rumelhart. [30]

IV.2.3. Le neurone biologique

L'élément de base du système nerveux central est le neurone. Le cerveau se compose d'environ mille milliards de neurones, avec 1000 à 10000 synapses (connexions) par neurone. Les neurones sont reliés entre eux par des liaisons appelées axones. Ces axones vont eux-mêmes jouer un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble. Ces axones conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée (synapse) d'un autre neurone. Les neurones font une sommation des signaux reçus en entrée et en fonction du résultat obtenu vont fournir un courant en sortie.[31]

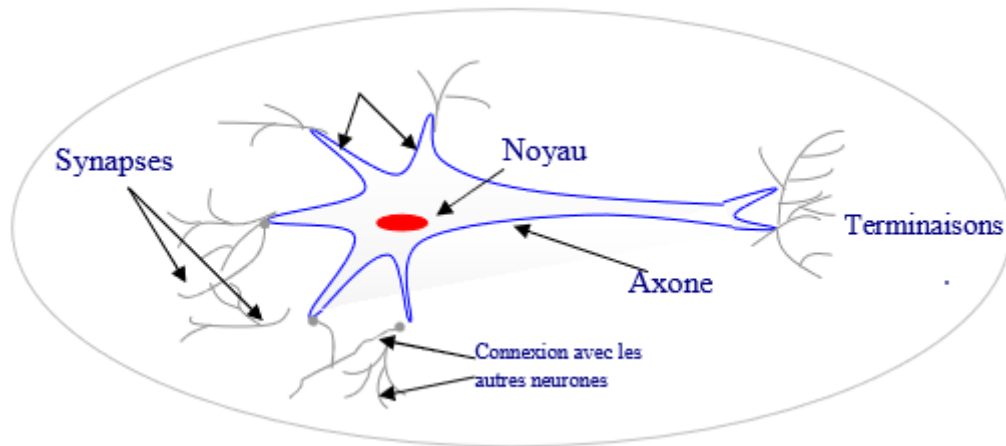


Fig. IV.01 : Schéma d'un neurone biologique.[32]

IV.2.4. Neurone formel

Un neurone est une fonction algébrique non linéaire, paramétrée, à valeurs bornée. D'après McCulloch et Pitts, le neurone formel ou artificiel est un opérateur mathématique très simple possédant une seule sortie et un nombre d'entrée quelconques (qui peuvent être les sorties d'autres neurones, ou des entrées des signaux extérieurs). La valeur de la sortie résulte du calcul de la somme des entrées pondérées par des coefficients (poids des connexions ou poids synaptiques) et du calcul d'une fonction non linéaire (fonction d'activation) de cette somme pondérée.

Un neurone se caractérise par trois concepts : son état, ses connexions avec d'autres neurones et sa fonction d'activation. Si le neurone est activé, il transmet aux autres neurones une réponse égale à son activation, sinon il reste inactif et ne transmet rien. La figure (IV.02) est représentation du neurone formel.

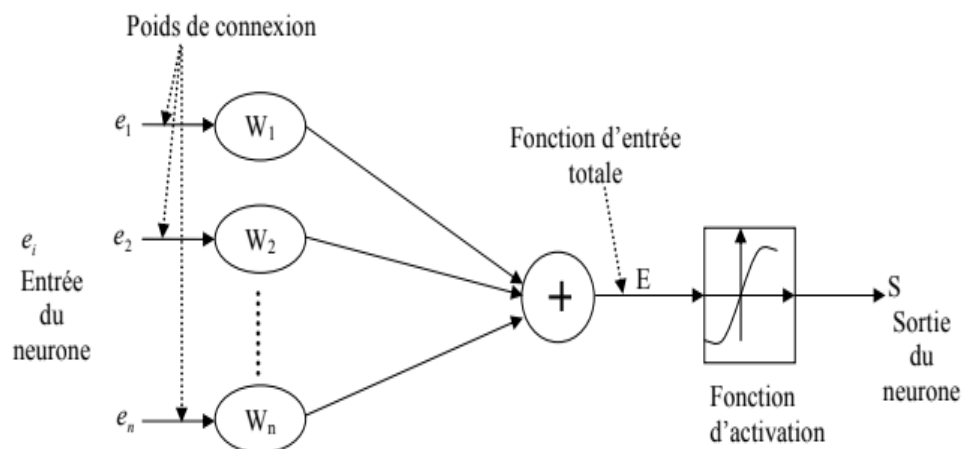


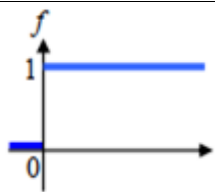
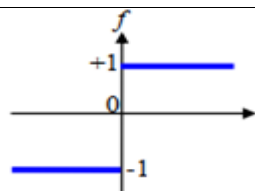
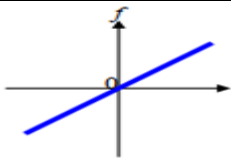
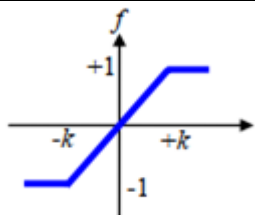
Fig. IV.02: Modélisation du neurone formel. [33]

D'une façon plus générale, on peut définir un neurone formel par les cinq éléments suivants

- La nature de ses entrées ;
- La fonction d'entrée totale qui définit le prétraitement effectué sur les entrées ;
- La fonction d'activation du neurone qui définit son état interne en fonction de son entrée totale ;
- La fonction de sortie qui calcule la sortie du neurone en fonction de son état d'activation ;
- La nature de la sortie du neurone. [33]

IV.3.Fonction d'activation

La fonction d'activation est en général une fonction non linéaire monotone croissante, par ailleurs les fonctions de transfert sont de qualités diverses, elles peuvent être déterministes, continues discontinues ou aléatoires, ces fonction sont présentées dans le tableau suivant :[32]

Catégorie	Type	Equation	Allure
Seuil	Binaire (Heaviside)	$f(x) = 1 \text{ si } x < 0$ $f(x) = 0 \text{ si } x \leq 0$	
	Signe	$f(x) = 1 \text{ si } x > 0$ $f(x) = -1 \text{ si } x \leq 0$	
Linéaire	Identité	$f(x) = x$	
	Saturation	$f(k, x) = -1 \text{ si } x < -K$ $f(k, x) = 1 \text{ si } x > k$ $f(k, x) = kx \text{ sinon}$	

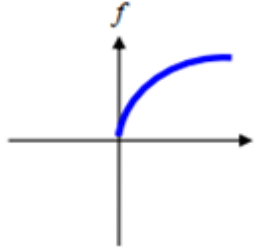
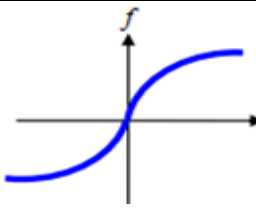
Sigmoide	Positive (logistique)	$f(k, x) = \frac{1}{1 + e^{kx}}$	
	Symétrique (type tanch)	$f(k, x) = \frac{1}{1 + e^{-kx}} - 1$	

Tableau. IV.01. Fonctions d'activation [32]

IV.4. Les type de Réseaux de Neurones

IV.4.1. Fonctions à bases radiales

Les fonctions à bases radiales (Radial Basis Function ou RBF), sont apparues à la fin des années 80 comme des variantes des réseaux de neurones. Cependant, leurs racines se retrouvent dans les techniques de reconnaissance de formes les plus anciennes comme les fonctions de potentiel (traduction de potential functions). Un RBF est constitué uniquement de 3 couches : la couche d'entrée qui retransmet les entrées sans distorsion, la couche cachée RBF qui contient les neurones RBF et la couche de sortie, une simple couche contenant une fonction linéaire.

Il y a 4 paramètres principaux à régler dans un réseau RBF :

1. Le nombre de neurones RBF (nombre de neurones dans l'unique couche cachée)
2. La position des centres des gaussiennes de chacun des neurones.
3. La largeur de ces gaussiennes.
4. Le poids des connexions entre les neurones RBF et le(s) neurone(s) de sortie.

Toute modification d'un de ces paramètres entraîne directement un changement du comportement du réseau.[2]

IV.4.2. Réseau de neurones non bouclés

Un réseau de neurone non bouclé (dit aussi statique) est donc représenté graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux, l'information circulant des

entrées vers les sorties sans « retour en arrière » ; c'est-à-dire à partir d'un neurone quelconque, en suivant les connexions, on ne peut pas revenir au neurone de départ (figure (VI.03)). [30]

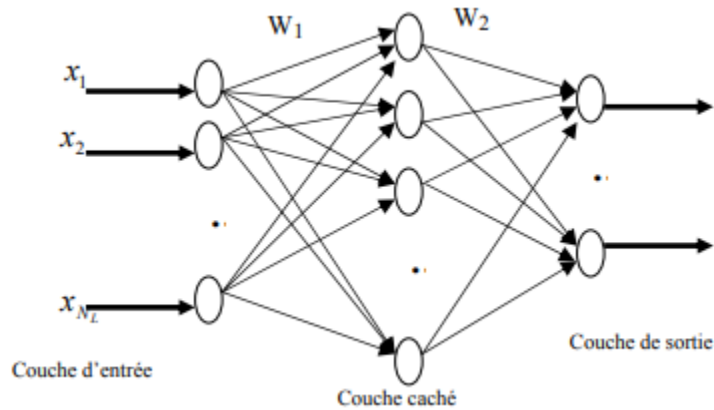


Fig. IV.03 : Un réseau de neurone non bouclé.[30]

IV.4.3.Réseaux de neurones bouclés

Les réseaux bouclés (ou récurrents ou encore dynamiques) permettent des connexions arbitraires entre les neurones de toutes les couches, lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ. La sortie d'un neurone du réseau peut donc être fonction d'elle-même, cela n'est évidemment concevable que si la notion de temps est explicitement prise en considération. Il peut avoir plusieurs topologies. Parmi les architectures de cette classe, le réseau de neurones à mémoires (MNN) et le réseau neuronal récurrent à temps discret (DTRNN).[30]

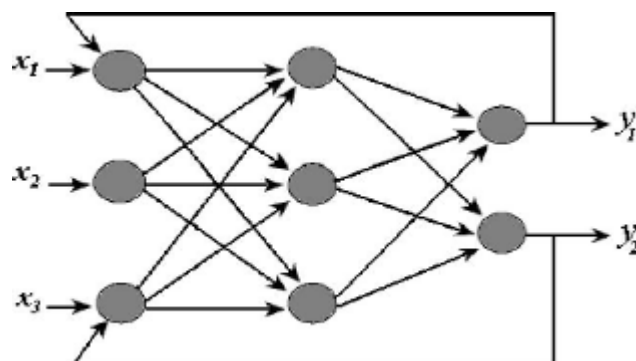


Fig. IV.04 : Un réseau de neurone bouclé. [34]

IV.5.Algorithmes d'apprentissage

Comme le cerveau humain, les réseaux de neurones artificiels (RNA) peuvent apprendre par expérience. Ainsi, suite à l'application séquentielle de plusieurs entrées à apprendre, les algorithmes d'apprentissage modifient la valeur de poids entre les neurones ainsi que la valeur des biais de façon à améliorer la performance du RNA. En fait, l'ajustement des poids est plus ou moins efficace tout dépendamment de la connaissance que nous avons du système à modéliser ou du problème à résoudre, ainsi trois grandes classes d'apprentissage existent.[2]

IV.5.1.Apprentissagesupervisés

L'objectif de l'apprentissagesupervisé est principalement de définir des règles permettant de classer des objets dans des classes à partir de variables qualitatives ou quantitatives caractérisant ces objets. On dispose au départ d'un échantillon dit d'apprentissage dont le classement est connu. Cet échantillon est utilisé pour l'apprentissage des règles de classement. Il est nécessaire d'étudier la fiabilité de ces règles pour les comparer et les appliquer, évaluer les cas de sous apprentissage ou de sur apprentissage (complexité du modèle). On utilise souvent un deuxième échantillon indépendant, dit de validation ou de test. Un professeur fournit au réseau des couples de données (entrée, sortie désirée correspondante). Les paramètres du réseau sont ajustés de manière à minimiser une certaine norme de l'erreur de sortie constituée par la différence entre la sortie réelle du réseau et la valeur désirée correspondante (fournie par le professeur). [30][35]

IV.5.2.Apprentissagenon supervisés

Procède de la façon contraire à l'apprentissage supervisé. C'est à dire ne nécessitent aucun apprentissage et aucune tâche préalable d'étiquetage manuel. Il consiste à représenter un nuage des points d'un espace quelconque en un ensemble de groupes appelé Cluster. Il est lié généralement au domaine de l'analyse des données comme l'ACP. Un «Cluster» est une collection d'objets qui sont «similaires» entre eux et qui sont «dissemblables » par rapport aux objets appartenant à d'autres groupes. En absence de tout professeur, le réseau organise lui-même les formes d'entrée en classes de façon à minimiser un critère de performances. Ceci peut être fait, par exemple, en désignant un certain nombre de neurones gagnants dans

une compétition d'activation ou en désignant un certain nombre de bassins d'attraction dans l'espace d'état. [30][35]

IV.5.3.Apprentissage par renforcement

Dans ce cas, bien que les sorties idéales ne soient pas connues directement, il y a un moyen quelconque de connaître si les sorties du RNA s'approchent ou s'éloignent du but visé. Ainsi, les poids sont ajustés de façons plus ou moins aléatoires et la modification est conservée si l'impact est positif ou rejeté sinon.[2]

IV.6.Avantageset Inconvénients

IV.6.1.Avantages

- Tolérance par rapport aux fautes (élimination d'un neurone...);
- Apprentissage automatique des poids ;
- Capacité de généralisation.

IV.6.2.Inconvénients

- Représentation complexe ;
- Paramètres difficiles à interpréter physiquement (boite noire).[36]

IV.7.Application des RNA pour la détection des défauts des roulements

Les étapes de construction et de validation des réseaux de neurones sont réparties en trois phases:

IV.7.1.Choix des entrées des réseaux

Les indicateurs temporels sont classés dans le tableau suivant, ce qui signifie que le nombre d'entrées de ce réseau est égal à 7

[Peak RMS Ku ImF CF TALAF THIKAT]^T

Peak	$\text{peak} = \sup_{1 \leq k \leq N} a_k $	(IV.1)
RootMean Square	$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_k^2}$	(IV.2)
Kurtosis	$\text{Kurtosis} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (a_k - \bar{a})^4}{\text{RMS}^4}$	(IV.3)
Impulse Factor	$\text{ImF} = \frac{\text{peak}}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_k }$	(IV.4)
Crest Factor	$\text{CF} = \frac{\text{peak}}{\text{RMS}}$	(IV.5)
TALAF	$\text{TALAF} = \log \left[k_u + \frac{\text{RMS}}{\text{RMS}_0} \right]$	(IV.6)
THIKAT	$\text{THIKAT} = \log \left[(k_u)^{\text{CF}} + \left(\frac{\text{RMS}}{\text{RMS}_0} \right)^{\text{Peak}} \right]$	(IV.7)

Tableau IV.02 Descripteurs temporels.[2]

Où RMS_0 représente la valeur efficace du roulement sans défaut ou bien une valeur initiale qu'on relève au début de la surveillance vibratoire.

Avec différents charges et diamètres dans les 4 cas du fonctionnement de la machine.

- ✓ Sain ;
- ✓ Défaut de bague intérieure ;
- ✓ Défaut de bague extérieure ;
- ✓ Défaut de bille.

IV.7.2.Choix des sorties des réseaux

Lors de la détection d'un défaut, le réseau doit indiquer un nombre binaire quelconque par exemple (1 0 1 0) à sa sortie, qui correspond à un type de défaut.

IV.7.3.Choix de fonction d'activation

Comme les sorties sont binaires et les entrées réelles, la fonction d'activation une fonction sigmoïde.

IV.8. Détection des défauts de roulements pour différentes charge

Pour ce cas le RNA, illustré par la figure IV.05, possède une structure de [7 10 4] représentant le nombre de nœuds à l'entrée, dans la couche cachée et à la sortie respectivement.

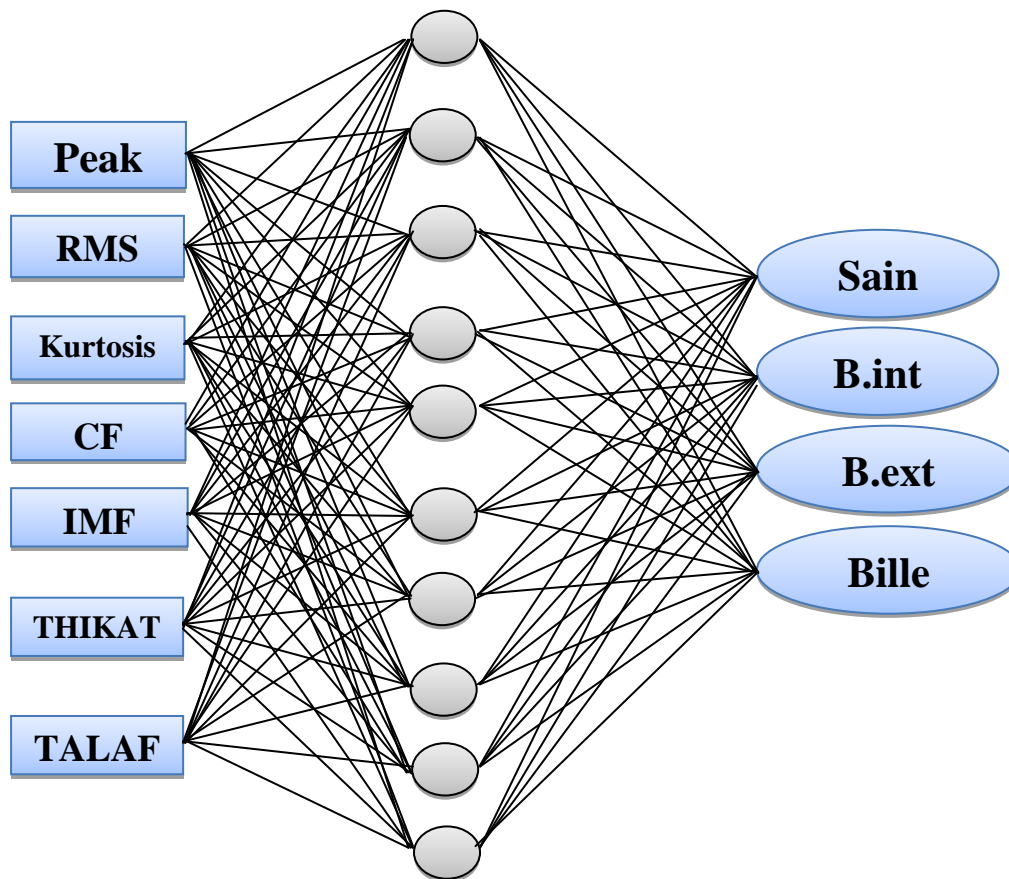


Fig. IV.05: Structure d'un réseau de neurones de [7 10 4].

Ainsi, quatre types de défauts sont considérés et sont codifiés en binaire comme il est montré dans le tableau IV.03.

Condition du roulement	Codification/Sortie désirée
Etat sain	1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Défaut dans la bague intérieure	0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0
Défaut dans la bague extérieure	0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0
Défaut dans la bille	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1

Tableau. IV.03. Condition de roulement de 4 sorties.

IV.8.1. Résultats de l'apprentissage

Les meilleures performances d'apprentissage sont obtenus à travers un bon choix de la structure du réseau de neurones après plusieurs test d'apprentissage, le réseau obtenu est caractérisée par une architecture simple comportant une couche d'entrée (rétine), une couche de sortie pour la décision et une couche cachée composée de dix neurone dont la fonction de transfert est de type sigmoïde et de type linéaire pour le neurone de la couche de sortie.

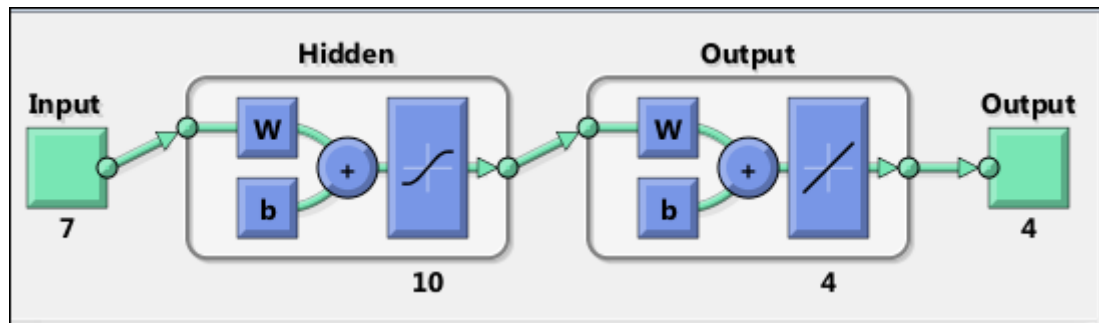


Fig. IV.06 : Construction de bloc de RNA de différentes charges

Les performances d'apprentissage du réseau de neurones utilisé sont évaluées à travers l'erreur quadratique moyenne (EQM). Pour notre cas RN atteint une valeur de $7.1192e^{-11}$ après 18 itérations (figure VI.07).

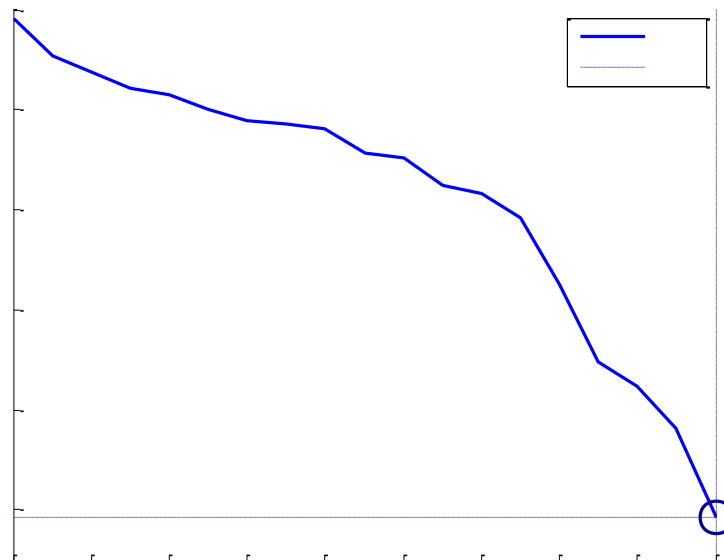


Fig. IV.07. Performances du RN

IV.8.2. Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus dans la phase du test, on constate que les sorties du réseau suivent presque conformément (avec une erreur de $7.1192e^{-11}$) les sorties désirées préétablies auparavant.

IV.8.3. Tests du RN pour la détection de défaut

Une fois que le réseau de neurones est construit pour un apprentissage satisfaisant, on passe à l'étape de test de la capacité du réseau à reconnaître des situations quelconques non appris dans la base de données. [3]

a) Test du RN avec état sain

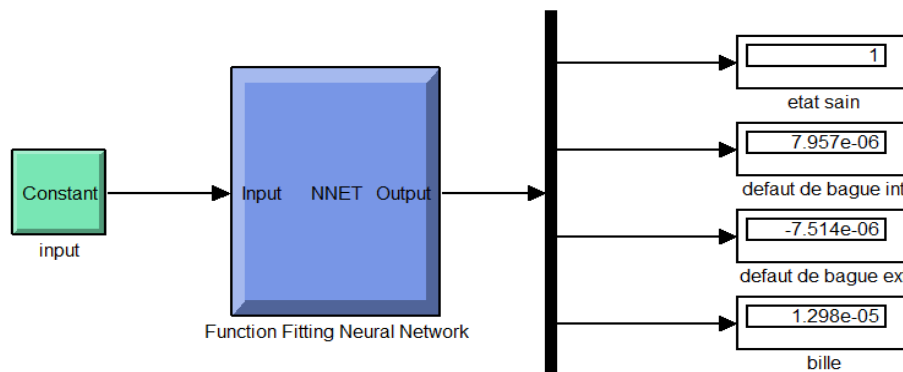


Fig. IV.08 : Test de RN pour un état de fonctionnement sain

b) Test du RN avec défaut de bague intérieure

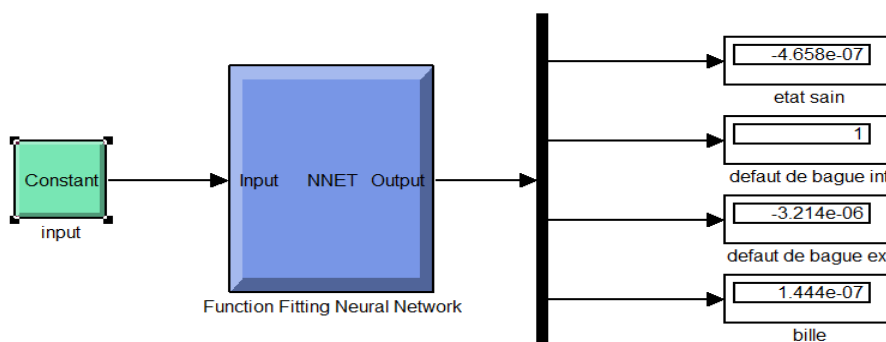


Fig. IV.09 : Test de RN pour un fonctionnement avec un défaut de bague intérieure

c) Test du RN avec défaut de bague extérieure

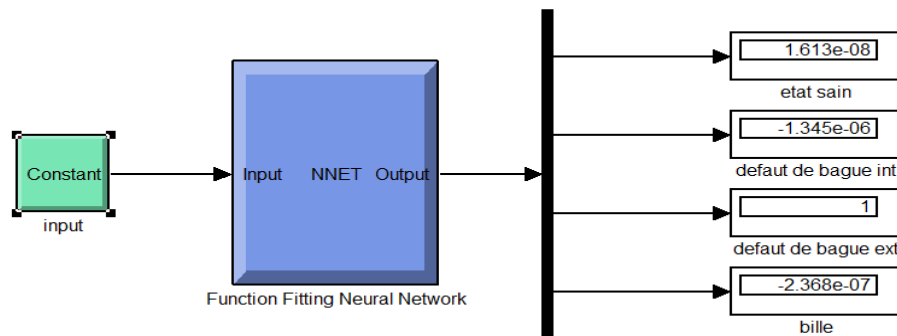


Fig. IV.10 : Test de RN pour un fonctionnement avec un défaut de bague extérieure

d) Test du RN avec défaut de bille

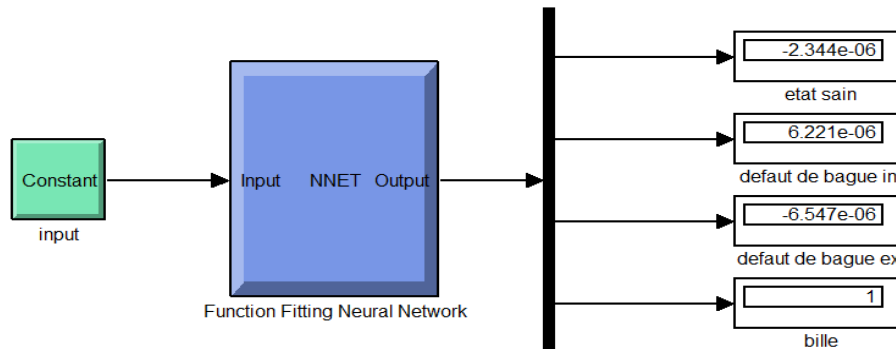


Fig. IV.11 : Test de RN pour un fonctionnement avec un défaut de bille

IV.9. Détection des défauts de roulements pour différents diamètres

Ce cas traite le pouvoir de détecter non seulement l'existence du défaut mais aussi son niveau de sévérité qui est reflété par son diamètre.

Le RNA utilisé pour la détection de roulements pour différents diamètres prend la configuration [7 10 10] avec 10 sorties comme montré par la fig. IV.12.

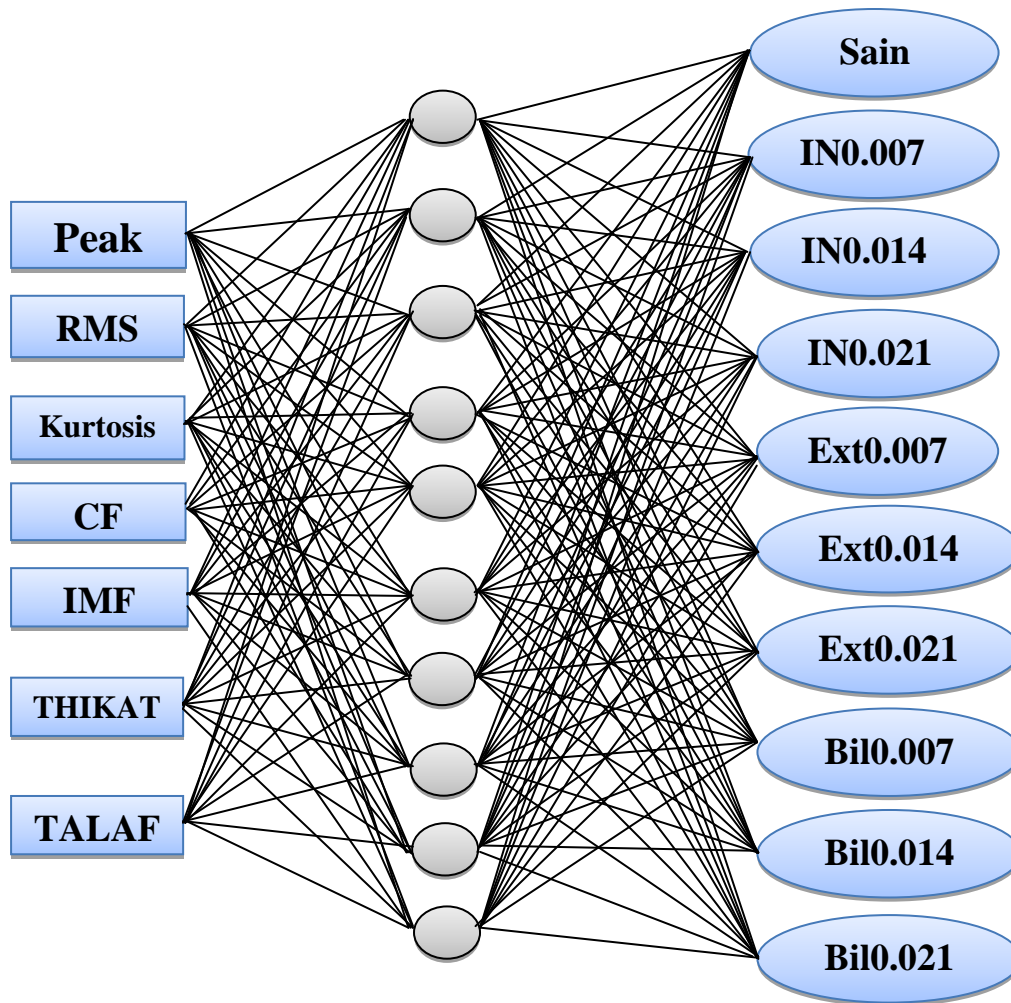


Fig.12 : Structure d'un réseau de neurones de [7 10 10].

Les différents défauts ainsi que leurs diamètres sont codifiés en binaire et sont reportés dans le tableau IV.04. [16]

Condition du roulement Diamètre du défaut	Nature du défaut Codification/Sortie désirée
Normal	1000000000
Défaut dans la bague intérieure 0.007[inches]	0100000000
Défaut dans la bague intérieure 0.014[inches]	0010000000
Défaut dans la bague intérieure 0.021[inches]	0001000000
Défaut dans la bague extérieure 0.007[inches]	0000100000
Défaut dans la bague extérieure 0.014[inches]	0000010000
Défaut dans la bague extérieure 0.021[inches]	0000001000
Défaut dans la bille 0.007[inches]	0000000100
Défaut dans la bille 0.014[inches]	0000000010
Défaut dans la bille 0.021[inches]	0000000001

Tableau. IV.04. Condition de roulement de 10 sorties

IV.9.1. Résultats de l'apprentissage

Les meilleures performances d'apprentissage sont obtenues à travers un bon choix de la structure du réseau de neurones après plusieurs tests d'apprentissage, le réseau obtenu est caractérisée par une architecture simple comportant une couche d'entrée (rétine), une couche de sortie pour la décision et une couche cachée composée de dix neurone dont la fonction de transfert est de type sigmoïde et de type linéaire pour le neurone de la couche de sortie.

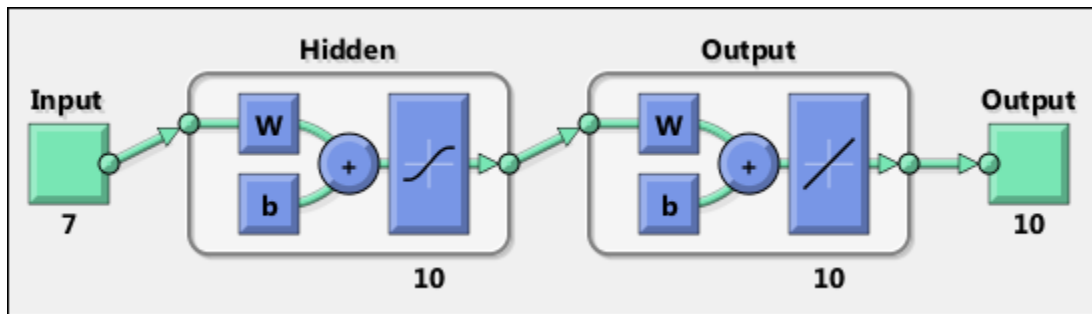


Fig. IV.13 : Construction du bloc de RNA pour différents diamètres

Les performances d'apprentissage du réseau de neurones utilisées sont évaluées à travers l'erreur quadratique moyenne (EQM). Pour notre cas RN atteint une valeur de $1.3376e^{-11}$ après 9 itérations (figure IV.14).

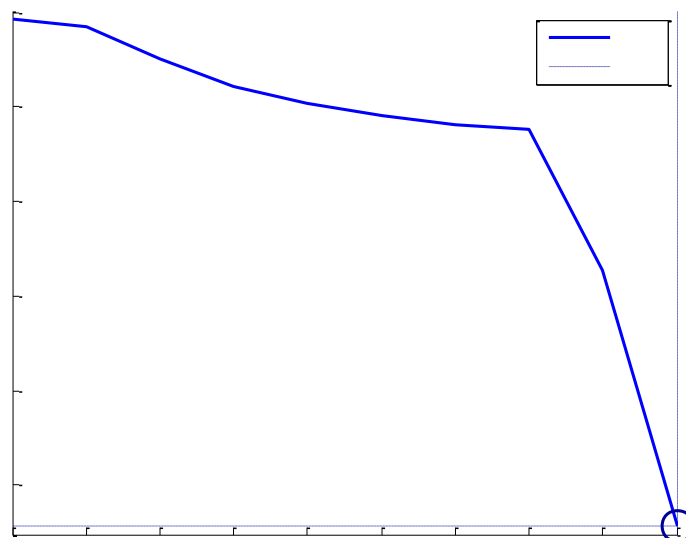


Fig. IV.14 : Performances de RNA

IV.9.2. Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus dans la phase du test, on constate que les sorties du réseau suivent presque conformément (avec une erreur de $1.3376e^{-11}$) les sorties désirées préétablies auparavant.

IV.9.3. Tests du RN pour la détection de défaut

Une fois que le RNA construit et que sont apprentissage a atteint des performances satisfaisantes, on fait des tests des RN pour les fonctionnements sain et avec défaut :

a) Test du RN pour un fonctionnement sain

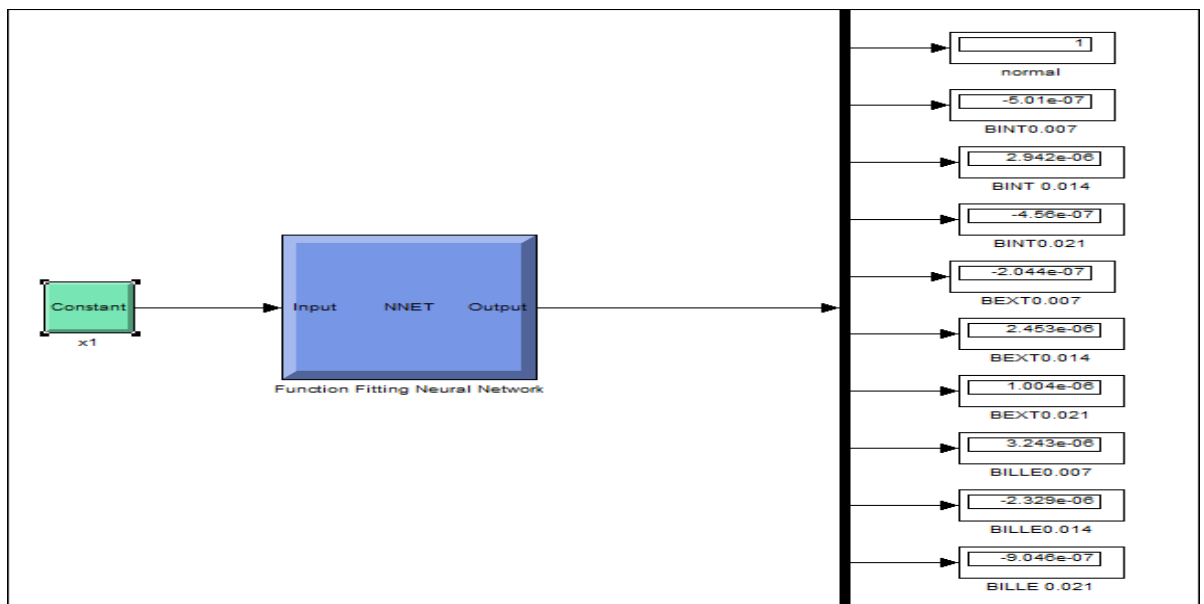


Fig. IV.15 : Test de RN pour un fonctionnement sain

b) Test du RN avec défaut de bague intérieure

On choisit le défaut de diamètre de 0.007"

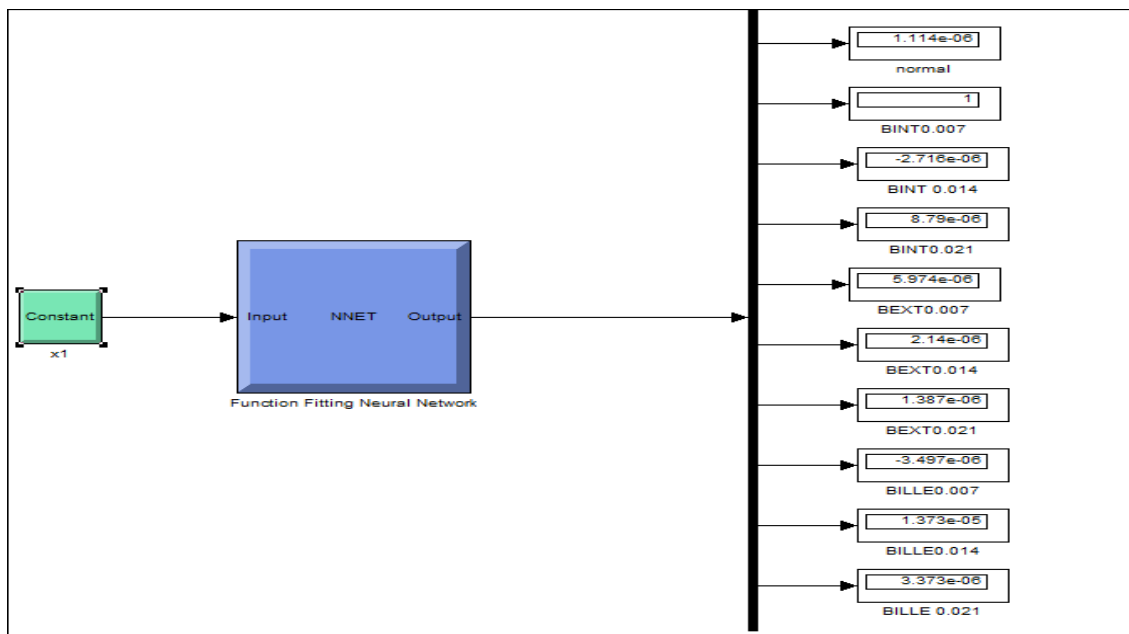


Fig. IV.16 : Test de RN pour un fonctionnement avec un défaut de bague intérieure pour un diamètre de 0.007"

c) Test du RN avec défaut de bague extérieure

On choisit le défaut pour un diamètre de 0.014"

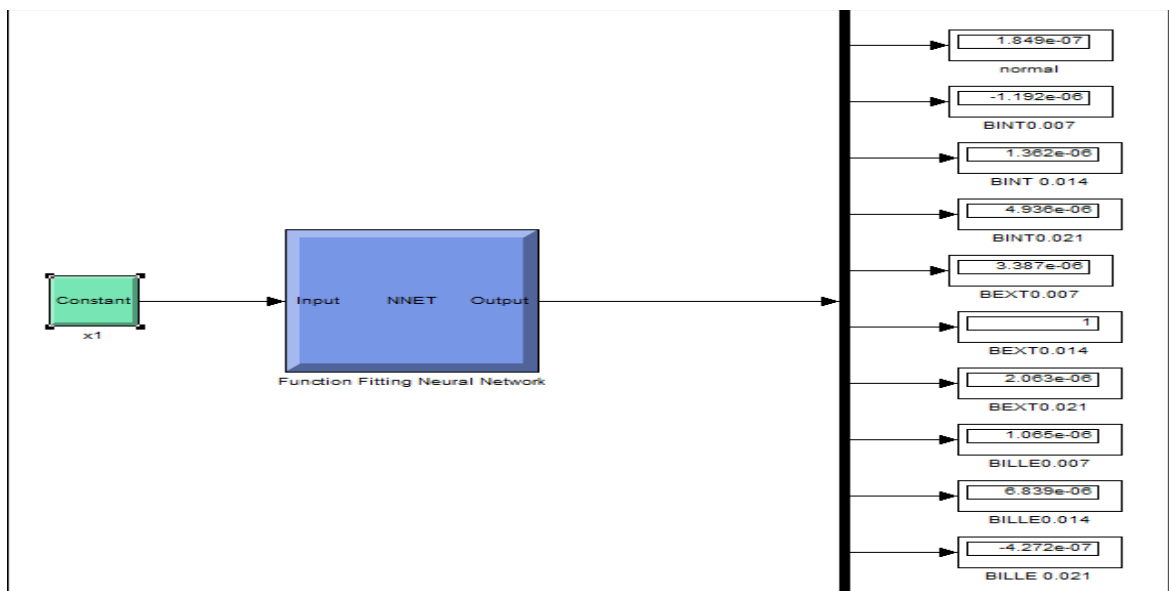


Fig. IV.17 : Test de RN pour un fonctionnement de défaut bague extérieure pour un diamètre de 0.014"

d) Test du RN avec défaut de bille

On choisit le défaut pour un diamètre de 0.021"

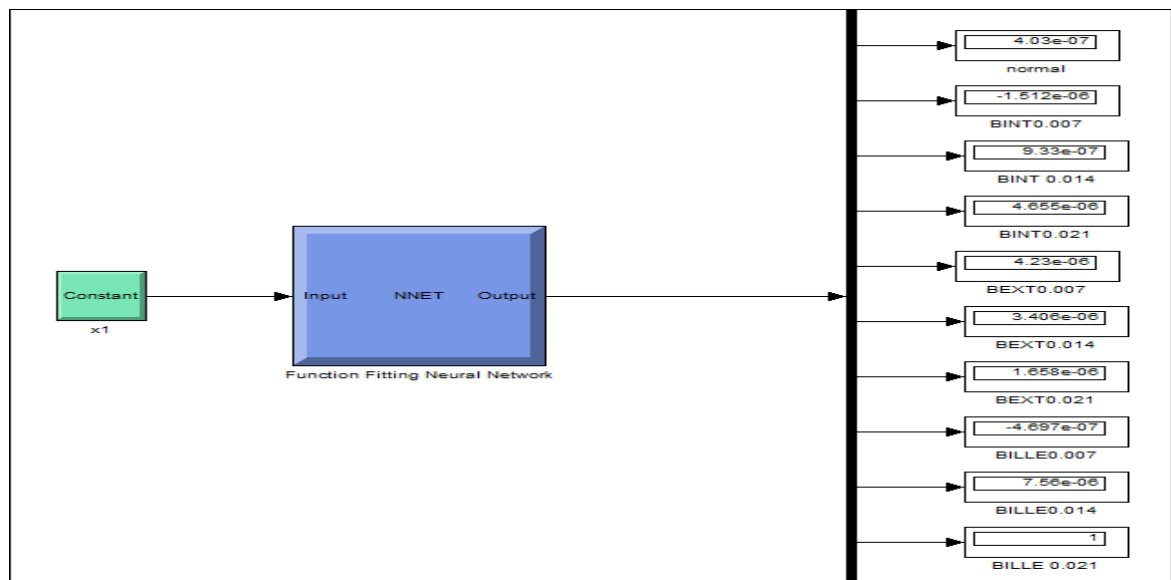


Fig. IV.18 : Test de RN pour un fonctionnement de défaut de bille pour un diamètre de 0.021"

IV.10. Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la présentation de la classification des défauts de roulements par les réseaux de neurones artificiels (RNA). Le réseau obtenu est caractérisé par une architecture simple comportant une couche d'entrée (rétine), une couche de sortie pour la décision et une couche cachée composée de 10 neurones, et on a relevé des résultats graphiques qui présentent les résultats de l'apprentissage.

Donc des meilleures performances d'apprentissage sont obtenues à travers un bon choix de la structure du réseau de neurones après plusieurs tests d'apprentissage.

L'objectif de ce travail, c'est la classification automatique des défauts de roulement de la machine asynchrone. Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Cependant, statistiquement les défauts de roulements constituent la grande part des défauts de la machine asynchrone.

Cet élément forme un support de lien entre deux structures tout en facilitant leur mouvement en réduisant les forces de frottements entre eux.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les principaux éléments de constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil et les différents défauts qui peuvent affecter son bon fonctionnement, ainsi que ses origines. Puis, nous avons présenté un état de l'art des différentes techniques de surveillance des machines asynchrones.

Ensuite donner une idée générale sur la constitution et la conception des roulements, on avait aussi cité les différents types des roulements et les défauts qui peuvent les affecter en indiquant les de chaque défaut.

Les défauts essentiels qui peuvent affecter un roulement sont : le grippage dû à l'absence de lubrification, la corrosion due à un mauvais choix du lubrifiant et la corrosion de contact due au mauvais choix d'ajustements entre les bagues etc...

Ces défauts apparaissent au niveau de la bague extérieure, la bague intérieure, la cage et les éléments roulants (billes). Chaque type de défaut dans ces quatre éléments de roulement à une fréquence caractéristique spécifique.

La technique étudiée pour la détection de défauts de roulement est basée sur l'analyse des signaux vibratoires dans le domaine temporel et fréquentiel. été traités par deux méthodes classiques. Il s'agit de l'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier et l'analyse d'enveloppe basée sur la Transformée de Hilbert Huang.

La méthode de la EMD a été appliquée directement sur l'ensemble des signaux de la base de signaux de Case Western Reserve University (CWRU, Bearing Data Center) comportant des vibrations des différents modes de fonctionnement du moteur asynchrone (sain, défaut de la bague interne et bague externe, défaut des billes), et nous avons alors obtenu pour chaque signal un ensemble d'IMFs qui le caractérise, pour chacune des ces IMFs nous avons calculé les spectres d'amplitude en utilisant la transformée de Hilbert, et comme pas toutes les IMFs sont significatives, nous avons opté alors pour une méthode de sélection des IMFs les plus pertinentes.

Les résultats de simulation des signaux simulant les défauts de roulement et les signaux réels d'un roulement sain est défectueux nous a permis de voir que l'analyse d'enveloppe élimine le bruit mais les interférences de vibrations restent présentes.

La décomposition modale empirique(EMD) est une technique innovante et plus avantageuse pour la détection des singularités des signaux par rapport aux autres techniques d'analyse de signaux non linaires et non stationnaires telles que la transformée en FFT, STFT, WT...etc. est plus performante.

Enfin en utilisant une technique avancée à base des réseaux de neurones artificiels (RNA), basée sur les indicateurs scalaire dans l'apprentissage du classificateur neuronale.

Les résultats expérimentaux obtenus sont claires et efficaces, nous a permis de mettre en œuvre un bilan complet sur l'état de santé de roulement et permettes au futur d'améliorer les compétences pratiques, de gagner du temps et de rentabiliser l'unité de production, le bon fonctionnement d'une telle approche de diagnostic nécessite une bonne connaissance du système, cette connaissance se traduit par la disponibilité d'une base de données importante et significative issu d'une certaine expertise théorique et expérimentale.

Les travaux effectués dans ce mémoire nous orientent vers quelques perspectives de recherche qu'il nous apparaît utile à savoir :

- Le développement d'un modèle de diagnostic à taux de classification amélioré capable d'être intégré dans un environnement réel ;
- L'utilisation des autres méthodes de classification automatique pour l'analyse des signaux vibratoires des défauts des machines asynchrones ;
- Etude comparative des plusieurs approches de classification supervisé et non supervisé:

- [1] **A. Oukoucha & O. Chibani**, "Diagnostic des défauts des machines : amélioration de la représentation temps-fréquence basée sur l'analyse d'enveloppe et les operateurs", Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira- Bejaia 2016/2017.
- [2] **S. Djaballah**, "Etude et optimisation de la transformée en ondelettes pour la détection des défauts dans les roulements", Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras.
- [3] **B. Bessam**, " Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des techniques intelligentes", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra 2016.
- [4] **B .Chermat**, " Diagnostic des défauts de mas par les méthodes paramétriques de traitement du signal ", Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra 2012.
- [5] **A. Aghilas**, "Contribution de la technique de la logique floue pour le diagnostic des défauts statoriques dans la machine asynchrone à cage d'écureuil", Mémoire de Master, Université de Tiaret 2017/2018.
- [6] **F. Babaa** , "Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : "application au diagnostic des défauts statoriques", Thèse de Doctorat, Université Constantine1 2014.
- [7] **B.Bayala**, "Formation continue - techniciens supérieurs – ingénieurs électrotechniciens la machine asynchrone", Edition Revue 2010.
- [8] **M. Benhaoua**, "Transformée hilbert huang application à la détection des défauts du moteur asynchrone", Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra 2018.
- [9] **H. Dahmane & S. Souisi**, "Commande et diagnostic de la machine asynchrone à l'aide d'observateur ", Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla 2016.
- [10] **A .Medoued**, "Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones", Thèse de Docteur, Université du 20 Août 1955-Skikda 2012.

- [11] **A. Bouguerne**, "Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones", Mémoire de Magister, Université des Frères Mentouri Constantine 2009.
- [12] **N. YASSA**, "Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter- spires et des cassures de barres et d'anneaux", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2009.
- [13] **A .Labdani**, "Simulation et étude expérimentale des défauts de la machine asynchrone de 1 KW", Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi 2016/2017.
- [14] **Kh. Bennour & S. Sebih**, "Détection du défaut des amortisseurs d'une machine synchrone par l'approche des courants actif et réactif instantanés ", Mémoire de Master, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda 2016/2017.
- [15] **N. Sadki**, "Simulation des défauts statorique d'un moteur a asynchrone'', Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla 2014/2015.
- [16] **M. HARIR**, "Etude des défauts dans la machine asynchrone à cage d'écureuil par l'emploi de la fonction d'enroulement modifiée", Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf 2008/2009.
- [17] **H. Cherif**, " Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes", Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider – Biskra 2014.
- [18] **S. Chaib & A. Boussaidi**, "Détection et caractérisation des défauts des roulements par l'analyse spectrale", Mémoire de Master, Université M'hamed Bougara Boumerdes 2015/2016.
- [19] **K. Merah**, "Diagnostic des défauts de roulement d'un moteur par analyse vibratoire (etude comparative avec l'analyse du courant statorique ", Mémoire de Master, Université d'Oran Mohamed Boudiaf 2015/2016.
- [20] **Z. Adbi**, "Etude des effets vibratoires sur la durée de vie des roulements à rouleaux", Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba 2010.

Bibliographie

- [21] **Kh. Mesaoudi & S. Slimani**, "Outils d'analyse et du diagnostic des défauts de roulements et d'engrenages", Mémoire de Master, Université A-Mira Bejaia 2015.
- [22] **A. Bouguerne**, "Classification automatique des défauts des moteurs asynchrones", Thèse de Doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine1 2017.
- [23] **Kh. Redjil**, "Etude des défauts du roulement par analyse spectrale et cepstrale", Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba 2016/2017.
- [24] **I. Touafek**, "Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : comparaison de l'EMD et des ondelettes (Wt) ", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas – Setif.
- [25] **T. Belkhir & M. Ben Saci**, "La maintenance des équipements par l'analyse vibratoire", Mémoire de Master, Université Kasdi Marbah Ourgla 2015/2016.
- [26] **M. Boukhobza**, "Application du traitement du signal pour le suivi des défauts de composants mécaniques soumis a des vibrations", Mémoire de Magister, Université d'Oran Mohamed Boudiaf 2010.
- [27] **O. Djebili**, "Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement", Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne 2013.
- [28] **M. Bentoumi & H. Bakhti**, "Application de la technique EMD pour l'analyse des données des signaux de fuite dans les réseaux de distribution d'eau", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2016.
- [29] **Y. Bendaoud**, "Prédiction des résistances mécaniques des bétons à base des ciments composés en utilisant les réseaux neurones artificiels", Mémoire de Magister, Université Constantine1 2014.
- [30] **Z.ASRADJ**, "Identification des systèmes non linéaires par les réseaux de neurones", Mémoire de Magister, Université Abderrahmane Mira –Bejaia.

Bibliographie

- [31] **M. Boudjedaimi**, "Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou 2009.
- [32] **M. Amrani**, "Surveillance et diagnostic d'une ligne de production par les réseaux de neurones artificiels", Mémoire de Magistère, Université M'Hamed Bougera Boumerdes 2010.
- [33] **A. Kabla**, "Analyse de la signature du courant pour la détection et la classification de défauts de roulement dans les machines électriques", Mémoire de Magister, Université Abderahmane Mira –Bejaia 2009.
- [34] www.memoireonline.com/04/12/5750/m_Identification-et-commande-des-systemes-non-lineaires13.html
- [35] **Z. Mokri Mohammed**, "Classification des images avec les réseaux de neurones convolutionnels ", Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen 2017.
- [36] **Philippe Leray**, "Quelques types de réseaux de neurones la rétropropagation", INSA Rouen -Département ASI - Laboratoire PSI, Philippe.Leray@Insa-Rouen.Fr

Résumé

L'utilisation de la machine asynchrone(MAS) est la plus croissante dans les domaines industriels. Pour cela, la nécessité impose plusieurs projets de recherche pour la détection des défauts de cette machine.

Les roulements, considérés comme des composants cruciaux dans la machine asynchrone(MAS), sont largement utilisés dans l'industrie. Ainsi, la surveillance de l'état des roulements est devenue une opération incontournable dans le cadre du déploiement d'une politique de maintenance préventive. Ce travail, s'inscrit dans le cadre du diagnostic et la classification des défauts des roulements par l'analyse vibratoire des signaux, et nous avons utilisé deux techniques la transformée en Hilbert Huang (*HHT*) et les réseaux de neurones artificiels (RNA).

Mots clés : machine asynchrone(MAS), diagnostic, roulement, la transformée en Hilbert Huang(THH), réseaux de neurones(RNA).

ملخص

تعد الآلات غير المتزامنة الأكثر استعمالاً في العديد من المجالات الصناعية لذلك وضعت أبحاث مختلفة لدراستها من أجل التحكم بها و حمايتها و صيانتها و اكتشاف أعطابها.

الدحاريج تعتبر من المكونات الأساسية في الآلات غير المتزامنة وتستخدم على نطاق واسع في الصناعة وبالتالي مراقبة حالة الدحاريج أصبحت عملية أساسية في انتشار سياسة الصيانة الوقائية. العمل في هذه المذكرة هو جزء من تشخيص وتصنيف عيوب الدحاريج عن طريق التحليل الاهتزازي للإشارات ، واستخدمنا اثنين من تقنيات تحويل هيلبرت هوانغ والشبكات العصبية الاصطناعية.

الكلمات المفتاحية

الآلات غير المتزامنة، التشخيص، أعطاب الدحاريج، التحويل المويجي، الشبكات العصبية الاصطناعية

Abstract

The use of the asynchronous machine (MAS) is the most growing in the industrial fields. For this, the need imposes several research projects for the detection of defects of this machine.

Bearings, considered crucial components in the asynchronous machine (MAS), are widely used in the industry. Bearing status monitoring has become an essential step in the deployment of a preventive maintenance policy. This work of memory, is part of the diagnosis and the classification of the defects of the bearings by the vibratory analysis of the signals, and we used two techniques the transformed in Hilbert Huang (HHT) and the networks of artificial neurons (RNA).

Key words: asynchronous machine (MAS), diagnostics, rolling, Hilbert Huang transform (THH), neural networks (RNA).